

Impression par jets d'encre de capteurs de température
résistifs sur substrat d'aluminium anodisé

par

Alain PICARD

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 7 SEPTEMBRE 2023

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Alain Picard, 2023



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

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Sylvain G. Cloutier, directeur de mémoire
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Vahé Nerguizian, président du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Martin Bolduc, membre du jury externe
Département de génie mécanique à l'Université du Québec à Trois-Rivières

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

LE 15 AOÛT 2023

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier en premier lieu mon professeur, Sylvain G. Cloutier, qui m'a permis de faire mes expérimentations avec autant de liberté et de soutien. J'aimerais aussi remercier mes parents qui m'ont soutenu et aidé à persévérer durant toutes ces années d'études. Un merci, aussi, à mes collègues et mes amis du groupe de recherche NOMAD pour le soutien et les nombreuses discussions techniques tenues lors de mon parcours. Je remercie également ma sœur (Judith Picard) et ma copine (Mélissa Trottier) pour leur aide lors de la rédaction de ce document.

Impression par jets d'encre de capteurs de température résistifs sur substrat d'aluminium anodisé

Alain PICARD

RÉSUMÉ

Les capteurs électroniques sont des dispositifs essentiels utilisés dans divers domaines, tels que la santé, la sécurité, l'environnement et les technologies de l'information. Ils mesurent, détectent et transmettent des informations précieuses qui améliorent notre quotidien. Dans le domaine de la santé, les capteurs électroniques, tels que les moniteurs de fréquence cardiaque et les capteurs de glucose permettent un suivi précis des paramètres vitaux des patients, ce qui facilite ainsi le diagnostic et le traitement des maladies. De plus, les capteurs implantables et la télémédecine offrent de nouvelles perspectives en matière de soins de santé à distance. Dans le domaine de la sécurité, les capteurs de mouvements, les détecteurs de fumée et les caméras de surveillance sont utilisés pour protéger les personnes et les biens. Avec les avancées de l'intelligence artificielle que ces technologies ont connues, elles permettent une détection plus précise et une réponse rapide aux situations d'urgence. Les capteurs électroniques sont également utilisés pour surveiller l'environnement, pour mesurer la qualité de l'air ainsi que la pollution de l'eau et pour prédire les conditions météorologiques. Dans les technologies de l'information, les capteurs électroniques collectent des données précises en temps réel, ce qui permet d'ajuster automatiquement les paramètres des appareils et d'offrir une meilleure expérience aux utilisateurs. Cependant, la production traditionnelle de capteurs électroniques a un impact environnemental significatif en raison de l'utilisation intensive des ressources et de la génération de déchets. La fabrication additive, telle que l'impression par gravure directe et l'impression par jets d'encre, présente des avantages en termes de réduction des déchets, d'utilisation efficace des ressources et de consommation d'énergie réduite. Ces méthodes permettent de produire des capteurs de manière précise en utilisant uniquement la quantité de matériaux nécessaires. L'impression par jets d'encre a une histoire progressive, depuis les années 1950, avec des progrès continus dans la résolution, la vitesse et la durabilité des encres. Aujourd'hui, elle est largement utilisée dans divers domaines et elle offre des solutions économiques et polyvalentes. En résumé, les capteurs électroniques sont indispensables dans notre société moderne et l'impression par jets d'encre a contribué à leur évolution et à leur accessibilité. Dans le présent mémoire, un capteur de température résistif est imprimé sur un substrat d'aluminium anodisé en utilisant un scellant polymérique comme isolant électrique. Sur un échantillonnage de 14 spécimens, les résultats obtenus ont été similaires. Le procédé d'impression par jets d'encre est optimisé en prenant en compte l'uniformité de déposition des gouttelettes ainsi que la conductivité finale du capteur. La méthode de recuit thermique et ses répercussions sont analysées pour proposer une méthode optimale et l'obtention d'un capteur avec un coefficient de résistance thermique de $0.43 \Omega/^{\circ}\text{C}$. Après avoir soumis les échantillons à plusieurs cycles thermiques, il est possible de confirmer les performances du capteur en condition de hautes températures.

VIII

Mots-clés: capteur de température, résistif, substrat d'aluminium anodisé, scellant polymérique, isolation électrique, impression par jets d'encre, uniformité de déposition, conductivité, recuit thermique, cycles thermiques, hautes températures

Inkjet printed resistive temperature sensor on anodized aluminum substrate

Alain PICARD

ABSTRACT

Electronic sensors are essential devices used in various fields such as healthcare, security, environment, and information technology. They measure, detect, and transmit valuable information that enhances our daily lives. In the healthcare field, electronic sensors like heart rate monitors and glucose sensors enable precise monitoring of vital patient parameters, facilitating diagnosis and treatment of diseases. Additionally, implantable sensors and telemedicine offer new perspectives in remote healthcare. In the security domain, motion sensors, smoke detectors, and surveillance cameras are used to protect people and property, with advancements in artificial intelligence for more accurate detection and rapid response to emergency situations. Electronic sensors are also utilized to monitor the environment, measuring air quality, water pollution, and predicting weather conditions. In information technology, electronic sensors collect real-time accurate data, allowing for automatic adjustment of device parameters and providing a better user experience.

However, traditional production of electronic sensors has a significant environmental impact due to resource-intensive operations and waste generation. Additive manufacturing, such as direct engraving printing and inkjet printing, offers advantages in waste reduction, efficient resource utilization, and reduced energy consumption. These methods enable precise sensor production, using only the necessary amount of material. Inkjet printing has a progressive history since the 1950s, with continuous progress in resolution, speed, ink durability, and compatibility with different materials. Today, it is widely used in various fields, providing cost-effective and versatile solutions.

Electronic sensors are indispensable in our modern society, and inkjet printing has contributed to their evolution and accessibility. In this paper, a resistive temperature sensor is printed on an anodized aluminum substrate using a polymeric sealant as an electrical insulator. The results obtained from a sample of 14 specimens were similar. The inkjet printing process is optimized by considering droplet deposition uniformity and the final conductivity of the sensor. The thermal annealing method and its repercussions are analyzed to propose an optimal approach. After subjecting the samples to multiple thermal cycles, the sensor's performance under high-temperature conditions can be confirmed and a temperature coefficient of resistance of $0.43 \Omega/^{\circ}\text{C}$ is observed.

Keywords : temperature sensor, resistive, anodized aluminum substrate, polymeric sealant, electrical insulation, inkjet printing, deposition uniformity, conductivity, thermal annealing, thermal cycles, high temperatures

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	4
CHAPITRE 1 L'impression par jets d'encre	15
1.1 Mise en contexte	15
1.2 Méthodes de fabrication habituelles pour les circuits et les capteurs électroniques	15
1.3 L'émergence de l'impression dans la fabrication de circuits et de capteurs électroniques	17
1.3.1 L'impression par jets d'encre	17
1.3.2 L'impression par déposition directe	17
1.3.2.1 La lithographie	18
1.4 Les défis de l'impression dans la fabrication de cartes électroniques	19
1.4.1 Précision et résolution	19
1.4.1.1 Matériaux et compatibilité	19
1.4.2 Optimisation des processus et caractérisation	20
1.4.3 Évolutivité et coûts	20
1.5 La migration vers des méthodes de fabrications numériques	21
1.5.1 Flexibilité de conception	21
1.5.2 Réduction des coûts	21
1.5.3 Rapidité de production	22
1.5.4 Personnalisation et prototypage rapides	22
1.6 Choix de la méthode d'impression	24
1.6.1 Flexibilité de conception	24
1.6.2 Rapidité du prototypage	24
1.6.3 Précision accrue	25
1.6.4 Réduction des déchets	25
1.6.5 Moins de produits chimiques	25
1.6.6 Économie d'énergie	26
1.6.7 Coûts réduits	26
1.6.8 Rapidité de production	27
1.6.9 Évolutivité	27
1.7 L'impression par jets d'encre	27
1.7.1 Les prémisses de l'idée	28
1.7.2 Innovation de l'impression	29
1.7.3 Principe de fonctionnement des têtes d'impression à jets d'encre	32
1.7.4 Les débuts commerciaux	33
1.7.5 L'amélioration de la technologie	34
1.7.6 Évolution de la technologie de têtes d'impression	35
1.8 Les difficultés de l'impression par jets d'encre	36

CHAPITRE 2 Revue de littérature	39
2.1 Impression par jets d'encre	39
2.2 Fabrication de capteurs de température de façon additive	47
2.3 Frittage de nanoparticules d'argent.....	54
2.4 Formation de gouttelettes.....	58
CHAPITRE 3 Céradrop	63
3.1 Présentation de l'imprimante	63
3.2 Cartouche Samba	63
3.3 Influence de différents facteurs sur la qualité d'éjection	64
3.4 Influence de différents facteurs sur la qualité d'impression	65
CHAPITRE 4 Optimisation	67
4.1 Formation des gouttelettes	67
4.2 Optimisation du remplissage.....	76
CHAPITRE 5 Méthodologie.....	79
5.1 Préparation de la surface	79
5.2 Impression du capteur résistif	83
5.3 Mesure de la conductivité électrique	88
5.4 Précision, continuité et respect des dimensions	88
5.5 Adhésion des traces.....	88
CHAPITRE 6 Analyse des résultats et discussion.....	91
6.1 Frittage de l'encre d'argent	91
6.2 Conductivité électrique	92
CONCLUSION	99
BIBLIOGRAPHIE.....	125

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1 État de l'art des capteurs de température imprimés	52
Tableau 6.1 Valeur de résistance initial, coefficient de température et de conductivité électrique pour l'ensemble des capteurs	96

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Voltera Nova	18
Figure 1.2 Simulation de la formation de 10 gouttelettes d'encre à 38 kHz Tiré de Khalate (2011, p.7).....	31
Figure 1.3 Représentation d'une buse piézoélectrique lors de l'éjection d'une gouttelette a) au repos, b) lorsqu'un voltage positif est appliqué à l'élément piézoélectrique, c) lorsqu'un voltage négatif est appliqué et d) lorsque la gouttelette est expulsée et que la tête retourne au repos	32
Figure 1.4 Représentation d'une buse thermique lors de l'éjection d'une gouttelette a) au repos, b) lorsque l'élément évapore le solvant, c) lorsque la température redescend et que la gouttelette est éjectée.....	33
Figure 2.1 Méthode de fabrication successive d'un relais imprimé par jets d'encre. Tiré de Park et al., (2013, p. 2).....	42
Figure 2.2 Image composée du transistor fabriqué a) et une représentation en vue de coupe des différentes couches Tiré de Grubb, Subbaraman, Park, Akinwande, & Chen, (2017, p. 2)	43
Figure 3 (a) Diagram du capteur de température imprimé. (b) structure chimique de la couche sensible de PEDOT:PSS. (c) Processus de fabrication du capteur de température imprimé. (d) Image du capteur imprimé attaché à la peau. Tirée de (Wang et al., 2020).....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 2.4 Représentation des particules d'argent avant frittage a), et après frittage b).....	56
Figure 3.1 Types de remplissages « square » a) « centered square » b) « shift hexagonal » c) et « fab hexagonal » d).....	66
Figure 4.1 Graphique Re vs Oh	68
Figure 4.2 Graphique Re vs Oh montrant les valeurs de l'expérience actuelle	70
Figure 4.3 Représentation des types de contrôle machine et logiciel de la Céradrop Tirée de Xu (2007, p. 1).....	72
Figure 4.4 Contrôle du type de remplissage Céradrop	73

Figure 4.5 Représentation de la buse piézoélectrique selon le voltage appliqué dans le temps	74
Figure 4.6 Vitesse du ménisque d'une buse dans le temps selon deux types de commande Tirée de Khalate (2011, p. 4)	75
Figure 4.7 Thermistance imprimée en argent non fritté	77
Figure 5.1 Représentation en vue de coupe du substrat d'aluminium avant scellant a) et après application du scellant polymérique	81
Figure 5.2 Mesure de l'épaisseur de la couche du scellant sur le substrat d'aluminium avec le microscope LEXT OLS5000 d'Olympus	81
Figure 5.3 Surface d'aluminium scellé agrandissement 50X	82
Figure 5.4 Remplissage carré du logiciel Ceraslice.....	84
Figure 5.5 Effet d'un type de remplissage carré centré et d'un croisement de trame trop faible	85
Figure 5.6 La différence entre le "Raster Overlap" et le "Layer Interleaving Tirée de Trudeau (2021, p. 120).....	86
Figure 5.7 Taille d'une gouttelette sur le substrat	87
Figure 5.8 Capteurs imprimés et connectés.....	89
Figure 6.1 Image prise au microscope électronique à balayage des échantillons frittés une heure a) et cinq heures b).....	91
Figure 6.2 Résistance électrique selon la température cycle initiale Série 1	94
Figure 6.3 Résistances électriques selon la température cycle initiale Série 3 Cycle 2.....	95

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

RTD : « Resistive Temperature Detector »
Oh : Nombre d'Ohnesorge
Re : Nombre de Reynolds
CVD : « Chemical vapor deposition »
UV : Ultraviolet
Dpi : « Dot per inch »
QD : « Quantum dots »
TIJ : « Thermal ink-jet »
CMOS : « Complementary metal-oxide semiconductor »
MEMS : « Micro-electromechanical systems »
3D : Trois dimensions
pH : mesure de l'acidité
PEDOT : « poly(3,4-ethylenedioxythiophene) »
PSS : « polystyrene sulfonate »
HR : Humidité relative
TCR : « Temperature coefficient of resistance »
PTC : « Positive temperature coefficient »
NTC : « Negative temperature coefficient »
TGA : Analyse thermogravimétrique
Ni : Nickel
LCR : Inductance, Capacitance, Resistance
MOPA : « Master Oscillator Power Amplifier »
AWG : « American wire gauge »

INTRODUCTION

Les capteurs électroniques sont des dispositifs essentiels qui jouent un rôle fondamental dans notre société moderne. Ils sont utilisés dans une large gamme d'applications, allant des domaines de la santé et de la sécurité à ceux de l'environnement, de l'aérospatiale et des technologies de l'information. Les capteurs électroniques permettent de mesurer, de détecter et de transmettre des informations précieuses qui contribuent à améliorer notre quotidien. Dans cet ouvrage, l'importance des capteurs électroniques dans notre société actuelle sera explorée en mettant en évidence leurs avantages et les domaines dans lesquels ils sont largement utilisés.

Les capteurs électroniques ont révolutionné le domaine de la santé en permettant un suivi et une surveillance précise des paramètres vitaux des patients. Des capteurs, tels que les moniteurs de fréquence cardiaque, les tensiomètres électroniques et les capteurs de glucose ont amélioré le diagnostic et le traitement des maladies. Ces dispositifs permettent aux médecins de recueillir des données en temps réel sur l'état de santé des patients, ce qui facilite ainsi les interventions médicales appropriées. De plus, les capteurs implantables et les dispositifs de télémédecine offrent de nouvelles perspectives en matière de soins de santé à distance, ce qui permet aux patients de recevoir des soins médicaux de qualité, et ce, sans se rendre physiquement chez le médecin. Un tel capteur peut prendre la forme du « patch » de suivis d'Inomedis. De plus, l'ajout de l'intelligence artificielle permet un diagnostic encore plus précis en utilisant des capteurs à faibles coûts (Payette, Cloutier, & Vaussenat, 2022).

Les capteurs électroniques jouent un rôle crucial dans le domaine de la sécurité, que ce soit dans les applications domestiques, industrielles, publiques et militaires. Les capteurs de mouvements, les détecteurs de fumée et les caméras de surveillance sont quelques exemples de capteurs utilisés pour protéger les personnes et les biens. Grâce à ces capteurs, il est possible de détecter les intrusions, de prévenir les incendies et d'assurer la sécurité générale des individus dans les environnements sensibles. Les capteurs de sécurité sont devenus encore plus

sophistiqués avec l'intégration de l'intelligence artificielle, ce qui permet une détection plus précise et une réponse rapide aux situations d'urgence. Ils sont aussi utilisés pour surveiller et détecter les menaces potentielles, ce qui contribue ainsi à la sécurité des individus et des infrastructures critiques. Les capteurs de mouvement, les capteurs de vision nocturne et les capteurs de détection de vibrations sont quelques exemples de capteurs utilisés pour surveiller les zones sensibles et détecter les activités suspectes. Ces capteurs permettent une surveillance continue et une réponse rapide aux menaces, ce qui renforce ainsi la sécurité globale. Dans le contexte de la sécurité nationale, les capteurs électroniques sont utilisés pour détecter les mouvements de troupes, les activités illégales et les intrusions à travers les frontières, ce qui contribue à la protection de la souveraineté et de l'intégrité du pays. Les capteurs électroniques servent aussi à la protection des infrastructures critiques, telles que les centrales électriques, les réseaux de communication et les installations gouvernementales. Les capteurs de sécurité permettent de surveiller en permanence ces infrastructures et de détecter toute activité anormale ou intrusion. Les capteurs de détection d'incendies, les capteurs de gaz toxiques et les capteurs de surveillance vidéo sont utilisés pour prévenir les incidents et pour garantir la sécurité des personnes travaillant dans ces environnements. En assurant la surveillance et la détection précoce des incidents, les capteurs électroniques contribuent à maintenir la continuité des services essentiels et à protéger les infrastructures stratégiques (M. Javaid, Haleem, Rab, Pratap Singh, & Suman, 2021 ; S. Javaid, Zeadally, Fahim, & He, 2022 ; Zhang et al., 2022).

La prise de conscience croissante des problèmes environnementaux a conduit à une utilisation accrue des capteurs électroniques pour surveiller et mesurer les paramètres environnementaux. Les capteurs de qualité de l'air, les capteurs de pollution de l'eau et les capteurs météorologiques sont utilisés pour évaluer l'impact des activités humaines sur l'environnement. Ces données collectées par les capteurs permettent d'identifier les sources de pollution, de prédire les conditions météorologiques et de prendre des mesures préventives pour préserver notre environnement (Hojjati-Najafabadi, Mansoorianfar, Liang, Shahin, & Karimi-Maleh, 2022 ; Kortoçi et al., 2022).

Les technologies de l'information ont révolutionné notre société, et les capteurs électroniques jouent un rôle central dans leur fonctionnement. Les capteurs électroniques sont utilisés pour collecter des données précises en temps réel. Ils permettent de mesurer et de détecter une variété de paramètres, tels que la luminosité, la température, la pression, l'accélération, le mouvement et bien d'autres encore. Ces données sont essentielles pour comprendre l'environnement dans lequel ces technologies opèrent et elles servent de bases de référence à de nombreuses fonctionnalités et de services. Par exemple, les capteurs de luminosité ajustent automatiquement la luminosité de nos téléphones intelligents et de nos écrans d'ordinateur en fonction des conditions ambiantes, ce qui permet d'avoir une expérience optimisée.

La production traditionnelle de capteurs électroniques a un impact significatif sur l'environnement, principalement en raison de l'utilisation intensive de ressources et de l'émission de déchets. La fabrication de capteurs électroniques nécessite une quantité importante de matières premières, telles que les métaux, les plastiques et les produits chimiques. L'extraction de ces ressources a souvent des conséquences néfastes sur l'environnement, notamment en termes de déforestation, de destruction des habitats naturels et de pollution des sols et des eaux. Les processus de fabrication des capteurs électroniques requièrent aussi une quantité importante d'énergie, notamment pour l'usinage, l'assemblage et les tests. Cette consommation d'énergie contribue aux émissions de gaz à effet de serre et à l'empreinte carbone associée à la production de capteurs. Cela génère aussi des déchets importants sous forme de copeaux de métal, de déchets de plastique et de produits chimiques utilisés dans les procédés de fabrication. La gestion de ces déchets peut poser des défis environnementaux, notamment en termes de pollution des sols, de l'eau et de l'air (Robinson, 2009a).

En comparaison, la fabrication additive des capteurs électroniques présente certains avantages en termes d'impact environnemental, tels que la réduction des déchets, l'utilisation efficace des ressources et la consommation d'énergie moindre. La fabrication additive permet de produire des capteurs de manière plus précise en utilisant uniquement la quantité de matériaux

nécessaires. Cela réduit la génération de déchets et minimise les pertes de matériaux. Les matériaux utilisés peuvent aussi être optimisés pour réduire la consommation de ressources. De plus, la possibilité de réutiliser les matériaux non utilisés dans le processus d'impression contribue à une utilisation plus efficace des ressources. La fabrication additive nécessite, généralement, moins d'énergie que les méthodes traditionnelles de fabrication de capteurs électroniques, car elle évite les étapes d'usinage et d'assemblage complexes. Cela réduit l'empreinte carbone associée à la production de capteurs (Scott et al., s.d.).

Actuellement, plusieurs méthodes d'impression de circuits et de capteurs électroniques sont utilisées dans l'industrie pour produire des dispositifs électroniques flexibles et personnalisés. Voici quelques-unes des méthodes d'impression les plus couramment utilisées.

La sérigraphie « Screen printing » est une méthode d'impression qui utilise un écran en maille pour déposer des encres conductrices ou semi-conductrices sur un substrat. Elle est particulièrement adaptée à l'impression de grandes surfaces et à la fabrication de dispositifs électroniques à faibles coûts. La sérigraphie est couramment utilisée pour imprimer des capteurs de force, des capteurs de pression et des électrodes.

L'impression par gravure directe « Direct printing » consiste à utiliser des imprimantes spéciales pour déposer directement des matériaux conducteurs, souvent des pâtes, sur un substrat sans nécessiter d'étapes de lithographie. Cela permet une fabrication rapide et moins coûteuse de circuits et de capteurs électroniques.

. La flexographie « Flexographic printing » est une technique d'impression utilisée, principalement, dans l'industrie de l'emballage, mais elle trouve également des applications dans l'impression de circuits et de capteurs électroniques flexibles. Elle utilise un rouleau d'impression flexible pour déposer des encres conductrices sur un substrat

L'impression par jets d'encre « Inkjet printing » utilise des imprimantes à jets d'encre adaptées pour déposer des matériaux conducteurs, semi-conducteurs ou isolants sur un substrat. Les matériaux sont transformés en une encre spéciale compatible avec l'imprimante. Cette méthode permet une grande précision et une bonne résolution, ce qui en fait une méthode populaire pour l'impression de circuits et de capteurs électroniques (Beedasy & Smith, 2020 ; Mannerbro, Ranlöf, Robinson, & Forchheimer, 2008 ; Yin, Huang, Bu, Wang, & Xiong, 2010).

De toutes ces méthodes, l'impression par gravure directe et l'impression par jets d'encre peuvent être catégorisées comme des méthodes digitales de fabrication. La fabrication dite numérique ne nécessite pas la fabrication d'outillage supplémentaire lors d'un changement de conception. Ce sont les deux méthodes d'impression qui ont pour effet d'optimiser le plus l'utilisation de la matière première.

L'histoire de l'impression par jets d'encre remonte aux années 1950, lorsque plusieurs chercheurs ont commencé à explorer les possibilités de cette technologie novatrice. L'une des premières avancées majeures a été réalisée par le chercheur américain Rudolf Hell. Ce dernier a déposé un brevet en 1951 pour un système d'impression par jets d'encre à haute résolution. Cependant, cette invention n'a pas été largement utilisée à l'époque en raison des limitations technologiques et de la disponibilité limitée des ressources nécessaires.

Dans les années 1960, d'autres chercheurs ont continué à travailler sur les systèmes d'impression par jets d'encre et ils ont réussi à améliorer les performances et la qualité des impressions. En 1976, HP a introduit leur première imprimante à jets d'encre. Toutefois, c'est avec l'arrivée de la « ThinkJet », en 1984, que l'impression par jets d'encre a pris en popularité. Au fil des années, des chercheurs, comme Hewlett-Packard (HP), ont développé des imprimantes à jets d'encre thermique qui chauffent l'encre pour qu'elle soit éclaboussée sur le papier. Cette technologie a permis d'améliorer la vitesse et la qualité d'impression tout en réduisant les coûts de production. Cela a permis à une clientèle plus élargie d'accéder à la technologie (« HP ThinkJet, 1984 », s.d.).

Dans les années 1990, l'impression par jets d'encre a commencé à se répandre dans les foyers grâce à des imprimantes personnelles plus abordables et conviviales. Des marques, telles que HP, Epson et Canon ont joué un rôle clé dans la popularisation de cette technologie auprès du grand public. Les imprimantes à jets d'encre ont offert des avantages, tels qu'une impression silencieuse, une plus grande flexibilité de support et une possibilité de produire des couleurs vives et précises.

Au fur et à mesure que la technologie des jets d'encre a évolué, de nouveaux développements ont émergé, tels que l'introduction de gouttes d'encre de tailles variables permettant d'améliorer la précision et la qualité d'impression. Les imprimantes à jets d'encre ont également été adaptées pour l'impression sur d'autres substrats, tels que le textile, les plastiques et même les circuits électroniques (Schulte, 2002).

Au cours des dernières décennies, l'impression par jets d'encre a continué de se développer et de s'améliorer. Des progrès ont été réalisés dans des domaines, tels que la résolution d'impression, la vitesse, la durabilité des encres et la compatibilité avec une variété de matériaux. Aujourd'hui, l'impression par jets d'encre est largement utilisée dans de nombreux domaines, allant de l'impression de grands formats et de production grand volume aux applications industrielles, médicales et textiles.

L'impression par jets d'encre a également joué un rôle important dans la réduction de l'empreinte environnementale qu'amène l'industrie de l'impression. Comparée aux méthodes d'impression traditionnelles, telles que la sérigraphie, l'impression par jets d'encre nécessite moins de consommables et génère moins de déchets. Les encres utilisées dans les imprimantes à jets d'encre sont souvent à base d'eau, ce qui les rend moins toxiques et plus respectueuses de l'environnement. De plus, la technologie de jets d'encre continue à évoluer vers des encres à base de matériaux renouvelables et biodégradables, ce qui contribue ainsi à une meilleure durabilité (Robinson, 2009b ; Wawrzynek, Baumbauer, & Arias, 2021).

Dans l'avenir, on peut s'attendre à ce que l'impression par jets d'encre continue son évolution qui se traduira en des améliorations constantes de la vitesse, de la qualité, de la précision et de la compatibilité des matériaux. De nouvelles applications et d'opportunités émergeront dans des domaines, tels que l'électronique imprimée, les dispositifs médicaux, l'impression alimentaire et la fabrication additive. L'impression par jets d'encre continuera donc de jouer un rôle clé dans notre société moderne en offrant des solutions d'impression flexibles, durables et créatives.

L'impression par jets d'encre de circuits électroniques présente de nombreux avantages par rapport aux méthodes de fabrication traditionnelles. Tout d'abord, elle permet une production à grand volume, ce qui en fait une solution efficace pour répondre à la demande croissante de dispositifs électroniques. L'utilisation de cette méthode permet également de réduire considérablement la quantité de matière première utilisée, ce qui contribue à minimiser les déchets et à préserver les ressources naturelles.

Un autre avantage majeur de l'impression par jets d'encre est sa flexibilité en termes de modifications de conception. Étant donné que cette étape est réalisée numériquement, il est plus facile et plus rapide d'apporter des ajustements et des modifications aux circuits électroniques imprimés. Cela permet une plus grande agilité et une meilleure adaptabilité aux exigences changeantes du marché (Subramanian et al., 2008). En outre, l'impression par jets d'encre offre des économies significatives en termes de coûts initiaux de fabrication. Comparativement aux méthodes traditionnelles, comme la lithographie qui nécessite des équipements coûteux et des étapes de fabrication complexes, l'impression par jets d'encre est une solution plus abordable et accessible. Les coûts de démarrage sont réduits, ce qui ouvre la voie à une production de circuits électroniques à plus petite échelle et à des applications plus spécifiques.

Enfin, l'impression par jets d'encre offre une grande précision et une résolution élevée, ce qui permet la création de circuits électroniques complexes et de haute qualité. Cette méthode permet également de réaliser des motifs fins et détaillés, ce qui est essentiel pour la fabrication de capteurs électroniques et d'autres dispositifs nécessitant une grande précision.

L'impression de circuits électroniques par jets d'encre offre aussi de nombreux avantages au niveau technique, tels que la possibilité d'imprimer des circuits personnalisés directement sur les composants de structure. Cette méthode permet de réduire, voire d'éliminer, le besoin d'utiliser des cartes électroniques. Cela réduit considérablement l'espace nécessaire pour loger les composants électroniques d'un produit donné (Mo et al., 2019). Comparée à l'utilisation d'une encre à base de cuivre, celle à base d'argent est plus avantageuse, parce qu'elle s'oxyde moins rapidement (Lee, Hsu, & Tuan, 2016). De plus, les méthodes de frittage en atmosphère non contrôlée facilitent grandement le traitement des circuits imprimés (Oh et al., 2020).

La présente recherche a pour but de confirmer la possibilité d'imprimer un capteur de température résistif sur un substrat d'aluminium anodisé. Le fait d'imprimer directement sur un substrat d'aluminium permet de conduire beaucoup de courant sans surchauffer, car l'aluminium agit en tant que dissipateur de chaleur. Dans le cas présent, le fait que le capteur de température résistif soit imprimé directement sur la source de chaleur permet une lecture plus directe, voire presque instantanée. Un tel capteur pourrait être très utile dans les assemblages de batteries pour le domaine de l'automobile, où le contrôle de la température est crucial (Billi, Viricelle, Montanaro, & Pijolat, 2002 ; « The Automotive Market and Flexible and Printed Electronics », s.d. ; Xiao et al., 2018). Cette option pourrait faciliter le contrôle de la température tout en réduisant le nombre de câbles nécessaires, ce qui réduirait la complexité et le temps d'assemblage. De plus, l'utilisation de l'impression par jets d'encre permettrait de réduire les coûts de production et d'améliorer l'efficacité globale du système.

Le futur des capteurs électroniques imprimés par jets d'encre est prometteur, car ils offrent des possibilités passionnantes dans de nombreux domaines. Cette technologie continue d'évoluer

en faisant des progrès constants en termes de performance, de précision et de compatibilité des matériaux. Dans les années à venir, il est possible de s'attendre à ce que les capteurs électroniques imprimés par jets d'encre jouent un rôle croissant dans des domaines, tels que la santé, l'environnement, la sécurité, l'énergie et l'Internet des objets (Dimitris Barmpakos & Kaltsas, 2021 ; Borghetti, Cantù, Sardini, & Serpelloni, 2020).

Dans le domaine de la santé humaine, les capteurs électroniques imprimés par jets d'encre pourraient être utilisés pour surveiller les signes vitaux, détecter les maladies et améliorer les soins médicaux. Ils pourraient être intégrés dans des vêtements intelligents, des pansements, des dispositifs d'administration de médicaments et, même, dans des implants médicaux, ce qui permettrait un suivi en temps réel et une personnalisation des traitements (D Barmpakos, Segkos, Tsamis, & Kaltsas, 2017 ; Petani et al., 2021).

En ce qui concerne l'environnement, les capteurs électroniques imprimés par jets d'encre pourraient être utilisés pour surveiller la qualité de l'air, de l'eau et du sol, ce qui aiderait ainsi à prévenir la pollution et à protéger les écosystèmes fragiles. Ils pourraient également être intégrés dans des dispositifs de surveillance de l'environnement, ce qui permettrait de fournir des données précieuses pour la recherche et la prise de décision (De Luca et al., 2016).

En ce qui concerne la sécurité, l'intégration de l'intelligence artificielle dans la création de capteurs ou de matrices de capteurs ouvre des perspectives fascinantes. Cette synergie entre la technologie des capteurs et l'intelligence artificielle permettrait de faciliter considérablement la détection des menaces, ce qui réduirait ainsi les risques pour la population et les infrastructures nationales. De plus, l'utilisation d'équipements de vision infrarouge plus abordables et compactes renforcerait la sécurité des opérations de nos soldats. Cela leur permettrait une capacité d'intervention encore plus sûre et efficace (Lall & Goyal, 2020).

Dans le secteur de l'énergie, les capteurs électroniques imprimés par jets d'encre pourraient jouer un rôle crucial dans l'optimisation de la production et de la gestion de l'énergie. Ils

pourraient être utilisés pour surveiller l'efficacité des panneaux solaires, des éoliennes et des batteries, ce qui permettrait une utilisation plus efficace des ressources énergétiques et une réduction des coûts (Brunetti et al., 2019).

Enfin, dans le domaine de l'Internet des objets, les capteurs électroniques imprimés par jets d'encre pourraient être intégrés dans une multitude d'appareils connectés, ce qui permettrait une collecte de données en temps réel et une communication transparente entre les objets et les systèmes. Cela ouvrirait la voie à des applications intelligentes et à une automatisation accrue dans des domaines, tels que la domotique, les transports intelligents et l'industrie 4.0 (Borghetti et al., 2020).

En somme, le futur des capteurs électroniques imprimés par jets d'encre est plein de promesses. Cette technologie offre des avantages, tels que la flexibilité de conception, la réduction des coûts de production et la possibilité d'intégration dans une variété de substrats. Avec des développements continus, ces capteurs électroniques imprimés par jets d'encre joueront un rôle essentiel dans la transformation de divers secteurs, ce qui fera en sorte d'améliorer la qualité de vie et de favoriser la durabilité des dispositifs imprimés et ouvrant la voie à de nouvelles avancées technologiques.

CHAPITRE 1

L'impression par jets d'encre

1.1 Mise en contexte

La fabrication de circuits et de capteurs électroniques joue un rôle essentiel dans le développement et dans la production des dispositifs électroniques et des technologies modernes. Dans ce chapitre, les méthodes de fabrication habituelles utilisées pour la production de circuits et de capteurs électroniques seront explorées en mettant, particulièrement, l'accent sur l'émergence de l'impression qui est une technique prometteuse. Également, les défis associés à cette évolution et les implications de cette évolution sur l'industrie seront abordés.

1.2 Méthodes de fabrication habituelles pour les circuits et les capteurs électroniques

La fabrication de cartes électroniques commence par la préparation du substrat. En général, le matériau stratifié, tel que le FR-4 (fibres de verre et résine époxy), est utilisé. Les étapes typiques de la fabrication incluent le découpage, le perçage des trous de fixation et la préparation de surfaces spécifiques pour la liaison des composants électroniques.

La sérigraphie est une méthode couramment utilisée pour déposer des couches de cuivre sur le substrat. Cela permet la formation des pistes conductrices qui relieront les différents composants. Cette technique utilise un pochoir, qui est appelé écran, à travers lequel l'encre de cuivre est poussée pour créer les motifs désirés. La sérigraphie permet d'obtenir des pistes conductrices précises et reproductibles.

Suite à la sérigraphie, une étape de gravure est réalisée pour éliminer l'excès de cuivre et ne laisser que les motifs conducteurs sur le substrat. La gravure peut être effectuée chimiquement

en utilisant des solutions corrosives ou mécaniquement en utilisant des fraises ou des lasers. Cette étape permet de créer des traces de cuivre bien définies et de garantir une isolation électrique entre les pistes.

Une fois les pistes conductrices formées, des masques de soudure sont généralement appliqués pour protéger certaines zones lors de l'application des composants électroniques. Les composants sont ensuite soudés sur les pistes conductrices à l'aide de techniques, telles que la soudure à la vague ou la soudure par ressuis.

Pour les circuits de petites tailles et pour la majorité des capteurs fabriqués actuellement, différentes méthodes de fabrications sont privilégiées.

La lithographie est la méthode de fabrication la plus répandue dans l'industrie électronique. Elle implique l'utilisation de masques photolithographiques pour transférer des motifs de conception sur une surface de silicium. Cette technique permet de réaliser des circuits intégrés de haute densité avec des caractéristiques miniaturisées. Cependant, elle est coûteuse et nécessite des installations spécialisées. La gravure chimique est utilisée pour éliminer sélectivement les matériaux indésirables d'un substrat de silicium. Elle permet la création de structures en relief, telles que des transistors et des interconnexions en ajustant les paramètres de gravure. Cependant, cette méthode présente des limites en termes de précision et de contrôle des dimensions. Le dépôt de couches minces est une technique utilisée pour créer des couches de matériaux spécifiques sur un substrat. Différentes techniques, telles que l'évaporation, la pulvérisation cathodique et le dépôt chimique en phase vapeur (CVD) sont utilisés pour déposer des matériaux tels que l'aluminium, le cuivre et les oxydes. Ces couches minces sont utilisées pour la création de contacts électriques, de barrières de diffusion et d'isolants (Zha & Du, 2003).

1.3 L'émergence de l'impression dans la fabrication de circuits et de capteurs électroniques

Au cours des dernières décennies, l'impression s'est révélée être une méthode de fabrication alternative prometteuse pour les circuits et les capteurs électroniques. L'impression offre plusieurs avantages potentiels. Notamment, une plus grande flexibilité de conception, des coûts réduits, une plus grande rapidité de production et une meilleure adaptabilité aux matériaux et aux substrats variés.

1.3.1 L'impression par jets d'encre

L'impression par jets d'encre est l'une des techniques d'impression les plus utilisées pour la fabrication de circuits et de capteurs électroniques. Elle permet de déposer précisément des matériaux conducteurs, semi-conducteurs ou isolants sur des substrats variés, tels que le papier, le plastique ou le verre. Cette méthode offre une grande souplesse et une facilité d'utilisation, ce qui en fait une option attrayante pour le prototypage rapide et la production à petite échelle (Yin et al., 2010).

1.3.2 L'impression par déposition directe

L'impression par déposition directe, également connue sous le nom d'impression additive, est une méthode émergente dans la fabrication de circuits et de capteurs électroniques. Cette technique consiste à déposer sélectivement des matériaux qui sont souvent sous forme de pâte afin de former diverses formes sur une variété de substrat. Un tel équipement peut ressembler à la Nova de la compagnie Voltera (Figure 1.1). Cette dernière permet une grande liberté de conception et elle offre la possibilité d'intégrer différentes fonctionnalités, telles que des pistes conductrices, des capteurs et des composants électroniques dans un seul processus d'impression (Aziz et al., 2019).

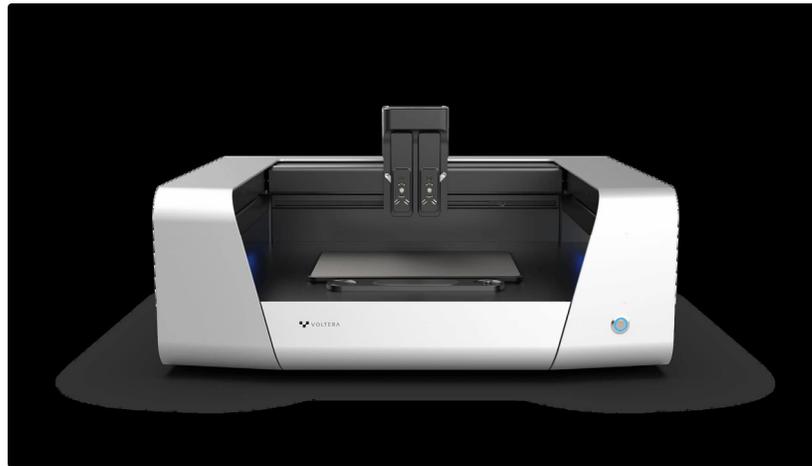


Figure 1.1 Voltera Nova

Tirée de <https://www.voltera.io/nova>

1.3.2.1 La lithographie

La lithographie est une technique de fabrication bien établie dans l'industrie électronique. Elle est largement utilisée pour la production de circuits intégrés. Cependant, des développements récents ont permis d'adapter la lithographie traditionnelle aux besoins de l'impression de circuits et de capteurs électroniques. Cette approche, appelée lithographie souple ou lithographie à grande échelle, utilise des masques souples ou des timbres flexibles pour imprimer des motifs sur des substrats (« Soft Lithography | Materials Research Institute », s.d.).

Outre l'impression par jets d'encre et l'impression par déposition, d'autres méthodes d'impression, telles que la lithographie souple et l'impression par transfert thermique ont également émergées dans le domaine de la fabrication de cartes électroniques. Ces techniques permettent des avancées au niveau de la précision, la résolution et la flexibilité de conception, ce qui ouvre la voie à de nouvelles possibilités de fabrication.

1.4 Les défis de l'impression dans la fabrication de cartes électroniques

Bien que l'impression présente de nombreux avantages, elle est également confrontée à des défis importants qui doivent être relevés pour une adoption généralisée dans l'industrie des cartes électroniques.

1.4.1 Précision et résolution

L'un des principaux défis de l'impression dans la fabrication de cartes électroniques réside dans l'atteinte d'une précision et d'une résolution élevées. Les dimensions des pistes conductrices, des contacts et des caractéristiques doivent être conformes aux spécifications requises pour garantir des performances fiables (Sowade, Polomoshnov, & Baumann, 2016). La résolution permet de fabriquer des détails plus fins alors que la précision permet de s'assurer que les détails fabriqués sont bien positionnés. Une bonne précision de la fabrication avec une mauvaise résolution donne des détails généralement flous alors qu'une mauvaise précision combinée avec une bonne résolution donnera des détails fins, mais mal positionnés ou déformés.

1.4.1.1 Matériaux et compatibilité

La sélection des matériaux d'impression est cruciale pour obtenir des performances optimales au niveau des cartes électroniques. Il est essentiel de choisir des encres ou des matériaux conducteurs appropriés qui présentent des propriétés électriques, mécaniques et chimiques adaptées à l'application spécifique. De plus, la compatibilité des substrats avec les processus d'impression doit être prise en compte pour assurer une adhérence et une intégrité structurelle optimales (Raut & Al-Shamery, 2018).

1.4.2 Optimisation des processus et caractérisation

L'optimisation des processus d'impression est un défi majeur pour garantir des résultats cohérents et reproductibles. Les paramètres d'impression, tels que la température, la vitesse d'impression, la pression et la densité d'encre, doivent être soigneusement contrôlés et ajustés pour obtenir des performances optimales. De plus, une caractérisation approfondie des cartes électroniques imprimées est nécessaire pour évaluer leur fonctionnalité, leur fiabilité et leur durabilité (Kortoçi et al., 2022).

1.4.3 Évolutivité et coûts

L'adoption de l'impression dans la fabrication de cartes électroniques doit également être accompagnée d'une amélioration de l'augmentation de la production et de la réduction des coûts. La capacité de passer de la fabrication de prototypes à la production à grande échelle est essentielle pour rendre l'impression compétitive par rapport aux méthodes de fabrication traditionnelles. Cela nécessite le développement de techniques d'impression plus rapides, l'amélioration de l'efficacité des processus et la réduction des coûts liés aux matériaux, à l'équipement et à la maintenance.

L'impression est en train de transformer le paysage de la fabrication de cartes électroniques en offrant de nouvelles possibilités en termes de flexibilité de conception, de personnalisation et de rapidité de production. Les méthodes d'impression, telles que l'impression par jets d'encre, l'impression par déposition et d'autres techniques émergentes offrent des avantages significatifs. Toutefois, elles nécessitent encore des efforts pour surmonter les défis liés à la précision, aux matériaux, à l'optimisation des processus et à l'augmentation de la production. Elles représentent tout de même une perspective très intéressante et plus respectueuse de l'environnement.

Au fur et à mesure que la technologie de l'impression poursuit son évolution et qu'elle s'améliore, il est prévu que son utilisation dans la fabrication de cartes électroniques se généralise, ce qui ouvrira la voie à de nouvelles applications et à des avancées dans le domaine de l'électronique. La recherche et le développement continus dans ce domaine sont essentiels pour relever les défis actuels et exploiter pleinement le potentiel de l'impression dans la fabrication de cartes électroniques (Haptic, 2021 ; Kortoçi et al., 2022 ; Subramanian et al., 2008).

1.5 La migration vers des méthodes de fabrications numériques

Dans un contexte où la technologie électronique évolue rapidement et où la demande de produits électroniques innovants augmente, les méthodes de fabrication de cartes électroniques doivent évoluer pour répondre aux défis et aux besoins du marché. L'impression par jets d'encre se présente comme une alternative prometteuse aux méthodes traditionnelles de fabrication de cartes électroniques en raison de plusieurs avantages clés.

1.5.1 Flexibilité de conception

L'impression par jets d'encre permet une grande flexibilité de conception, ce qui signifie que les cartes électroniques peuvent être réalisées avec des formes, des tailles et des structures variées. Contrairement aux méthodes traditionnelles qui nécessitent des processus complexes et coûteux pour produire des cartes personnalisées, l'impression par jets d'encre offre la possibilité de produire rapidement et efficacement des cartes électroniques sur mesure en fonction des exigences spécifiques des applications (Sowade et al., 2016).

1.5.2 Réduction des coûts

L'impression par jets d'encre présente un potentiel significatif pour réduire les coûts de fabrication des cartes électroniques. Les méthodes traditionnelles impliquent souvent l'utilisation de matériaux coûteux, des étapes de fabrication complexes et des équipements

spécialisés. En revanche, l'impression par jets d'encre utilise des encres conductrices et des substrats peu coûteux, ce qui réduit les coûts de matériaux. De plus, les procédés d'impression numérique permettent une automatisation accrue, ce qui réduit ainsi les coûts de main-d'œuvre et de production (Subramanian et al., 2008).

1.5.3 Rapidité de production

L'impression par jets d'encre offre des délais de production considérablement réduits par rapport aux méthodes traditionnelles. Les procédés d'impression numérique permettent une fabrication rapide et précise des cartes électroniques, ce qui réduit le temps nécessaire pour passer de la conception à la production. Cela permet aux fabricants de répondre plus rapidement aux demandes du marché et d'accélérer le processus de développement de produits (Perelaer, Klokkenburg, Hendriks, & Schubert, 2009).

1.5.4 Personnalisation et prototypage rapides

L'impression par jets d'encre permet également une personnalisation rapide des cartes électroniques en fonction des besoins spécifiques des clients. Cela facilite la production de prototypes et de petites séries, ce qui est essentiel pour tester et valider de nouvelles idées et de nouveaux concepts. L'impression par jets d'encre permet aux concepteurs et aux ingénieurs de réaliser rapidement des itérations et des ajustements, ce qui réduit ainsi les délais de développement des produits.

Cependant, il est important de reconnaître que l'impression par jets d'encre présente également des défis qui doivent être surmontés pour une utilisation plus généralisée. Certains de ces défis comprennent la nécessité de développer des encres conductrices de haute qualité, la précision et la résolution d'impression, ainsi que la scalabilité pour une production à grande échelle. Des efforts continus de recherche et de développement sont nécessaires pour améliorer ces aspects

et permettre une intégration plus large de l'impression par jets d'encre dans les méthodes de fabrication de cartes électroniques.

Les méthodes de fabrication de cartes électroniques devraient se tourner vers des procédés numériques, tels que l'impression par jets d'encre pour plusieurs raisons. Les avantages en termes de flexibilité de conception, de réduction des coûts, de rapidité de production, de personnalisation et de prototypage rapide font de l'impression par jets d'encre une solution attrayante pour les fabricants de cartes électroniques.

En adoptant des procédés d'impression numérique, les fabricants peuvent répondre plus efficacement aux demandes du marché en produisant rapidement des cartes électroniques sur mesure, ce qui réduit les délais de mise sur le marché et stimule l'innovation. De plus, la réduction des coûts de matériaux et de main-d'œuvre permet une production plus rentable, ce qui peut améliorer la compétitivité des fabricants sur le marché.

L'impression par jets d'encre offre également des possibilités de personnalisation et de prototypage rapides, ce qui est essentiel dans un environnement où les cycles de développement de produits sont de plus en plus courts. Les concepteurs et les ingénieurs peuvent itérer rapidement sur leurs conceptions, tester de nouvelles idées et valider les performances des cartes électroniques. Cela favorise l'innovation et permet aux fabricants d'apporter des améliorations constantes à leurs produits.

Cependant, malgré ses avantages, l'impression par jets d'encre présente encore des défis à relever. Par exemple, la qualité et la conductivité des encres doivent être améliorées pour assurer des performances électroniques fiables. De plus, la précision et la résolution d'impression doivent être optimisées pour garantir des connexions électriques précises et éviter les courts-circuits. Enfin, l'évolutivité de la technologie doit être abordée pour permettre une production à grande échelle (Trudeau, 2021).

Ces défis ne sont pas insurmontables, et des progrès significatifs ont déjà été réalisés dans le domaine de l'impression par jets d'encre pour la fabrication de cartes électroniques. La recherche et le développement continus permettront d'améliorer les encres, les équipements et les processus d'impression, ce qui ouvrira la voie à une adoption plus large de cette méthode.

1.6 Choix de la méthode d'impression

Le choix de la méthode d'impression est primordial dans le présent projet. Elle est dictée par les objectifs du projet. Dans ce cas-ci, l'objectif consiste en la fabrication d'un dispositif de mesure déposé directement sur un substrat d'aluminium anodisé. Cette méthode de fabrication devra permettre la production à haut volume tout en étant respectueuse de l'environnement, contrairement aux méthodes de fabrication traditionnelles utilisées dans l'industrie. Pour répondre à ces deux critères, deux options sont intéressantes dans le contexte actuel, soient l'impression par jets d'encre et la sérigraphie. L'impression par jets d'encre présente plusieurs avantages par rapport à l'impression par sérigraphie en ce qui concerne la fabrication de cartes électroniques. Voici quelques-uns des avantages de l'impression par jets d'encre par rapport à la sérigraphie :

1.6.1 Flexibilité de conception

L'impression par jets d'encre permet une plus grande flexibilité de conception par rapport à la sérigraphie. Avec l'impression par jets d'encre, il est possible d'imprimer des motifs complexes et des tracés fins avec une grande précision. Cela offre davantage de possibilités pour des conceptions personnalisées et permet la déposition de tracés détaillés sur les cartes électroniques.

1.6.2 Rapidité du prototypage

L'impression par jets d'encre permet un prototypage plus rapide par rapport à la sérigraphie. Les imprimantes à jets d'encre peuvent imprimer directement sur divers substrats, ce qui

permet de fabriquer rapidement des prototypes de cartes électroniques sans avoir besoin de fabriquer des écrans séparés, comme dans le cas de la sérigraphie. Cela réduit le temps et les coûts associés à la fabrication des prototypes.

1.6.3 Précision accrue

L'impression par jets d'encre offre une meilleure précision d'impression par rapport à la sérigraphie. Les imprimantes à jets d'encre peuvent atteindre une résolution plus élevée et permettent d'imprimer des tracés plus fins, ce qui est essentiel pour les cartes électroniques avec des composants de petite taille et qui contiennent des tracés complexes.

1.6.4 Réduction des déchets

L'impression par jets d'encre peut réduire la quantité de déchets générés lors du processus d'impression. Contrairement à la sérigraphie, qui nécessite la préparation d'écrans spécifiques pour chaque motif, l'impression par jets d'encre peut imprimer directement à partir d'un fichier numérique, ce qui élimine ainsi la nécessité de produire et de gérer des écrans physiques. Cela permet de réduire la quantité de matériaux utilisés et de déchets associés à la préparation et au nettoyage des écrans.

1.6.5 Moins de produits chimiques

La sérigraphie utilise souvent des encres à base de solvants et des produits chimiques pour nettoyer les écrans et les équipements. En revanche, l'impression par jets d'encre utilise des encres à base d'eau ou des encres UV, qui sont généralement plus respectueuses de l'environnement et qui ne nécessitent pas de solvants agressifs. Cela réduit l'empreinte chimique de l'ensemble du processus d'impression (Haptic, 2021)-

1.6.6 Économie d'énergie

L'impression par jets d'encre peut également être plus économe en énergie par rapport à la sérigraphie. Les imprimantes à jets d'encre modernes sont conçues pour être plus efficaces sur le plan énergétique, car elles ont des modes de veille automatiques et des technologies d'économie d'énergie intégrées. Par conséquent, l'impression par jets d'encre peut contribuer à réduire la consommation d'énergie globale du processus d'impression.

Cependant, il est important de noter que la sérigraphie a également ses propres avantages dans certains cas, notamment pour les grandes séries de production où elle peut offrir une efficacité et une durabilité supérieures. La durabilité environnementale dépend également de l'utilisation responsable des ressources, du recyclage approprié et de l'adoption de pratiques respectueuses de l'environnement dans l'ensemble de la chaîne de production. Il est essentiel de prendre en compte l'ensemble du cycle de vie du processus d'impression et de gérer correctement les déchets générés. Le choix entre l'impression par jets d'encre et la sérigraphie dépendra des besoins spécifiques du projet, de la quantité de production et des caractéristiques requises pour les cartes électroniques. Une décision fut prise afin d'orienter le projet vers une production facilement modifiable. En effet, le but futur de cette expérience est d'imprimer le même capteur de température, mais sur une grande variété de substrats avec diverses configurations.

Il existe plusieurs raisons pour lesquelles l'impression par jets d'encre est une option à privilégier pour la fabrication de circuits électroniques :

1.6.7 Coûts réduits

L'impression par jets d'encre offre des coûts réduits de fabrication par rapport aux méthodes conventionnelles. Elle élimine le besoin d'effectuer plusieurs étapes de production coûteuses, telles que la lithographie, la gravure et le dépôt de métaux. De plus, les matériaux utilisés lors

de l'impression par jets d'encre sont moins coûteux par rapport à ceux utilisés dans les procédés de fabrication traditionnels, ce qui contribue également à réduire les coûts globaux.

1.6.8 Rapidité de production

L'impression par jets d'encre permet une production rapide de circuits électroniques. Elle élimine les étapes complexes et chronophages associées aux méthodes traditionnelles, ce qui réduit ainsi le temps nécessaire pour fabriquer un circuit électronique fonctionnel. Les fabricants peuvent donc accélérer leur processus de production et répondre plus rapidement aux demandes du marché.

1.6.9 Évolutivité

L'impression par jets d'encre offre une grande évolutivité, ce qui signifie qu'elle peut être utilisée pour produire à la fois de petits volumes et de grandes quantités de circuits électroniques. Cette flexibilité de production permet aux fabricants de s'adapter aux besoins changeants du marché et de produire des circuits électroniques en fonction de la demande réelle, réduisant ainsi les coûts de stockage et les problèmes liés à la gestion des stocks.

1.7 L'impression par jets d'encre

Comprendre l'histoire du développement est essentiel pour observer le potentiel d'une technologie. L'impression par jets d'encre est une technologie qui a connu un développement remarquable au fil des décennies. De ses modestes débuts dans les années 1950 aux imprimantes haute résolution et polyvalentes d'aujourd'hui, cette méthode d'impression a révolutionné le monde de l'imprimerie et elle a permis des avancées significatives dans de nombreux domaines.

1.7.1 Les prémisses de l'idée

L'idée d'utiliser un jet d'encre pour l'impression remonte à plusieurs décennies. Dans les années 1950, les premières recherches sérieuses sur l'impression par jets d'encre ont commencé à émerger. Simon Friden, un ingénieur américain, a déposé un brevet en 1951 pour un dispositif d'impression utilisant des gouttelettes d'encre projetées à travers une buse. Ce dispositif était basé sur le principe de l'électrocinétique, où une charge électrique était appliquée aux gouttelettes d'encre pour les diriger vers la surface d'impression.

Les premiers dispositifs d'impression à jets d'encre étaient plutôt limités en termes de résolution et de vitesse d'impression. Cependant, ils ont établi les bases pour les développements futurs. L'une des premières avancées majeures est survenue dans les années 1960, lorsque des chercheurs du Massachusetts Institute of Technology (MIT) ont utilisé des impulsions électriques pour produire des gouttelettes d'encre à partir d'une buse. Cela a conduit à la création de la technologie dite de « soutien magnétique » (CROWLEY, 1963).

Le « soutien magnétique » utilisait des champs magnétiques pour contrôler les gouttelettes d'encre, leur permettant d'être précisément dirigées vers la surface d'impression. Cette méthode a ouvert la voie à une plus grande précision et à des vitesses d'impression améliorées par rapport aux techniques précédentes. Au fil du temps, d'autres chercheurs et ingénieurs ont apporté des améliorations à la technologie de l'impression par jets d'encre. De nouvelles méthodes de formation de gouttelettes ont été développées, notamment l'utilisation de vibrations piézoélectriques, de l'échauffement thermique et de la pression mécanique. Ces avancées ont permis d'améliorer la résolution, la vitesse d'impression et la qualité des résultats.

Il est important de noter que l'impression par jets d'encre a nécessité des efforts continus de la part de nombreux acteurs de la recherche et du développement au fil des décennies. Les contributions de nombreux scientifiques, ingénieurs et chercheurs ont finalement conduit à la création des premières imprimantes commerciales à jets d'encre dans les années 1970.

Ainsi, l'idée d'utiliser un jet d'encre pour l'impression a évolué au fil du temps grâce aux contributions de nombreux pionniers et chercheurs. Ces efforts ont abouti à la technologie d'impression par jets d'encre que nous connaissons aujourd'hui et qui a révolutionné l'industrie de l'impression avec sa polyvalence, sa qualité et sa capacité à répondre aux besoins d'une variété d'applications.

1.7.2 Innovation de l'impression

L'innovation dans l'impression graphique par jets d'encre est essentielle, car elle améliore la qualité d'impression, elle augmente la productivité et elle réduit les coûts. De plus, l'innovation a contribué et contribue toujours à une approche plus durable en réduisant l'empreinte environnementale de cette technologie.

De bons exemples sont présentés dans un article qui expose les innovations de la 3^e génération de tête thermique HP (Aden et al., 1994). En effet, l'article décrit une tête d'impression à jets d'encre thermique de troisième génération développée par Hewlett-Packard en 1994. L'objectif principal était d'améliorer la qualité d'impression, la vitesse d'impression et le coût par page imprimée.

Une innovation majeure de cette tête d'impression était l'intégration monolithique des transistors de commande avec les résistances chauffantes des jets d'encre thermiques. Cela a permis d'améliorer considérablement les performances tout en réduisant les coûts par page pour le client.

La tête d'impression, nouvellement conçue pour l'imprimante HP DeskJet 1200C, présentait une augmentation significative de la largeur d'impression, ce qui permettait d'augmenter la vitesse d'impression. Cela était rendu possible en augmentant le nombre de buses de la tête d'impression et, en conséquence, le nombre de résistances chauffantes. Alors que les anciennes

têtes d'impression DeskJet avaient 50 buses et 50 résistances chauffantes, la nouvelle tête d'impression en comptait 104 pour chaque élément. Cependant, doubler le nombre de connexions entre la tête d'impression et l'imprimante aurait compromis la fiabilité et augmenté la taille de la puce en silicium.

Pour résoudre ce problème, les transistors de commande ont été intégrés sur la même puce en silicium que les résistances chauffantes. Cette combinaison a été appelée « tête d'impression à commande intégrée ». L'intégration a réduit le nombre de connexions requises et la taille de la puce en silicium, ce qui a permis de réduire le coût par tête d'impression tout en maintenant une largeur d'impression accrue.

D'autres améliorations ont été apportées à la géométrie de la chambre de tir et aux propriétés de l'encre pour augmenter la fréquence de fonctionnement (nombre de gouttes d'encre tirées par seconde).

L'article mentionne également les défis techniques auxquels ils ont été confrontés, tels que la contamination ionique de l'encre, les contraintes mécaniques dues au cycle thermique et à la cavitation, les courants et les tensions élevés nécessaires pour l'éjection des gouttes d'encre ainsi que la protection contre les décharges électrostatiques.

Un autre article explique les optimisations possibles, non par la conception physique de la tête d'impression, mais bien par son contrôle (Khalate, Bombois, Babuška, Wijshoff, & Waarsing, 2011). Cet article présente une méthode de conception d'une impulsion de commande pour un système d'impression à jets d'encre à l'aide d'un contrôle prédictif basé sur l'optimisation. Le système d'impression à jets d'encre est modélisé à l'aide d'un modèle étroit à jeu qui décrit la dynamique du canal d'encre. Le modèle est identifié à partir de la réponse en fréquence du système. Le contrôle en boucle fermée n'est pas possible en raison des limitations du système d'actionnement. Par conséquent, un contrôle prédictif basé sur l'optimisation est utilisé pour calculer l'impulsion de commande optimale. L'objectif est de générer une impulsion en forme

de trapèze qui permet de projeter les gouttes d'encre à une vitesse souhaitée tout en atténuant les oscillations résiduelles. Un modèle prédictif est utilisé pour minimiser l'erreur de suivi entre la vitesse du ménisque souhaitée et la vitesse réelle. L'optimisation est réalisée en utilisant une fonction « objectif » qui pondère les erreurs quadratiques. L'impulsion de commande optimale est obtenue en résolvant un problème d'optimisation non linéaire contraint. Les résultats expérimentaux montrent que la méthode proposée permet de générer des impulsions de commande optimales qui réduisent les oscillations résiduelles et qui permettent des fréquences de projection plus élevées. La partie du haut de la Figure 1.2 montre l'impulsion standard puis celle optimisée. Elle montre aussi la pulsation en forme de trapèze qui est utilisée pour amortir la pulsation de l'encre dans la buse dans la partie du bas.

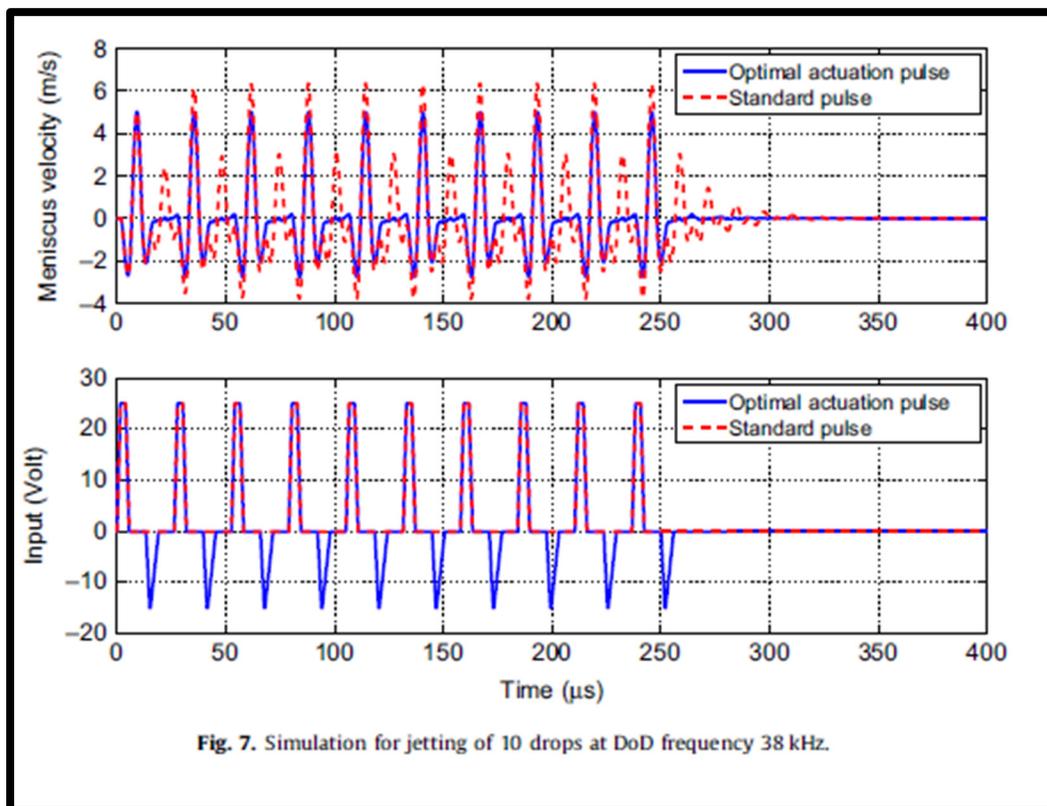


Figure 1.2 Simulation de la formation de 10 gouttelettes d'encre à 38 kHz
Tiré de Khalate (2011, p.7)

1.7.3 Principe de fonctionnement des têtes d'impression à jets d'encre

Il existe deux principaux types de buses dans l'industrie de la reprographie, soient la piézoélectrique et la thermique. La méthode de contrôle utilisée par la Céradrop est la piézoélectrique, telle que l'illustre la Figure 1.3. La céradrop est une imprimante permettant l'utilisation de cartouche Fujifilm Dimatix et permet sont contrôle absolu. C'est l'équipement de déposition utilisé dans le présent travail et sera mieux détaillé dans le chapitre 3 à la page 63. Une impulsion électrique de voltage et de durée contrôlée permet la contraction ou la dilatation d'un diaphragme à l'intérieur de chaque buse. Cela signifie qu'une membrane jointe à un élément piézoélectrique permet de créer un changement de volume dans un espace restreint (Shah, Lee, Lee, & Hur, 2021).

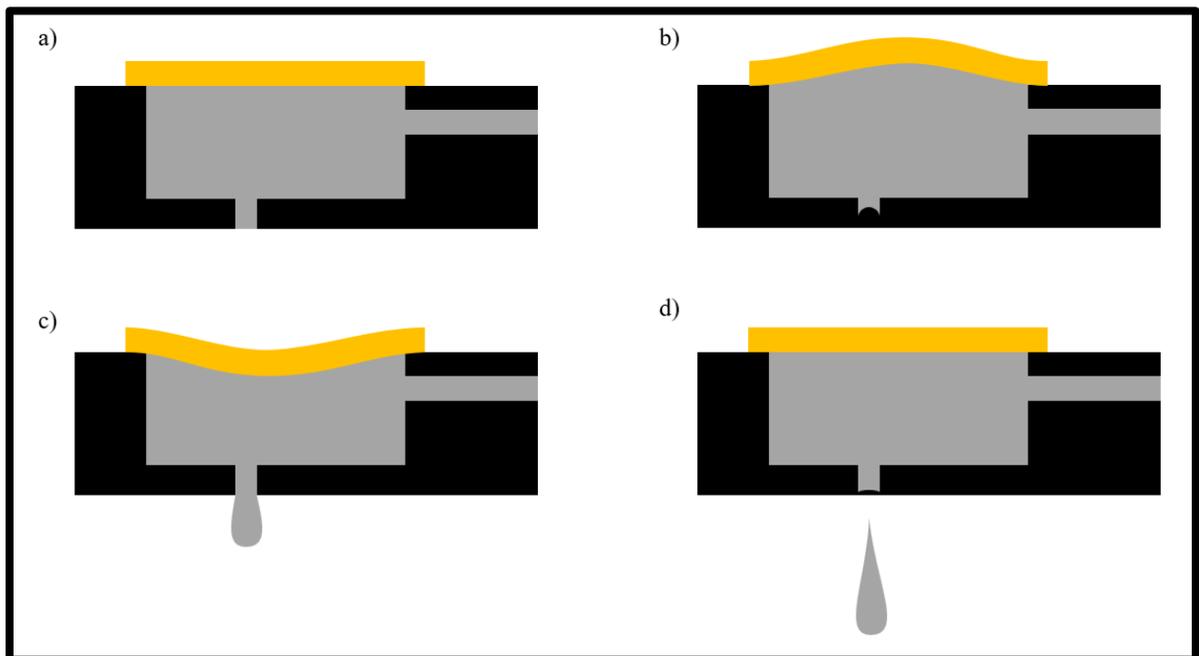


Figure 1.3 Représentation d'une buse piézoélectrique lors de l'éjection d'une gouttelette a) au repos, b) lorsqu'un voltage positif est appliqué à l'élément piézoélectrique, c) lorsqu'un voltage négatif est appliqué et d) lorsque la gouttelette est expulsée et que la tête retourne au repos

La Figure 1.4 montre le fonctionnement du type de buse thermique. Un élément chauffant évapore le solvant contenu dans l'encre. Une partie du solvant se vaporise et devient un gaz. Ce gaz crée une pression permettant l'expulsion d'une gouttelette. La buse refroidit et son réservoir se remplit pour recommencer le cycle par la suite (Shah et al., 2021).

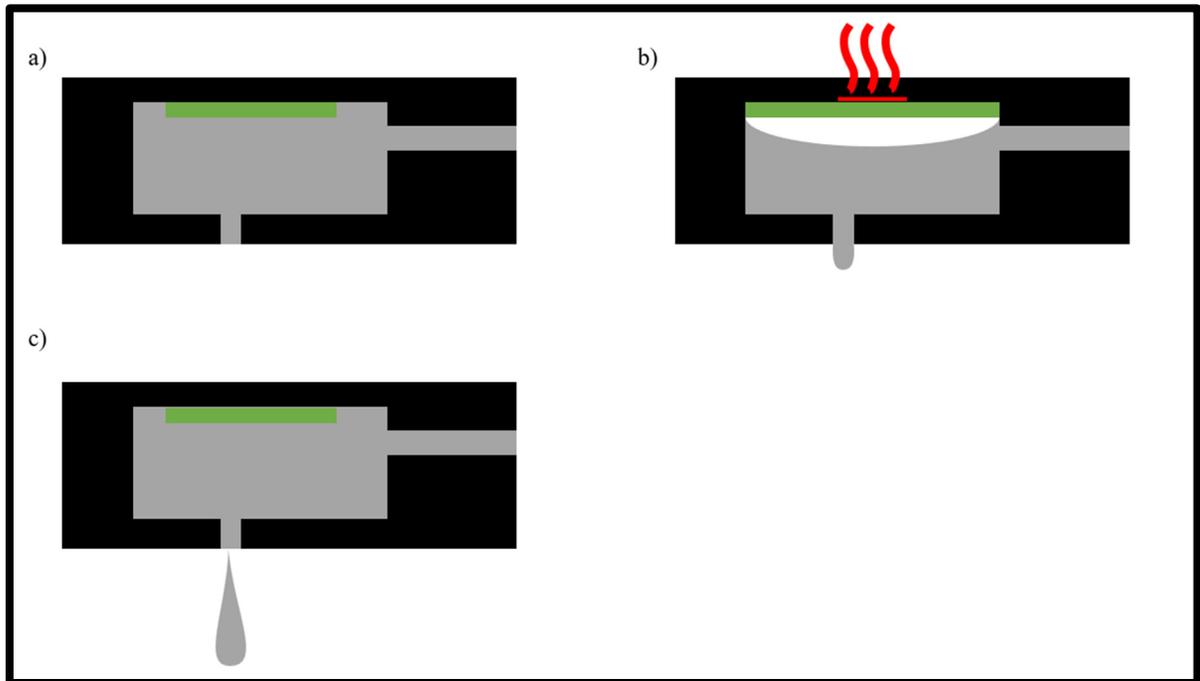


Figure 1.4 Représentation d'une buse thermique lors de l'éjection d'une gouttelette a) au repos, b) lorsque l'élément évapore le solvant, c) lorsque la température redescend et que la gouttelette est éjectée

1.7.4 Les débuts commerciaux

Dans les années 1970, des sociétés ont commencé à se concentrer sur le développement d'imprimantes à jets d'encre destinées au grand public. En 1976, l'imprimante à jets d'encre fut inventée, mais c'est en 1984 qu'elle a été accessible au grand public. Cette imprimante était la HP ThinkJet. La « ThinkJet » a marqué un tournant dans l'histoire de l'impression par jets d'encre en rendant cette technologie plus accessible et en ouvrant la voie à son adoption massive (« HP ThinkJet, 1984 », s.d.).

1.7.5 L'amélioration de la technologie

L'impression par jets d'encre a connu une évolution technologique continue au fil des décennies, ce qui a permis des améliorations significatives en termes de qualité et de vitesse. Voici quelques-unes des avancées clés dans le domaine de l'impression par jets d'encre.

L'une des principales améliorations de l'impression par jets d'encre a été l'augmentation de la résolution d'impression. Les premières imprimantes à jets d'encre offraient des résolutions relativement modestes, mais au fil du temps, les fabricants ont développé des technologies permettant d'atteindre des résolutions plus élevées. Aujourd'hui, il est courant de trouver des imprimantes à jets d'encre offrant des résolutions allant jusqu'à 4800 dpi (points par pouce) ou plus, ce qui permet d'obtenir des détails plus fins et des résultats d'impression plus précis (Rainville, 2008).

Les premières imprimantes à jets d'encre étaient relativement lentes par rapport aux méthodes d'impression traditionnelles, telles que l'impression laser. Cependant, au fil des améliorations technologiques, les vitesses d'impression ont considérablement augmenté. Les têtes d'impression plus avancées, les systèmes d'alimentation du papier améliorés et les processus d'encre optimisés ont permis de réduire le temps nécessaire pour imprimer une page. Aujourd'hui, les imprimantes à jets d'encre peuvent imprimer des documents à une vitesse comparable, voire supérieure, à celle des imprimantes laser.

L'évolution de l'impression par jets d'encre a également été marquée par l'introduction de nouvelles encres et de nouvelles couleurs. Les encres à base de colorants étaient couramment utilisées au début, ce qui offrait une large gamme de couleurs vives. Cependant, elles avaient tendance à se décolorer au fil du temps. Les encres pigmentées ont été développées pour offrir une meilleure résistance à la décoloration, ce qui a permis d'améliorer la durabilité des impressions à jets d'encre. De plus, certaines imprimantes à jets d'encre ont introduit des encres

spéciales, telles que les encres à base d'eau, les encres à base de solvants et les encres UV, ce qui élargit ainsi les possibilités d'impression sur différents types de supports.

1.7.6 Évolution de la technologie de têtes d'impression

Des chercheurs ont réussi à imprimer des encres spécifiques à la fabrication d'écran à points quantiques « QD, Quantum Dots » (Yoshida, Nakatani, Usui, Wakabayashi, & Ohtsuka, 2023). Dans leur article, les auteurs élaborent sur le développement d'une tête d'impression à jets d'encre spécialisée et d'un équipement servant à l'impression haute résolution à partir d'encres dispersées en QD. Pour obtenir un processus robuste, ils ont proposé une conception de tête d'impression à jets d'encre compatibles avec une viscosité d'encre plus élevée et avec un système de circulation d'encre pour éviter l'agrégation des particules.

Les résultats incluent une variation de gouttelettes de $0,8 \text{ pL} \pm 1,8\%$ sur toutes les buses, avec une précision de trois sigmas de $1,0 \text{ }\mu\text{m}$ en ce qui concerne la position d'atterrissage des gouttelettes. En combinant une encre optimisée, une tête d'impression à jets d'encre et une technologie d'équipement, ils ont réussi à fabriquer des panneaux d'affichage micro-LED de type convertisseur de couleur.

Ce travail représente une avancée importante dans le domaine de l'impression à jets d'encre haute résolution pour les écrans micro-LED. Les résultats obtenus montrent que cette technologie peut être utilisée pour produire des écrans de haute qualité avec une grande précision et une grande stabilité. Cela ouvre la voie à des applications potentielles dans les domaines de l'électronique grand public et de l'affichage.

Un autre article traite de la technologie de tête d'impression à jets d'encre thermique (TIJ) et présente une nouvelle approche de conception et de fabrication d'une tête d'impression à jets d'encre TIJ à haute densité. L'article souligne l'importance de la tête d'impression à jets d'encre

dans la qualité d'impression, la vitesse d'impression et les coûts d'entretien des imprimantes à jets d'encre (Liou & Tseng, 2011).

La technologie TIJ présente plusieurs avantages par rapport à d'autres technologies d'impression, tels que le coût réduit, la haute résolution, le faible bruit, la facilité d'impression en couleur et la portabilité. Pour fabriquer une tête d'impression à jets d'encre TIJ à faibles coûts et à haute performance, il est essentiel de l'intégrer sur un substrat en silicium (Branbjerg, Eijkel, Gardeniers, & van de Pol, 1991 ; Chen & Wise, 1997 ; Kamisuki et al., 1998 ; Laerme, Schilp, Funk, & Offenber, 1999).

L'article propose une conception tridimensionnelle (3D) de la tête d'impression à jets d'encre TIJ pour réduire le nombre de points d'accès aux données et les lignes de balayage. Cette nouvelle conception permet de réduire le temps de balayage de 33 % et d'augmenter la vitesse de balayage par trois lorsque le nombre de buses dépasse 1000. Comparé aux conceptions unidimensionnelles (1D) et bidimensionnelles (2D), le schéma de conception 3D offre des performances supérieures en termes de réduction des broches et d'optimisation de la forme et de l'amplitude du signal de commande.

L'article présente également le processus de fabrication de la tête d'impression à jets d'encre TIJ en mettant l'accent sur le circuit CMOS avant et la structure MEMS postérieure. Le processus de fabrication utilise une combinaison de processus CMOS pour intégrer les fonctionnalités MEMS et pour simplifier le processus CMOS grâce à des exigences de performance réduites.

1.8 Les difficultés de l'impression par jets d'encre

L'impression par jets d'encre est limitée à des encres ayant des propriétés spécifiques, telles que leur viscosité et leur tension de surface. Ces propriétés peuvent influencer la fréquence d'impression maximale ainsi que la précision de la déposition de l'encre. Un compromis doit

souvent être fait entre la vitesse d'impression et la précision de déposition. Les optimisations présentées permettent l'obtention d'une certaine qualité et d'une précision d'impression convenables tout en gardant une vitesse d'impression adéquate.

La précision et l'adhésion sont aussi influencées par la mouillabilité de la surface, c'est-à-dire, l'habileté d'un liquide à s'étaler sur la surface. Certaines combinaisons de substrats et d'encres ne permettent pas à l'encre de rester en place après la déposition, ce qui affecte grandement la résolution. Le phénomène inverse existe là où la mouillabilité entre l'encre et le substrat est trop importante. De ce fait, la résolution maximale diminue étant donné une taille de point trop grande. Une encre qui s'étend trop ne permet pas la création de détails fins.

L'adhésion à la surface est également une variable à considérer. Étant composés de deux matériaux différents, le substrat et la trace conductrice n'ont pas le même module d'élasticité et donc, lorsqu'il y a déformation, des contraintes de cisaillement font en sorte que la trace se soulève du substrat, ce qui rend le tout non fonctionnel. Bien que l'épaisseur soit faible, les efforts tranchants causés par un changement de température ne sont pas négligeables (Krainer, Smit, & Hirn, 2019).

Parmi toutes les méthodes d'impression existantes, l'impression par jets d'encre est la méthode la plus versatile. Elle permet la fabrication de circuits et de composants électroniques précis tout en ayant la liberté de modifier le motif sans délai ou sans coût supplémentaire. L'impression par jets d'encre se concentre principalement sur l'impression de résine et d'autres encres de couleur. Une encre contenant des particules pose certaines contraintes. Heureusement, certains travaux ont déjà été effectués sur le sujet.

CHAPITRE 2

Revue de littérature

Ce chapitre explore l'état de l'art en ce qui a trait à la fabrication de dispositif par jet d'encre tel que des détecteurs de température, mais aussi d'autres types de dispositif plus complexe comme un transistor par exemple. La littérature déborde d'exemple d'utilisation de la technologie d'impression par jets d'encre pour toute sorte d'applications. On y parle des différentes façons de produire une gouttelette selon le type de buse utilisé comme présenté plus tôt dans le chapitre 1.7. On y voit aussi la possibilité d'utiliser plusieurs matériaux pour former des dispositifs plus complexes. Ce chapitre montre ce qu'il est actuellement possible de faire avec la technologie d'impression par jets d'encre actuels. L'importance du frittage des particules métalliques est aussi discutée. Finalement la formation de gouttelettes et les équations qui permettent de mieux comprendre le comportement de l'encre en variant certains paramètres sont expliquées.

2.1 Impression par jets d'encre

L'impression par jets d'encre est une technologie bien établie qui est largement utilisée dans des domaines, tels que la photographie, l'emballage et le textile. Elle fonctionne en déposant des gouttelettes d'encre contenant des pigments de différentes couleurs afin de former une image. Deux méthodes principales sont utilisées pour l'éjection de l'encre : les têtes piézoélectriques et les têtes thermiques. Les têtes piézoélectriques utilisent la déformation d'une membrane pour créer un changement de pression et générer l'écoulement de l'encre, ce qui forme ainsi les gouttelettes, comme le représente à la Figure 1.4. (*TheIJC 2019: Inkjet printhead design: Approaches to modelling the complexity*, 2020) Les têtes thermiques, quant à elles, utilisent le changement de phase du solvant de l'encre en passant de liquide à gazeuse,

pour provoquer le déplacement d'une valve et l'expulsion des gouttelettes (*How inkjet printer work*, 2017).

Le livre « Inkjet-Based Micromanufacturing » (Brand, Fedder, Hierold, Korvink, & Tabata, 2012) est une ressource complète qui explore les possibilités et les avancées de la micro-fabrication basée sur l'impression par jets d'encre. Avec un contenu approfondi et bien documenté, l'auteur met en lumière les multiples applications de cette technologie prometteuse et examine les techniques, les matériaux et les défis associés à la fabrication à l'échelle micro.

Le livre commence par une introduction détaillée sur les principes fondamentaux de l'impression par jets d'encre. Plus précisément, il explique les raisons pour lesquelles cette technologie diffère des autres méthodes de fabrication traditionnelles. Il met aussi en évidence les avantages de l'impression par jets d'encre en termes de flexibilité, de précision et de possibilité de fabrication à grande échelle. L'auteur du livre explore les différentes applications de la micro-fabrication qui sont basées sur l'impression par jets d'encre. Il examine en détail les domaines de la microélectronique, de la micro-optique, de la micro-fluidique et de la bio-impression. Des exemples concrets et des études de cas illustrent les façons dont l'impression par jets d'encre peut être utilisée pour fabriquer des composants électroniques miniatures, des lentilles micro-optiques, des dispositifs micro-fluidiques et des tissus biologiques.

Une grande partie du livre est consacrée aux techniques d'impression par jets d'encre spécifiques utilisées en micro-fabrication. L'auteur décrit les différents types de têtes d'impression, les encres spéciales utilisées et les paramètres clés à prendre en compte pour obtenir des résultats optimaux. Il met également en évidence les avancées récentes dans le domaine, telles que l'impression par jets d'encre à plusieurs matériaux et l'impression par jets d'encre 3D qui ouvrent de nouvelles possibilités en matière de fabrication à l'échelle micro.

L'auteur ne se limite pas seulement aux aspects techniques, mais il aborde également les considérations pratiques liées à la micro-fabrication qui est basée sur l'impression par jets

d'encre. Il discute des coûts, de l'évolutivité, de la reproductibilité et des défis spécifiques liés à la fabrication à l'échelle micro. Des stratégies d'optimisation et des recommandations pratiques sont fournies pour aider les chercheurs et les fabricants à mettre en œuvre avec succès cette technologie.

Enfin, le livre se termine par un regard vers l'avenir de la micro-fabrication basée sur l'impression par jets d'encre. L'auteur discute des développements émergents, tels que l'impression par jets d'encre à haute résolution, l'utilisation de matériaux avancés et l'intégration de l'intelligence artificielle pour améliorer encore les capacités de fabrication à l'échelle micro.

Un article intitulé « A New Switching Device for Printed Electronics: Inkjet-Printed Microelectromechanical Relay » présente une nouvelle avancée dans le domaine de l'électronique imprimée, soit le relais micro-électromécanique imprimé par jets d'encre (E. S. Park, Chen, Liu, & Subramanian, 2013). Les auteurs de cet article proposent une méthode novatrice pour fabriquer des relais imprimables utilisant des techniques d'impression par jets d'encre. Ces relais micro-électromécaniques offrent une alternative prometteuse aux relais traditionnels dans les applications d'électronique imprimée.

Les chercheurs décrivent en détail le processus de fabrication du relais qui implique l'utilisation d'une encre conductrice déposée à l'aide d'une imprimante à jets d'encre spéciale. Ils expliquent la façon dont les couches d'encre sont déposées séquentiellement pour créer les différentes parties du relais, y compris les contacts, les bobines et les structures mécaniques (voir la Figure 2.1).

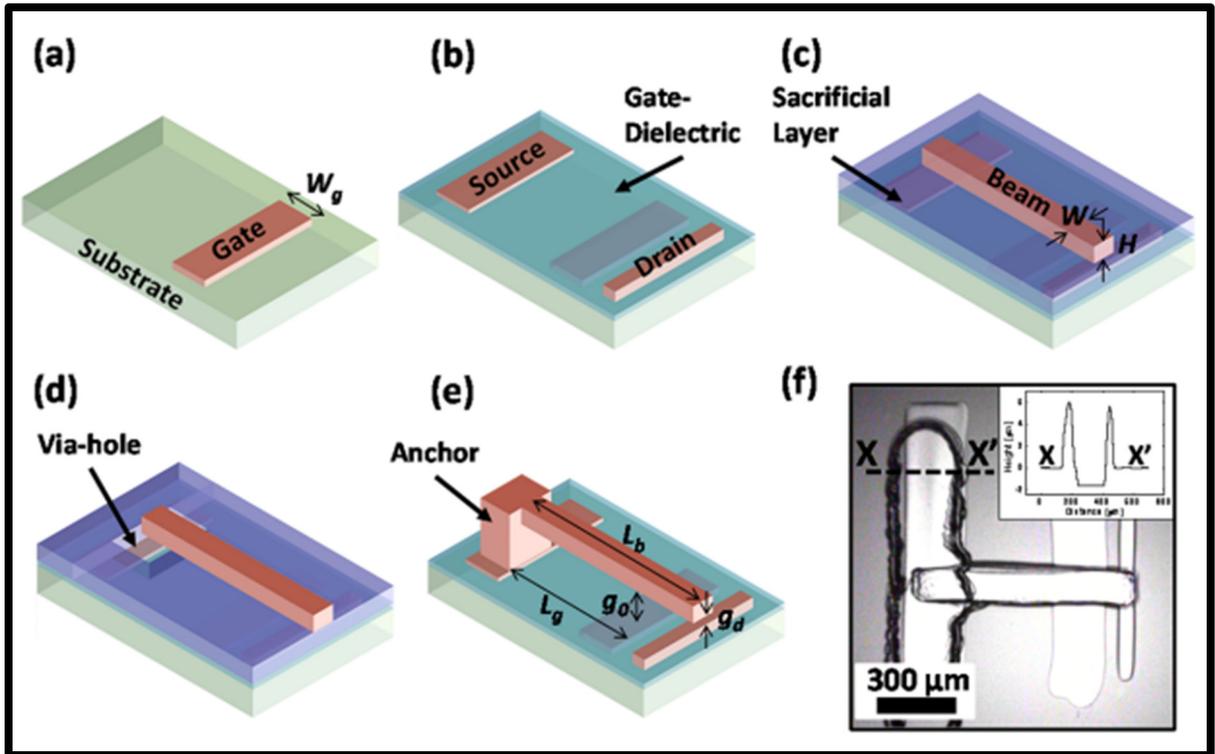


Figure 2.1 Méthode de fabrication successive d'un relais imprimé par jets d'encre.
Tiré de Park et al., (2013, p. 2)

L'article met en évidence les avantages du relais micro-électromécanique imprimé par jets d'encre. Notamment, sa fabrication simple et peu coûteuse, sa flexibilité et sa compatibilité avec les procédés d'impression de masse. Les auteurs soulignent également les performances électriques du relais, telles que sa faible résistance de contact (environ 7Ω) et sa capacité à commuter des courants élevés.

Les chercheurs présentent ensuite les résultats expérimentaux qui démontrent la fonctionnalité et la fiabilité du relais imprimé. Ils discutent des caractéristiques de commutation, de la durabilité et des performances thermiques du dispositif. De plus, ils abordent les perspectives d'optimisation et d'extension de cette technologie, notamment en termes de conception de relais plus complexes et de compatibilité avec d'autres composants électroniques imprimés.

Un autre article pertinent qui concerne sur la fabrication de composant électronique par jets d'encre s'intitule « Inkjet Printing of High Performance Transistors with Micron Order Chemically Set Gaps » (Grubb, Subbaraman, Park, Akinwande, & Chen, 2017). Cet article présente une méthode novatrice pour imprimer des transistors à haute performance en utilisant l'impression par jets d'encre et des espacements chimiquement définis à l'échelle du micron. Les auteurs de l'article décrivent en détail le processus de fabrication de ces transistors qui implique l'utilisation d'une encre conductrice et d'une technique spéciale pour créer des espacements précis entre les électrodes. La Figure 2.2 montre le produit final et une vue de coupe du transistor fabriqué.

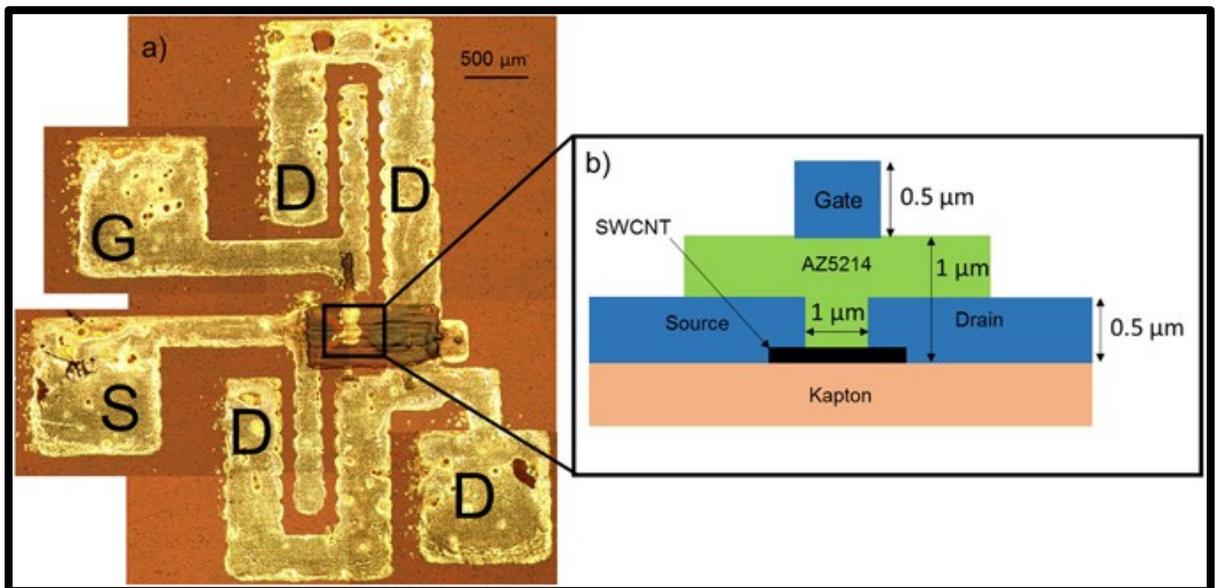


Figure 2.2 Image composée du transistor fabriqué a) et une représentation en vue de coupe des différentes couches

Tiré de Grubb, Subbaraman, Park, Akinwande, & Chen, (2017, p. 2)

Les chercheurs expliquent la manière dont ils ont optimisé les paramètres d'impression, tels que la viscosité de l'encre, la vitesse d'impression et la taille des buses pour obtenir des transistors de haute qualité avec des performances électriques améliorées. Ils mettent en

évidence la précision et la reproductibilité de la méthode d'impression par jets d'encre, permettant de créer des espacements uniformes et contrôlés entre les électrodes du transistor.

La Figure 2.2 tirée de l'article, montre l'impression en a) et le schéma en vue de coupe en b). Il est donc possible de visualiser la composante 3D du capteur et de mieux comprendre son fonctionnement.

L'article présente également les résultats expérimentaux démontrant les performances des transistors imprimés. Les chercheurs discutent des caractéristiques électriques, telles que la mobilité des porteurs et l'efficacité de commutation qui sont comparables, voire supérieures à celles des transistors conventionnels fabriqués par des techniques de lithographie traditionnelles. Ils soulignent également la stabilité à long terme des dispositifs imprimés, ce qui démontre leur potentiel pour des applications pratiques.

Un livre intitulé « Inkjet-Printed Sensors on Flexible Substrates » explore en détail l'utilisation de l'impression par jets d'encre pour la fabrication de capteurs sur des substrats flexibles. L'auteur présente une vue d'ensemble complète des avancées récentes et des recherches en cours dans ce domaine qui est en constante évolution.

Le livre commence par une introduction approfondie des principes fondamentaux de l'impression par jets d'encre et des techniques d'impression associées. Il explique la manière dont cette technologie permet la fabrication de capteurs en utilisant des encres conductrices, semi-conductrices ou réactives spécifiques aux applications sensorielles. Il explore les encres métalliques comme l'argent, le cuivre et l'aluminium. Parmi celles-ci, l'encre d'argent semble être la mieux adaptée aux besoins des capteurs imprimés. Les encres polymériques conductrices et celles à base de carbone sont aussi mentionnées. Il parle de l'application de nanotubes de carbones pour la fabrication de capteur de pH. L'auteur explore ensuite les différents autres types de capteurs qui peuvent être fabriqués par l'impression à jets d'encre, tels que les capteurs de pression, de température, d'humidité, de gaz, de force, de débit, de

lumière et biomédicaux. L'auteur détaille les principes de fonctionnement de chaque type de capteur ainsi que les matériaux et les procédés d'impression spécifiques utilisés pour les réaliser.

Le livre couvre également les aspects liés à la flexibilité des substrats en mettant en évidence les avantages et les défis de l'utilisation de substrats flexibles pour les capteurs imprimés. L'auteur aborde les différentes techniques de préparation et de modification des substrats flexibles pour améliorer les performances des capteurs et assurer leur durabilité dans des environnements variés. Ces techniques comprennent le nettoyage des substrats pour éliminer les contaminants, la préparation de revêtements d'ancrage pour favoriser l'adhérence de l'encre, et l'utilisation de traitements de surface, tels que le plasma, la gravure chimique ou l'irradiation UV pour modifier les propriétés de surface du substrat.

Un chapitre est consacré à l'évaluation et à la caractérisation des capteurs imprimés dans lequel, l'auteur présente les méthodes de tests et d'analyses utilisées pour évaluer la sensibilité, la sélectivité, la linéarité et la stabilité des capteurs. Il met en évidence les défis et les stratégies pour améliorer les performances et la fiabilité des capteurs imprimés. Le chapitre présente différentes méthodes de mesure utilisées pour évaluer les performances des capteurs. Cela peut inclure des techniques, telles que la spectroscopie, la microscopie, l'analyse électrique et la mesure de la réponse en fréquence. Les capteurs imprimés sont aussi évalués en fonction de leurs caractéristiques électriques, telles que la résistance, la capacité, l'impédance et la conductivité. Ces paramètres électriques sont importants pour évaluer la sensibilité, la linéarité, la stabilité et la réponse du capteur. La sensibilité d'un capteur imprimé est évaluée en mesurant sa réponse aux changements de l'entrant ou de la grandeur mesurée. La limite de détection, qui représente la plus petite quantité détectable, est également déterminée. La sélectivité d'un capteur se réfère à sa capacité à réagir spécifiquement à l'entrant cible sans être influencé par d'autres composants présents dans l'échantillon. Ce chapitre discute des méthodes permettant de tester la sélectivité des capteurs imprimés.

Enfin, le livre aborde les applications potentielles des capteurs imprimés sur des substrats flexibles dans divers domaines, tels que la santé, l'environnement, les technologies portables et l'électronique souple. L'auteur discute des avantages de ces capteurs, tels que leur faible coût, leur facilité de fabrication de masse et leur intégration avec d'autres dispositifs électroniques.

Dans l'article intitulé « Fully inkjet-printed two-dimensional material field-effect heterojunctions for wearable and textile electronics », les chercheurs ont réussi à fabriquer et à caractériser des jonctions hétérojonctions à effet de champ entièrement imprimées par jets d'encre à partir de matériaux bidimensionnels, tels que le graphène (couche mince de graphite) et le disulfure de molybdène (MoS₂) (Carey et al., 2017).

Les dispositifs imprimés par jets d'encre ont montré des performances électriques prometteuses. Les transistors à base de graphène ont présenté une mobilité des porteurs de charge atteignant jusqu'à 2000 cm²/Vs, ce qui indique une bonne conductivité. Les transistors à base de MoS₂) ont également montré des performances élevées avec une mobilité allant jusqu'à 150 cm²/Vs. Ces valeurs de mobilité élevées sont essentielles pour assurer un bon fonctionnement des dispositifs électroniques.

De plus, les transistors imprimés par jets d'encre ont montré une faible tension de seuil, ce qui signifie qu'ils peuvent être facilement activés et désactivés. Cela permet un contrôle précis du courant électrique dans les dispositifs.

En ce qui concerne la flexibilité et la durabilité des dispositifs, les transistors imprimés sur des substrats flexibles, tels que des textiles, ont conservé leurs performances électriques même après plus de 1000 cycles de flexion. Cela démontre la résistance des dispositifs imprimés par jets d'encre aux contraintes mécaniques et leur aptitude à être intégrés dans des applications portables et textiles.

2.2 Fabrication de capteurs de température de façon additive

L'industrie de l'électronique par fabrication additive se concentre présentement sur la fabrication de circuits sur substrats flexibles. Beaucoup de recherches ont été effectuées sur la fabrication et l'intégration de capteurs sur substrats de polymère flexible. La sérigraphie est une technique utilisée, depuis plusieurs années, et elle est souvent la méthode de choix pour ce genre d'application. Le jet d'encre fait son apparition graduellement comme étant une alternative viable pour les besoins de dépositions de plus petits volumes étant donné son coût de préparation et d'outillage moindre.

D'autres types de capteurs imprimés sont fabricables de façon additive, comme ceux fabriqués par des chercheurs de l'université de Yamagata (Wang et al., 2020). En effet, ils ont fabriqué un capteur de température basé sur le poly (3,4-éthylènedioxythiophène) et le poly(styrènesulfonate) réticulé (PEDOT:PSS).

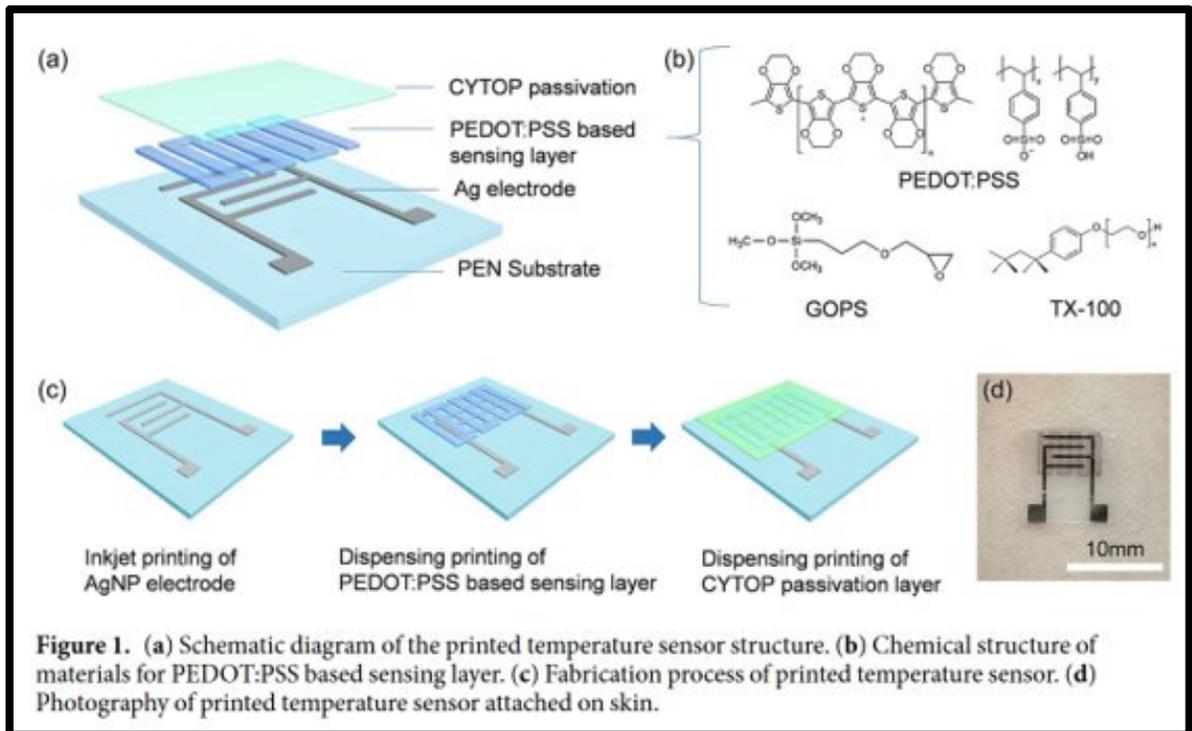


Figure 2.3 (a) Diagram du capteur de température imprimé. (b) structure chimique de la couche sensible de PEDOT:PSS. (c) Processus de fabrication du capteur de température imprimé. (d) Image du capteur imprimé attaché à la peau. Tirée de (Wang et al., 2020)

Les chercheurs ont introduit un agent de réticulation appelé (3-glycidyloxypropyl) triméthoxysilane (GOPS) et une couche de passivation en polymère fluoré (CYTOP) pour améliorer la stabilité à l'humidité et la sensibilité à la température du film à base de PEDOT:PSS. Le capteur préparé présente une excellente stabilité dans une humidité ambiante comprise entre 30 % HR et 80 % HR, ainsi qu'une sensibilité élevée de $-0,77 \% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ pour la détection de température entre 25 $^\circ\text{C}$ et 50 $^\circ\text{C}$. De plus, une plateforme de détection de température sans fil a été obtenue en intégrant le capteur imprimé à un circuit hybride flexible imprimé, ce qui a permis une surveillance stable en temps réel de la santé.

Le capteur de température est basé sur le polymère conducteur PEDOT:PSS qui présente une structure de grains à noyau-enveloppe où les noyaux conducteurs de PEDOT sont entourés de couches isolantes de PSS. La propriété sensible à la température du capteur repose sur

l'amélioration du transport des porteurs de charge et la génération de porteurs de charge sous stimulation thermique. Lorsque l'énergie thermique augmente, la conductivité à l'intérieur des grains individuels et entre les nanofeuillets adjacents est améliorée, ce qui entraîne une diminution de la résistance du film avec l'augmentation de la température. Cela se traduit par un coefficient de température de résistance (TCR) négatif.

Cependant, en raison de la nature hydrophile de PSS, la résistance du film PEDOT:PSS est sensible à l'humidité environnante. L'absorption des molécules d'eau peut faire gonfler les enveloppes de PSS, ce qui augmente ainsi la distance entre les noyaux enrichis en PEDOT et entraîne une augmentation de la résistance du film. Pour résoudre ce problème, les chercheurs ont introduit l'agent de réticulation GOPS pour réticuler la partie hydrophile de l'unité PSS. Cette réticulation a amélioré la stabilité à l'humidité du film PEDOT:PSS et elle a augmenté sa sensibilité à la température.

Une publication de 2020 intitulée « Inkjet-Printed Flexible Temperature Sensor Based on Silver Nanoparticles Ink » décrit la recherche sur le développement d'un capteur de température flexible et peu coûteux fabriqué par impression à jets d'encre (Liew & Lee, 2020). Deux types d'encre à base de nanoparticules d'argent ont été utilisés, soit une encre commerciale (JS-B25HV) de Novacentrix et une encre développée en interne. Le capteur de température, de forme sinueuse, a été conçu et imprimé sur un substrat en polyéthylène téréphtalate (PET). Les caractéristiques géométriques du capteur ont été vérifiées à l'aide d'un microscope optique, ce qui montre une correspondance acceptable avec le design.

Les performances des capteurs de température ont été évaluées sur une plage de température de 30 °C à 100 °C, par incréments de 10 °C. Les résultats ont montré une relation linéaire entre la résistance et la température pour les deux types d'encre. Le coefficient de température de la résistance (TCR) et la sensibilité des capteurs ont été calculés. Le capteur fabriqué avec l'encre développée en interne a présenté une sensibilité plus élevée ($0,1086 \Omega/^{\circ}\text{C}$) par rapport à l'encre

commerciale. Ainsi, l'encre développée en interne s'est révélée comparable à l'encre commerciale et elle a montré un potentiel d'applicabilité industrielle prometteur.

Une publication de chercheurs de l'université « Western Michigan University » intitulée « Nickel Based RTD Fabricated via Additive Screen Printing Process for Flexible Electronics » décrit la recherche menée pour développer des résistances de détection de température (RTD) à base de nickel (Ni) imprimées sur un substrat en polyimide flexible (Turkani et al., 2019).

La recherche vise à développer des RTD flexibles et conformes en utilisant des procédés d'impression additive, tels que l'impression à l'écran et l'impression en gravure. Ces procédés permettent de fabriquer des RTD plus économiques, flexibles et adaptés à différentes formes. Les chercheurs ont utilisé un film de polyimide flexible comme substrat et une encre à base de nanoparticules de Ni thermoplastique pour déposer le tracé de détection de température sur le substrat. Les tests ont été réalisés en soumettant les RTD imprimés à des températures allant de -60 °C à 180 °C dans une chambre environnementale. La réponse résistive des RTD imprimées à différentes températures a été enregistrée à l'aide d'un multimètre LCR.

Les résultats de la recherche ont montré que l'encre de Ni pouvait supporter une température maximale de 200 °C. L'analyse de surface des RTD imprimés a révélé une structure de tracé de Ni avec une distance entre les traces inférieure à 200 µm. Les micrographies au microscope électronique à balayage ont montré la présence de particules de Ni de forme cubique ou multiangulaire. L'analyse par spectrométrie de rayons X a confirmé la composition principalement composée de Ni dans les RTD imprimés, avec de petites quantités d'or, de palladium et de carbone provenant du revêtement utilisé lors de la préparation des échantillons pour l'analyse au microscope électronique à balayage.

Les tests de performance ont montré que les RTD imprimés présentaient une relation linéaire entre la résistance électrique et la température dans la plage de -60 °C à 180 °C. La sensibilité

des RTD était d'environ $0,046 \text{ ohm}/^\circ\text{C}$, ce qui indique une réponse rapide aux variations de température. De plus, les RTD imprimés présentaient une stabilité à long terme avec une dérive de résistance négligeable lorsqu'elles étaient soumises à des températures constantes, pendant une période prolongée.

Les chercheurs ont également évalué la flexibilité des RTD imprimés en les pliant à plusieurs reprises. Les résultats ont montré que les RTD conservaient leur fonctionnalité après plus de 100 cycles de flexion, ce qui démontre leur capacité à résister à des contraintes mécaniques.

Les encres utilisées ont été caractérisées par une analyse thermogravimétrique (TGA) pour déterminer leur comportement thermique. Les résultats ont montré que la température de dégradation des encres se situait entre $329 \text{ }^\circ\text{C}$ et $461 \text{ }^\circ\text{C}$ pour l'encrage NTC (« Negative temperature coefficient ») et entre $351 \text{ }^\circ\text{C}$ et $461 \text{ }^\circ\text{C}$ pour l'encrage PTC (« Positive temperature coefficient »).

Des capteurs de température individuels ont été fabriqués en intégrant les encres PTC et NTC dans un circuit de pont de Wheatstone. Les caractéristiques électriques des capteurs individuels ont été mesurées. Une sensibilité élevée allant jusqu'à $0,06 \text{ V}/^\circ\text{C}$ a été ressortie. Des matrices de capteurs de température ont également été fabriquées et caractérisées, ce qui a montré une bonne reproductibilité des caractéristiques électriques et une sensibilité élevée.

Enfin, un démonstrateur de capteurs de température a été réalisé pour la détection thermique. Le démonstrateur a été conçu pour fonctionner avec une tension d'alimentation basse et détecter les variations de température en allumant une LED rouge, lorsque la température atteint une valeur seuil. La sensibilité du capteur intégré dans le démonstrateur était de $0,025 \text{ V}/^\circ\text{C}$.

Le Tableau 2.1 résume les performances des capteurs cités plus haut.

Tableau 2.1 État de l'art des capteurs de température imprimés

Type de capteur	Réalisation	Plage de mesure (°C)	Précision (°C)	TCR (%/°C)	Temps de réponse (ms)
Capteur NTC	Film d'oxyde métallique imprimé (Assisted sintering of silver nanoparticle inkjet ink on paper with active coatings) (Öhlund et al., 2015)	-40 à +150	±0,5 à ±1	-2 à -4	<500
Capteur NTC	Film PEDOT:PSS imprimé (Fully Printed PEDOT:PSS-based Temperature Sensor with High Humidity Stability for Wireless Healthcare Monitoring) (Wang et al., 2020)	-20 à +50	±0,5 à ±1	-3,5 à -4	<500
Capteur NTC	Film d'argent nanoparticulaire imprimé (Inkjet-Printed Flexible Temperature Sensor Based on Silver Nanoparticles Ink)	-40 à +150	±0,5 à ±1	-2 à -4	<500

	(Liew & Lee, 2020)				
Capteur RTD	Film de nickel imprimé (Nickel Based RTD Fabricated via Additive Screen Printing Process for Flexible Electronics) (Turkani et al., 2019)	-50 à +300	$\pm 0,5$ à ± 2	0,006 à 0,007	<1000
Capteur NTC	Film d'oxyde métallique imprimé (Enhanced printed temperature sensors on flexible substrate) (Aliane et al., 2014)	-50 à +100	$\pm 0,2$ à $\pm 0,5$	N/A	<100

Les capteurs NTC réalisés avec des films d'oxyde métallique, de PEDOT:PSS et d'argent nanoparticulaire imprimés ont des plages de mesure allant de -40 à +150 °C, -20 à +50 °C et -40 à +150 °C respectivement. Leur précision varie de $\pm 0,5$ à ± 1 °C avec des coefficients de température négatifs (TCR) allant de -2 à -4 %/°C. Leurs temps de réponse sont inférieurs à 500 ms.

Le capteur RTD réalisé avec un film de nickel imprimé a une plage de mesure de -50 à +300 °C, une précision variant de $\pm 0,5$ à ± 2 °C et un TCR de 0,006 à 0,007 %/°C. Son temps de réponse est inférieur à 1000 ms.

Le capteur NTC réalisé avec un film d'oxyde métallique et amélioré sur substrat flexible a une plage de mesure de -50 à +100 °C, une précision variant de $\pm 0,2$ à $\pm 0,5$ °C et un temps de réponse inférieur à 100 ms.

2.3 Frittage de nanoparticules d'argent

Le frittage est un processus essentiel dans la science des matériaux. Il consiste à chauffer des particules métalliques jusqu'à ce qu'elles fusionnent partiellement ou totalement afin de former une structure solide et cohésive. Ce processus est largement utilisé dans de nombreuses applications, soient la fabrication additive, la métallurgie des poudres et la fabrication de céramiques.

Lors du frittage métallique, les particules métalliques sont chauffées à des températures élevées, généralement près de la température de fusion du matériau. Au fur et à mesure que la température augmente, les particules métalliques se rapprochent les unes des autres en raison de l'expansion thermique, ce qui permet une meilleure interconnexion et un contact étroit entre les particules (Shaler & Wulff, 1948).

Lorsque la température atteint un certain seuil, la diffusion atomique se produit entre les particules. Les atomes se déplacent à travers les frontières des particules, ce qui favorise la croissance des grains et la consolidation du matériau. Cette diffusion atomique est facilitée par les interactions atomiques et les forces d'adhésion entre les particules. La loi de diffusion de Fick, équation (2.1), explique la diffusion des atomes à travers les frontières des particules avec la valeur « J » qui représente le flux de diffusion, le « D » est le coefficient de diffusion et le « ∇C » est le gradient de concentration (Eberstein, Wenzel, Feller, Seuthe, & Gora, 2012 ; Huang, Sun, & Fan, 2006 ; Nandy, Yedla, Gupta, Sarangi, & Sahoo, 2019). Alors que la loi d'Arrhenius, équation (2.2), exprime la dépendance de la vitesse de diffusion avec la température, où D_0 est le coefficient de pré exponentiel, Q l'énergie d'activation, R la constante universelle des gaz parfaits et T la température absolue.

$$J = -D\nabla C \quad (2.1)$$

$$D = D_0 \exp(-Q/RT) \quad (2.2)$$

À des températures plus élevées, les particules métalliques subissent une déformation plastique due à la diffusion atomique et à la réorganisation des atomes. Cela permet un resserrement supplémentaire des particules et une augmentation de la densité du matériau. Les vides entre les particules sont réduits et les liaisons entre les particules deviennent plus solides. (Kim & Jeon, 1998)

Finalemt, lorsque la température atteint un niveau suffisamment élevé, le matériau métallique se ramollit et il fond. Les particules métalliques fusionnent les unes avec les autres, ce qui permet la formation des liaisons métalliques solides et d'une structure solide cohésive. L'équation (2.3) décrit la relation entre la densité du matériau fritté et la température de frittage. Elle montre que la densité du matériau augmente progressivement avec l'augmentation de la température de frittage. Il est important de noter que les valeurs spécifiques de la constante k et de l'exposant n varient en fonction du matériau, de sa composition chimique, de la taille des particules et des conditions de frittage. Ces paramètres doivent être déterminés expérimentalement pour chaque matériau et chaque processus de frittage spécifique (Bernard-Granger & Guizard, 2008 ; German, 1992 ; Gu, Kim, & Anand, 2001 ; Oyane, Shima, & Tabata, 1978).

$$\rho = \rho_0 \times (1 - \exp(-k \times T^n)) \quad (2.3)$$

où :

ρ est la densité du matériau fritté,

ρ_0 est la densité initiale du matériau,

k est une constante dépendant du matériau et des conditions de frittage,

T est la température de frittage,

n est un exposant qui dépend également du matériau et des conditions de frittage.

Cependant, il est important de contrôler attentivement les conditions de frittage pour éviter une température excessive qui pourrait entraîner une surfusion et des déformations indésirables. Le processus de frittage peut être influencé par divers facteurs, tels que la taille des particules, la composition chimique du matériau, la pression appliquée pendant le processus, ainsi que la durée et le profil de température de frittage. Ces paramètres doivent être soigneusement ajustés pour obtenir les propriétés souhaitées du matériau final (Jauregi, Fernandez, Palma, Martinez, & Urcola, 1992).

Les encres d'argent utilisées dans l'impression par jets d'encre sont principalement constituées de nanoparticules. Ces particules sont protégées les unes des autres afin d'éviter une agglomération hâtive qui, elle-même, cause une incapacité d'être imprimée. Un traitement de frittage est donc nécessaire afin de permettre une interaction moléculaire entre ces particules (Shen, Zhang, Huang, Xu, & Song, 2014).

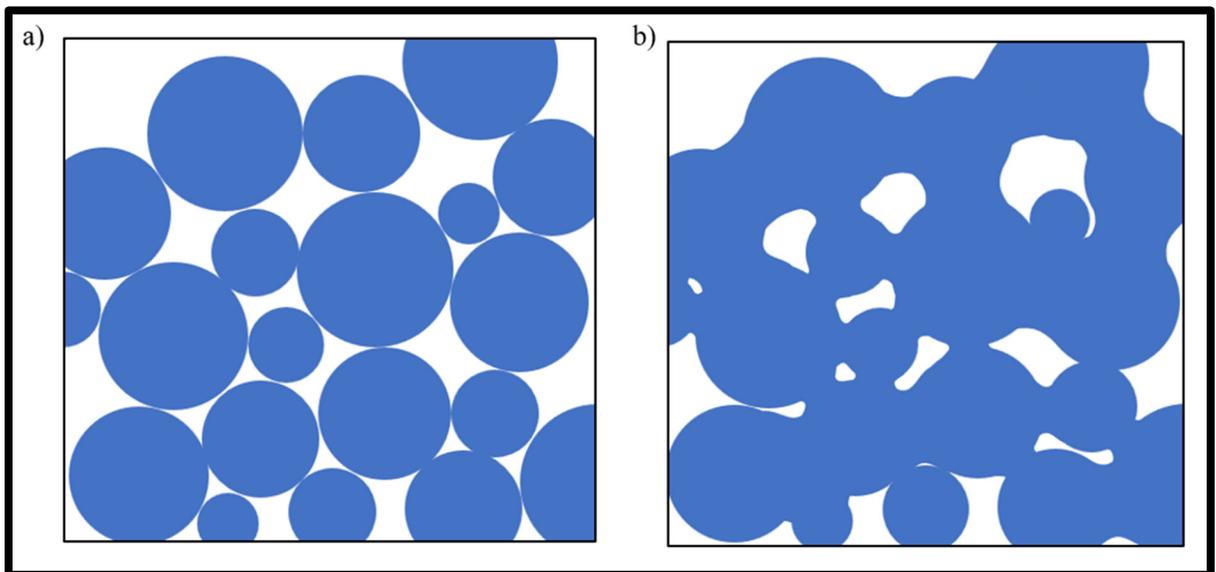


Figure 2.4 Représentation des particules d'argent avant frittage a), et après frittage b)

Il existe plusieurs méthodes de frittage de nanoparticules applicables à la fabrication de composantes électroniques. Souvent, une méthode thermique est privilégiée, mais certains substrats ne peuvent pas résister aux températures nécessaires à un bon frittage.

Heureusement, plusieurs méthodes émergentes permettent le frittage de particules d'argent de façon très précise et rapide.

Le frittage photonique consiste à utiliser une lampe de très grande intensité qui émet une impulsion lumineuse incluant l'ensemble du spectre visible pendant une fraction de seconde. Cette impulsion permet de faire chauffer les traces d'argent imprimées sans endommager le substrat qui absorbe moins bien l'énergie photonique de la lampe (Mo et al., 2019).

Le frittage par laser est aussi possible et permet un frittage très sélectif. Yeo et al ont fritté des traces provenant du processus de rouleau à rouleau à l'aide d'un laser et ils ont obtenu une conductivité électrique équivalente à 20% de celle de l'argent brut (Yeo et al., 2014). L'utilisation d'un laser MOPA (Master Oscillator Power Amplifier) permet un contrôle plus précis des paramètres de frittage et de la thermodynamique qui l'entourent (Bolduc, Trudeau, Beaupré, Cloutier, & Galarneau, 2018). Le choix du substrat a un impact significatif sur l'absorption et sur la diffusion de l'énergie thermique requise pour le frittage (Sharif et al., 2023) (Reinhold et al., 2009).

L'utilisation d'une source d'énergie infrarouge peut également être utilisée pour fritter les particules. Dans certains cas, cela peut réduire considérablement le temps de frittage, comme le démontre l'expérience menée par Denneulin et al. Suite à leur expérience, ils ont obtenu une conductivité électrique similaire en utilisant deux méthodes différentes, soient une exposition de trois minutes à une source infrarouge et un traitement au four d'une durée de cinq minutes à 200°C (Denneulin, Blayo, Neuman, & Bras, 2011). Un frittage optimal devrait se faire à une

température se situant entre 200 et 300°C (Majeed Khan, Kumar, Ahamed, Alrokayan, & AlSalhi, 2011).

L'environnement dans lequel l'argent est fritté peut également influencer les propriétés finales (Jang & Rahman, 2021). L'oxyde formé peut réduire l'interaction entre les particules, ce qui diminue ainsi la taille des connexions entre les différentes particules. Le frittage dans un environnement pauvre en oxygène et contenant de l'acide formique démontre une amélioration significative du frittage.

Le post-traitement des traces imprimées est une partie très importante de la fabrication additive par jets d'encre. Elle dicte les propriétés finales des traces ou celle des capteurs fabriqués. C'est en me basant sur ce qui a déjà été fait que j'ai poursuivi la fabrication des capteurs de températures proposés dans cet ouvrage. Toutefois, pour être en mesure d'imprimer ces capteurs, il est nécessaire d'en faire l'optimisation. En se basant sur les travaux ci-dessus, les paramètres d'éjection et de remplissage de la forme du capteur ont été optimisés.

2.4 Formation de gouttelettes

La dynamique des fluides est l'étude des mouvements et des forces qui agissent sur les fluides (liquides et gaz) (« Dynamique des fluides : définition et explications », s.d.). La formation de gouttelettes dans un fluide est un phénomène complexe qui dépend de plusieurs facteurs, tels que la viscosité du fluide, la vitesse du débit, l'inertie, et la tension de surface.

La formation d'une gouttelette d'encre dans une tête d'impression par jets d'encre est régie par deux principales formules : la formule de Rayleigh et la formule de Young-Laplace.

La formule de Rayleigh décrit la relation entre le rayon d'une gouttelette d'encre, la tension de surface de l'encre et la pression appliquée. Elle s'exprime comme suit :

$$R = (2 * \sigma) / (P - P_v) \quad (2.4)$$

où :

R est le rayon de la gouttelette d'encre,

σ est la tension de surface de l'encre,

P est la pression appliquée à l'encre,

P_v est la pression de vapeur dans l'encre.

Cette formule indique que le rayon de la gouttelette d'encre est inversement proportionnel à la différence entre la pression appliquée et la pression de vapeur dans l'encre. Ainsi, une augmentation de la pression appliquée ou une diminution de la tension de surface de l'encre conduit à la formation de gouttelettes d'encre de plus petit rayon.

La formule de Young-Laplace décrit la pression interne d'une gouttelette d'encre en fonction de son rayon et de la tension de surface de l'encre. Elle est donnée par l'équation suivante :

$$\Delta P = (2 * \sigma) / R \quad (2.5)$$

où :

ΔP est la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur de la gouttelette d'encre.

R est le rayon de la gouttelette d'encre,

σ est la tension de surface de l'encre.

Cette formule montre que la différence de pression à l'intérieur de la gouttelette d'encre est directement proportionnelle à la tension de surface de l'encre et inversement proportionnelle au rayon de la gouttelette. Ainsi, une augmentation de la tension de surface de l'encre ou une diminution du rayon de la gouttelette entraîne une augmentation de la différence de pression.

En combinant ces deux formules, il est possible de comprendre que la formation d'une gouttelette d'encre dans une tête d'impression par jets d'encre est le résultat d'un équilibre entre la pression appliquée, la tension de surface de l'encre et les forces de cohésion internes de la gouttelette. Lorsque la pression appliquée atteint un seuil critique, une gouttelette se détache de l'orifice de la tête d'impression.

Il est important de noter que ces formules simplifient le processus complexe de la formation des gouttelettes d'encre et elles ne prennent pas en compte d'autres facteurs, tels que la viscosité de l'encre, la géométrie de la buse et les propriétés de la membrane piézoélectrique. Cependant, elles offrent une compréhension de base des principaux mécanismes impliqués dans la formation des gouttelettes d'encre dans les têtes d'impression par jets d'encre.

Lorsqu'un fluide est soumis à une force de cisaillement, par exemple, lorsqu'il est éjecté au travers d'une buse, il se divise en gouttelettes. C'est dû à la propriété des fluides connue sous le nom de « tension de surface ». Ce phénomène est une force qui minimise la surface d'un fluide en réduisant les écarts entre les molécules qui se retrouvent à la surface. Lorsque le fluide est éjecté à travers une buse, la tension de surface tend à maintenir les molécules du fluide regroupé. Toutefois, lorsque la force de cisaillement est suffisamment élevée, elle peut finalement dépasser la tension de surface, ce qui provoque ainsi la formation de gouttelettes (Çengel & Cimbala, 2006, p.549).

La dynamique des fluides dans une tête d'impression piézoélectrique est un phénomène complexe qui implique plusieurs concepts de la physique des fluides et de l'électronique.

Pour comprendre comment fonctionne une tête d'impression piézoélectrique, il est important de savoir que ces types de têtes utilisent l'effet piézoélectrique pour déposer des gouttelettes d'encre sur un substrat. L'effet piézoélectrique est un phénomène physique dans lequel un matériau génère une charge électrique lorsqu'il est soumis à une contrainte mécanique. En

utilisant cet effet, une tête d'impression piézoélectrique peut éjecter des gouttelettes d'encre en formant des ondes de pression dans un canal rempli d'encre (Wijshof, 2008).

Une fois que les ondes de pression ont été générées, les gouttelettes d'encre sont formées par la perte de continuité de la surface de l'encre à la sortie de la tête d'impression. Ce phénomène est connu sous le nom de « perte de charge par éclaboussure », et est lié à la vitesse de l'onde de pression et à la viscosité de l'encre (« Chapitre 4 Perte de charge », s.d.).

Il y a aussi un certain nombre de facteurs qui peuvent affecter la qualité de l'impression, tels que la température de l'encre, la tension appliquée sur les cellules piézoélectriques, la propreté de la tête d'impression et le type de substrat.

Il est important de noter que les travaux de recherche sur les têtes d'impression continuent à avancer rapidement et de nouvelles technologies émergent pour améliorer la qualité d'impression tout en augmentant le débit d'impression.

En résumé, la dynamique des fluides dans une tête d'impression piézoélectrique est un sujet complexe qui implique plusieurs concepts de la physique des fluides et de l'électronique. La forme de la buse, la force appliquée sur le fluide ainsi que la tension de surface de ce dernier sont tous des facteurs à prendre en compte lors de l'étude de ce phénomène.

De la formation de gouttelettes en passant par les possibilités qu'offre l'impression par jet d'encre et l'importance du frittage pour les encres métalliques, la littérature regorge d'expérimentations faites avec l'impression par jets d'encre. C'est un domaine mature, mais qui offre encore beaucoup de potentiel pour la recherche. Le développement de cette technologie continue de croître et montre que la fabrication numérique pourrait un jour permettre une nouvelle aire de dispositif adapté à tout un chacun. Beaucoup de travail reste à faire.

CHAPITRE 3

Céradrop

3.1 Présentation de l'imprimante

L'imprimante utilisée pour cette expérimentation est la Céradrop série-X de la marque Céradrop. Cette plateforme d'impression permet l'installation de plusieurs accessoires de déposition. Un module utilisant une cartouche Samba de Fujifilm Dimatix est utilisé et il est reconnu pour sa simplicité et sa facilité de remplacement de la cartouche, en cas de défaillance. Il est également possible d'utiliser un module de déposition par aérosol ainsi qu'une tête d'impression Konica Minolta. Contrairement à l'imprimante DMP-2950 de Fujifilm Dimatix, le logiciel de la Céradrop permet un meilleur contrôle de l'emplacement de déposition des gouttelettes. Ce facteur est très important à considérer et il sera discuté dans la section 3.4.

3.2 Cartouche Samba

La cartouche Samba est une combinaison d'un réservoir d'encre monté sur une tête d'impression. Le réservoir peut contenir jusqu'à 1.5 mL d'encre (« Dimatix® Materials Cartridge - Samba® Cartridge », s.d.). La technologie d'impression G3L de Fuji Dimatix est utilisée dans les têtes d'impression industrielles de la compagnie. Avec un volume d'éjection natif de 2.4 pL et un total de 12 buses, il est possible d'obtenir une excellente résolution. En effet, il est possible d'imprimer à une fréquence d'éjection de 80 kHz. Cependant, cette valeur est grandement excessive, car la vitesse d'impression maximale de la Céradrop est de 500 mm/s. Pour une impression typique, une fréquence d'éjection de 15 kHz est le maximum possible à atteindre en respectant la vitesse maximale d'impression de l'équipement. Chaque encre requiert des paramètres d'éjection spécifiques. La cartouche Samba est compatible avec des encres de viscosité se situant entre 4 et 8 cps et d'une tension de surface variant de 28 à 32 dynes/cm. Plusieurs paramètres influencent le comportement de celle-ci dans la tête d'impression.

3.3 Influence de différents facteurs sur la qualité d'éjection

La qualité d'éjection est directement liée aux propriétés physiques de l'encre (sa viscosité, sa tension de surface ainsi que la charge de particules qu'elle contient). La taille des particules peut impacter grandement la stabilité d'éjection de l'encre en bouchant partiellement les orifices de la tête d'impression (« Ink Jet Inks and the Measurement of Ink Jet Ink Particles Using Laser Diffraction », 2005). Ce paramètre ainsi que la tension de surface ne peuvent pas être modifiés avec la Céradrop.

La viscosité de l'encre influence directement le nombre de Reynolds « Re » calculé avec l'équation (4.1). La Céradrop peut modifier la température de l'encre dans les buses, ce qui peut aider à réduire la viscosité. Il est possible de chauffer la tête d'impression jusqu'à 60°C.

La dernière méthode, avec laquelle il est possible de faire varier la qualité d'éjection de l'encre, consiste à modifier la fonction voltage-temps appliquée aux éléments piézoélectriques de la cartouche. Il est possible avec la Céradrop de modifier ces fonctions de façon individuelle pour chaque buse. Dans le cas présent, la même courbe est appliquée sur l'ensemble des buses. Il est donc possible de créer la fonction désirée pourvu qu'elle respecte quelques règles. En effet, les valeurs de voltage doivent se situer entre -50 et 50 V et la variation de tension selon le temps ne peut pas excéder 0.1 V/us. Il est donc possible de former des courbes avec différents aspects. Ceux-ci permettent de faire varier positivement ou négativement le volume de la gouttelette formée ou d'en réduire les vibrations qui peuvent causer, à leur tour, des gouttelettes satellites (Shah et al., 2021). Une fois les gouttelettes bien formées, il est beaucoup plus facile d'obtenir une qualité d'impression acceptable.

3.4 Influence de différents facteurs sur la qualité d'impression

Premièrement, la qualité d'impression est affectée par plusieurs facteurs, soient la vitesse d'impression, le positionnement des gouttelettes, la température du substrat ainsi que le traitement de surface du substrat.

Ensuite, la vitesse d'impression fait varier la qualité de l'impression en ajoutant une erreur de positionnement. Le temps que prend l'encre à sortir de la buse pour se déposer sur le substrat est critique. La vitesse d'éjection jumelée à la vitesse de déplacement de la tête d'impression impacte donc le positionnement de toutes les gouttelettes. Heureusement, un facteur de correction peut être ajusté pour compenser cette erreur.

Finalement, la température du substrat, elle aussi, a un impact. En effet, elle augmente la taille de la goutte. Elle peut aussi faire sécher l'encre plus ou moins rapidement ce qui fait varier la dispersion de la matière solide de l'encre dans la gouttelette, elle-même (He & Derby, 2017 ; Shin, Lee, & Oh, 2011). La Céradrop permet d'augmenter la température du plateau à 60°C. Il est aussi possible de l'augmenter en utilisant la lampe infrarouge ADPHOS et en faisant des passages manuels à haute puissance et à faible vitesse. De ce fait, il est possible d'obtenir une température de plateau d'environ 80°C, ce qui permet à l'encre de sécher au contact du substrat. Cette technique n'a pas été employée lors de cette expérimentation, car elle excède les paramètres de base du fabricant et elle présente un risque d'endommager l'imprimante.

L'atout principal de la Céradrop est la possibilité de positionner les gouttelettes de façon très contrôlée. En effet, plusieurs types de dépositions sont possibles afin de maximiser le remplissage, d'augmenter la quantité d'encre déposée ou d'uniformiser l'épaisseur de déposition. La Figure 3.1 présente les types de remplissage, soient carré, carré centré qui ajoute une gouttelette dans les interstices laissés par le modèle carré, « shift hexagonal » qui applique un motif hexagonal dans l'axe « shift » de la machine (axe y) et « fab hexagonal » qui lui le fait dans l'axe de fabrication (axe x).

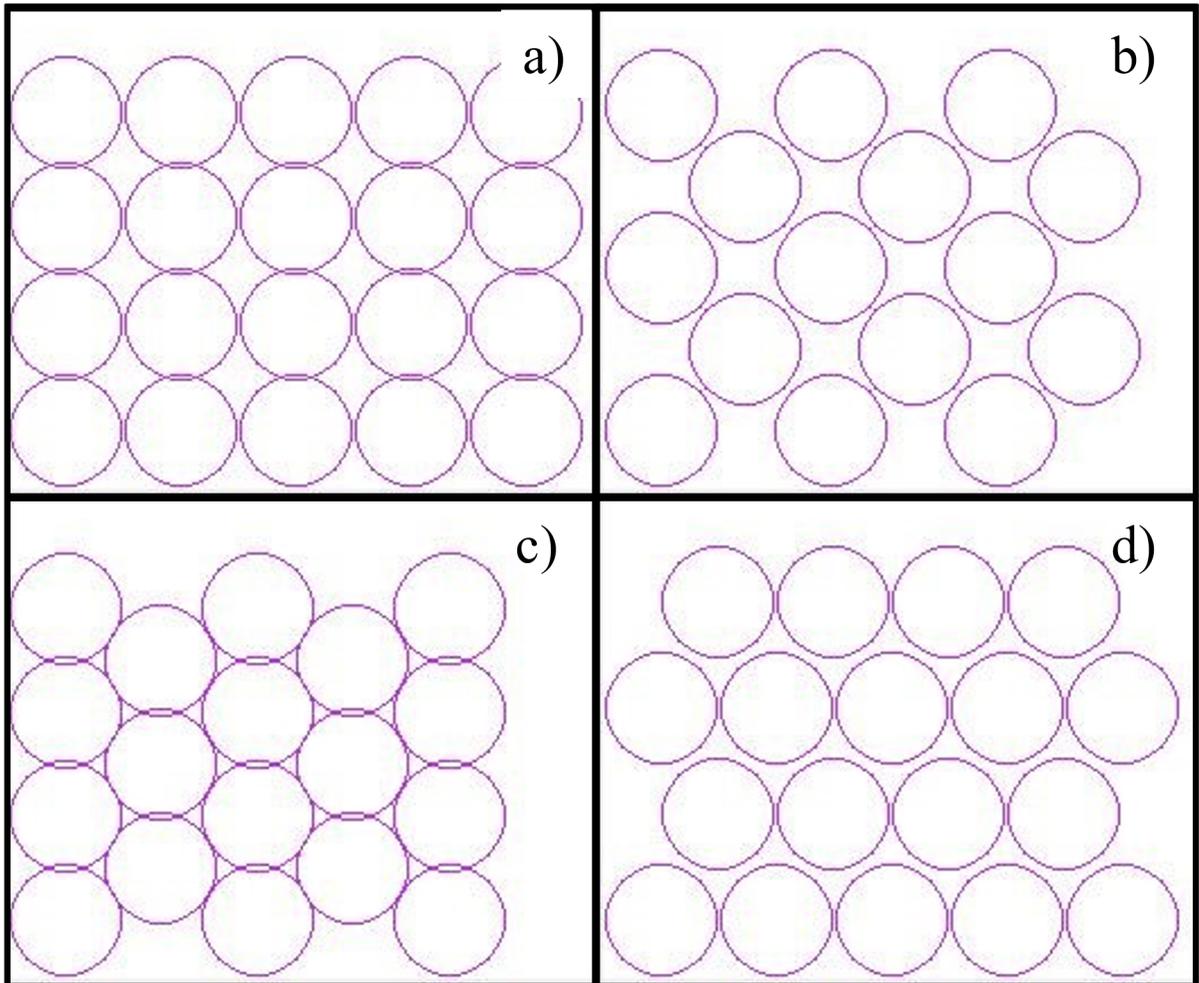


Figure 3.1 Types de remplissages « square » a) « centered square » b) « shift hexagonal » c) et « face hexagonal » d)

CHAPITRE 4

Optimisation

Ce chapitre porte sur l'optimisation des paramètres de fabrication lors de l'impression du capteur de température. La formation des gouttelettes d'encre ainsi que la disposition de ces dernières est discutée plus bas.

4.1 Formation des gouttelettes

La formation de gouttelettes est un critère très important dans la déposition par jets d'encre. La qualité de formation des gouttelettes impacte l'uniformité de la déposition ainsi que la précision de l'objet formé. Il est possible de prédire les paramètres d'éjection, mais cela est très complexe (Snyder, 2019).

Dans le but de prédire la possibilité d'impression d'une encre, il est possible de calculer le nombre de Renold (Re) et le nombre d'Ohnesorge (Oh). Ces deux nombres adimensionnels placent l'encre dans un graphe montrant la possibilité d'impression. La zone imprimable est

souvent appelée « l'île d'imprimabilité ». La Figure 4.1 l'illustre bien. « Printable Fluid Zone » (Alamán, Alicante, Peña, & Sánchez-Somolinos, 2016 ; Trudeau, 2021).

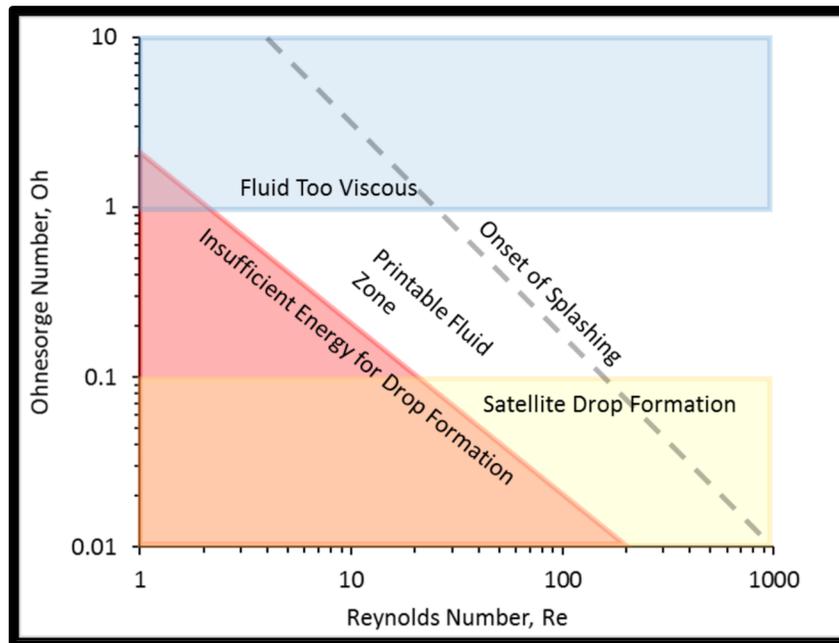


Figure 4.1 Graphique Re vs Oh

Tirée de Trudeau (2021, p. 67)

Le nombre d'Ohnesorge est un nombre adimensionnel qui caractérise la déformation de bulles ou de gouttes en prenant en compte l'inertie, la viscosité et la tension de surface de la goutte. Le nombre de Reynolds est lui aussi un nombre adimensionnel permettant de décrire un fluide selon son inertie et sa viscosité (« Reynolds' Number - an overview », s.d.) (Alamán et al., 2016). Il établit la nature de son écoulement, soit laminaire ou turbulent. Une augmentation de la température de l'encre cause une augmentation du Re et une diminution du Oh . Le fait d'augmenter la température de l'encre réduit la viscosité ce qui fait en sorte que l'encre peut s'écouler plus facilement de la buse. Comme le Re dépend de la viscosité et de l'inertie, le fait de réduire la viscosité sans changer l'inertie augmente cette variable. Pour changer le point de façon verticale, seules la viscosité et la composition de l'encre peuvent modifier cette valeur. Différents composants de l'encre lui donnent une énergie de surface différente. Une tension de surface trop élevée empêche la gouttelette de sortie de la buse.

L'encre ANP DGP 40TE-20C utilisée dans cette étude a été caractérisée par Charles Trudeau, qui a mesuré un Re de 18 et un Oh de 0,44 (Trudeau, 2021). Ces deux paramètres placent l'encre ANP DGP 40TE-20C pratiquement au centre de la zone d'imprimabilité. Les équations 4.1 et 4.2 peuvent être utilisées pour calculer ces paramètres en considérant la densité de l'encre en m^3/kg (ρ), la vitesse d'éjection de la gouttelette (v), le diamètre de la buse en m (L), la viscosité de l'encre en $Pa \cdot s$ (η) et la tension de surface en J/m^2 (σ_L) (Alamán et al., 2016).

Dans le cadre de cette étude, une cartouche Samba de 2,4 pL a été utilisée, ce qui a donné un Re de 24 et un Oh de 0,42.

$$Re = \frac{\rho v L}{\eta} \quad (4.1)$$

$$Oh = \frac{\eta}{\sqrt{\rho L \sigma_L}} \quad (4.2)$$

La Figure 4.2 montre l'emplacement de l'encre ANP DGP 40TE-20C éjectée avec une cartouche Samba de 2,4 pL. Comme mentionné précédemment, une réduction de la viscosité déplacerait le point vers la droite et vers le bas. Cette réduction de viscosité peut être due à une augmentation de la température de l'encre dans la tête d'impression. Une autre façon de modifier le Re serait de modifier la tension appliquée à la tête d'impression, qui à son tour, augmenterait la vitesse d'éjection de la gouttelette.

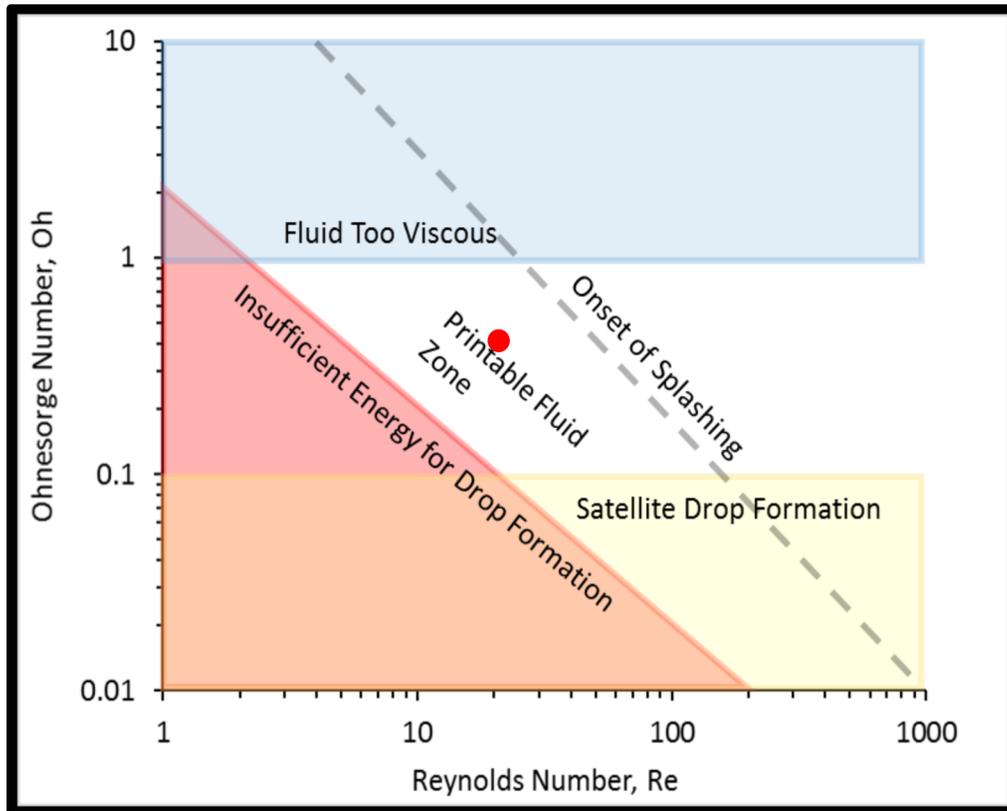


Figure 4.2 Graphique Re vs Oh montrant les valeurs de l'expérience actuelle

Pour modifier le Oh, il est donc nécessaire de modifier la viscosité de l'encre en augmentant sa température ou en ajustant sa composition chimique. L'augmentation de la température peut réduire la viscosité d'un liquide en affectant les forces intermoléculaires qui maintiennent les molécules ensemble. Plus précisément, lorsque la température d'un liquide augmente, l'énergie cinétique des molécules augmente également, ce qui entraîne une augmentation de leur agitation thermique.

Cette agitation thermique facilite le mouvement des molécules les unes par rapport aux autres, ce qui réduit ainsi la viscosité du liquide. En augmentant la température, les forces d'attraction entre les molécules peuvent être affaiblies, ce qui permet aux molécules de glisser plus facilement les unes par rapport aux autres et de diminuer ainsi la résistance au mouvement.

L'un des moyens pour quantifier cette relation entre la viscosité et la température est la loi d'Arrhenius, qui établit que la viscosité d'un liquide diminue exponentiellement avec l'augmentation de la température. Cette relation peut être décrite par l'équation d'Arrhenius(4.3) :

$$\eta = A * \exp(E_a/RT) \quad (4.3)$$

où η est la viscosité du liquide, A est la constante pré exponentielle, E_a est l'énergie d'activation, R est la constante des gaz parfaits et T est la température absolue. La valeur de la constante pré exponentielle est généralement déterminée expérimentalement en mesurant la viscosité du liquide à différentes températures. Elle peut varier en fonction de la nature chimique du liquide, de sa composition, de la présence de solutés ou d'autres facteurs influençant les forces intermoléculaires. En pratique, la constante pré exponentielle est souvent obtenue par ajustement des données expérimentales de viscosité en fonction de la température à l'aide de l'équation d'Arrhenius. Cela permet de déterminer la valeur optimale de la constante pré exponentielle pour le système étudié. La formule (4.3) indique que la viscosité diminue de manière exponentielle lorsque la température augmente avec une diminution plus importante pour des valeurs élevées de l'énergie d'activation E_a .

Cela peut être aussi réalisé en utilisant des additifs, ce qui peut, par la suite, modifier la tension de surface de l'encre, réduire l'attraction moléculaire de l'encre en lubrifiant et en réduisant la friction entre les molécules ou les particules contenues dans l'encre ou, encore, en modifiant la structure rhéologique de l'encre. Toutefois, il est important de veiller à ce que ces modifications n'affectent pas négativement la conductivité électrique ou la stabilité des capteurs.

Après les précédentes vérifications, il est possible de constater que l'encre est donc imprimable. Ensuite, il reste à optimiser la formation des gouttelettes. L'imprimante utilisée

(Céradrop série-x) utilise des cartouches Samba de Dimatix Fuji (ANNEXE III) et elle permet un accès à plusieurs paramètres d'impression et d'éjection. Ces cartouches ont une géométrie très similaire aux têtes d'impression industrielles de haut volume de la compagnie. Cela permet une adaptation de la méthode expérimentale à une méthode de production à grand volume.

La cartouche dispose de 12 buses de 2.4pL, ce qui représente un volume relativement petit. Cela a l'avantage de permettre une meilleure résolution, mais ceci implique que les particules d'argent incluses dans l'encre doivent être plus petites que celles comprises dans une cartouche avec un volume de 10pL, par exemple.

Le logiciel de la Céradrop permet de contrôler pratiquement tous les paramètres de formation des gouttelettes, et ce, pour chaque buse. La Figure 4.3 montre le contrôle machine qui permet de manipuler la forme de la commande électrique qui va aux têtes piézoélectriques afin de former de déposer les gouttelettes aux endroits désirés. La Figure 4.4 illustre le contrôle logiciel. Cela permet de spécifier le type de remplissage et le chevauchement des gouttelettes et des trames.

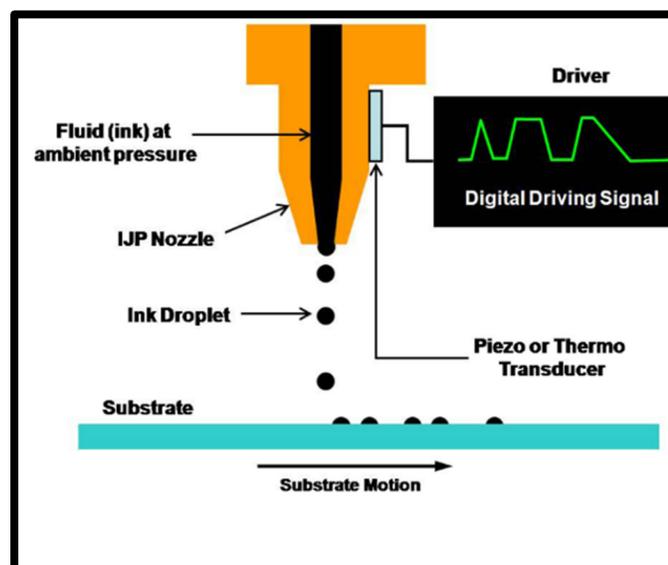


Figure 4.3 Représentation des types de contrôle machine et logiciel de la Céradrop
Tirée de Xu (2007, p. 1)

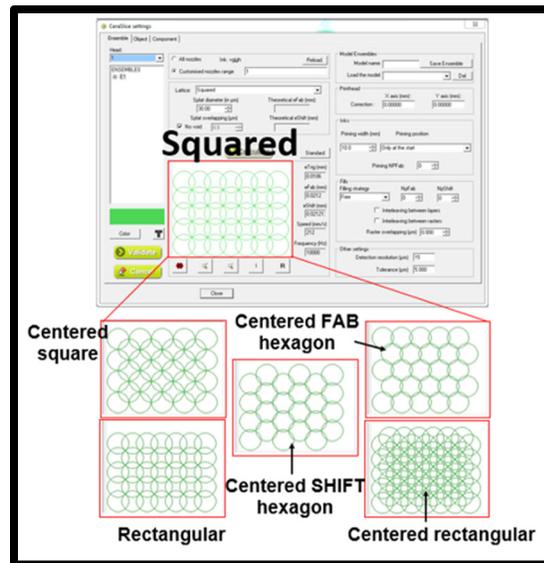


Figure 4.4 Contrôle du type de remplissage Céradrop

Bien que ce contrôle soit disponible, il est possible de remarquer que des paramètres d'éjection stables vont permettre à l'ensemble des buses de fonctionner efficacement. S'il arrive que seulement certaines buses soient fonctionnelles et qu'une légère modification des paramètres affecte drastiquement les résultats, il est fort probable que la recette ne soit pas stable et qu'elle nécessite de plus amples modifications. Par exemple, un problème de résonance peut causer ce genre de problème. De plus, si la gouttelette n'a pas le temps de se former ou si elle se forme et qu'elle est éjectée avant la prochaine action de la buse, il est possible qu'une gouttelette satellite se forme et qu'elle réduise ainsi la qualité de l'impression obtenue. Une gouttelette satellite est une petite gouttelette se formant lors de l'éjection d'une gouttelette. Elle tombe généralement juste à côté de la gouttelette voulue, ce qui représente un risque de court-circuit dans le capteur.

La méthode d'éjection utilisée par les cartouches Samba est piézoélectrique. Dans le cas présent, il est possible de faire varier le volume de façon positive et négative. En appliquant un voltage négatif, le volume près de la buse augmente (voir Figure 4.5 b). Une dépression est créée, ce qui entraîne l'encre à s'écouler dans la cavité formée. Lorsque le voltage retourne à 0, ou dans cet exemple, lorsque le voltage envoyé est positif, la réduction du volume de la cavité fait en sorte d'expulser l'excédent de l'encre par la buse, ce qui constitue la gouttelette (Figure 4.5 d). En ajustant la durée et l'amplitude des voltages envoyés aux buses, il est possible d'ajuster de façon très précise le volume, la vitesse d'éjection ainsi que la forme de la gouttelette.

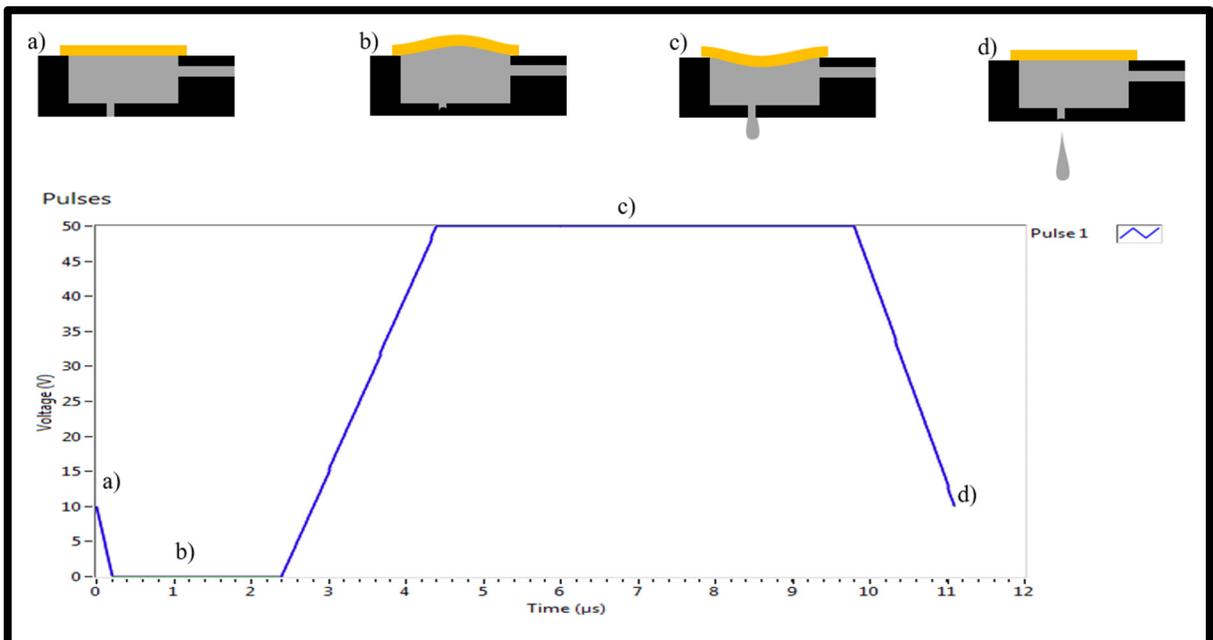


Figure 4.5 Représentation de la buse piézoélectrique selon le voltage appliqué dans le temps

La fréquence d'éjection joue aussi un rôle primordial dans la commande optimale d'éjection. Comme il s'agit d'un système hydraulique, l'inertie du liquide entraîne un certain mode vibratoire. Ce système peut, lorsque la fréquence augmente, tomber en régime sous-amorti. Cela entraîne un emballement de l'amplitude d'éjection et, souvent, empêche la formation de gouttelettes. Il est possible de compenser pour cet emballement en augmentant ou en réduisant le temps de maintien entre les éjections. C'est ce que montre (Khalate et al., 2011) avec la

Figure 4.6 qui présente l'amortissement du ménisque à la sortie de la buse avec une onde de commande standard et une compensatoire.

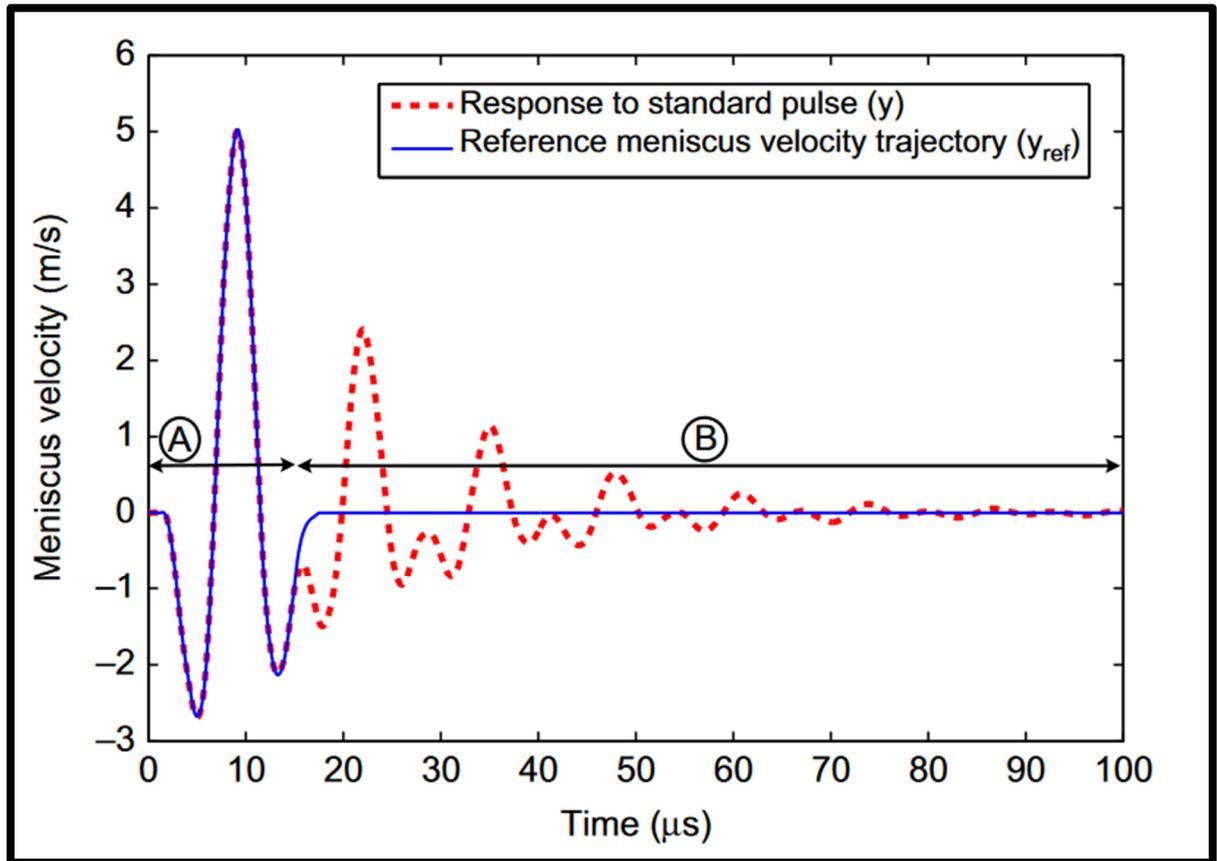


Figure 4.6 Vitesse du ménisque d'une buse dans le temps selon deux types de commande
Tirée de Khalate (2011, p. 4)

Avec le présent système, il est relativement difficile d'observer visuellement cette résonance dans la buse. Toutefois, le fait d'appliquer un changement de fréquence permet de vérifier les temps de maintien. Selon les tests effectués lors de ce travail, il a été noté que si la vitesse d'éjection des gouttelettes augmente en élevant la fréquence, il est possible que l'harmonique ne soit pas entièrement contrôlée et que des modifications soient nécessaires. La vitesse peut être comparée lors de l'analyse des gouttelettes avec la caméra haute vitesse. Pour un même délai de prise de vue, la gouttelette sera plus basse en augmentant la fréquence d'éjection.

Il est possible de voir la séquence de voltage utilisée pour la fabrication du capteur à la Figure 4.5. Cette séquence permet une impression très rapide. Les capteurs ont tous été imprimés à 500mm/s. Il s'agit de la vitesse maximale de la tête d'impression de l'imprimante Céradrop qui a été utilisée.

4.2 Optimisation du remplissage

La disposition des gouttelettes dans le modèle joue un grand rôle, autant dans l'apparence de l'objet imprimé que dans ses propriétés électriques et physiques. Il est nécessaire d'optimiser le remplissage des objets afin d'obtenir une surface qui est la plus uniforme possible et qui respecte la géométrie de l'objet à imprimer. Dans le cas présent, le serpentín servant de thermistance, qui est présenté à la Figure 4.7 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, doit avoir une dimension contrôlée afin d'éviter un court-circuit interne et d'avoir des propriétés électriques similaires entre les capteurs.

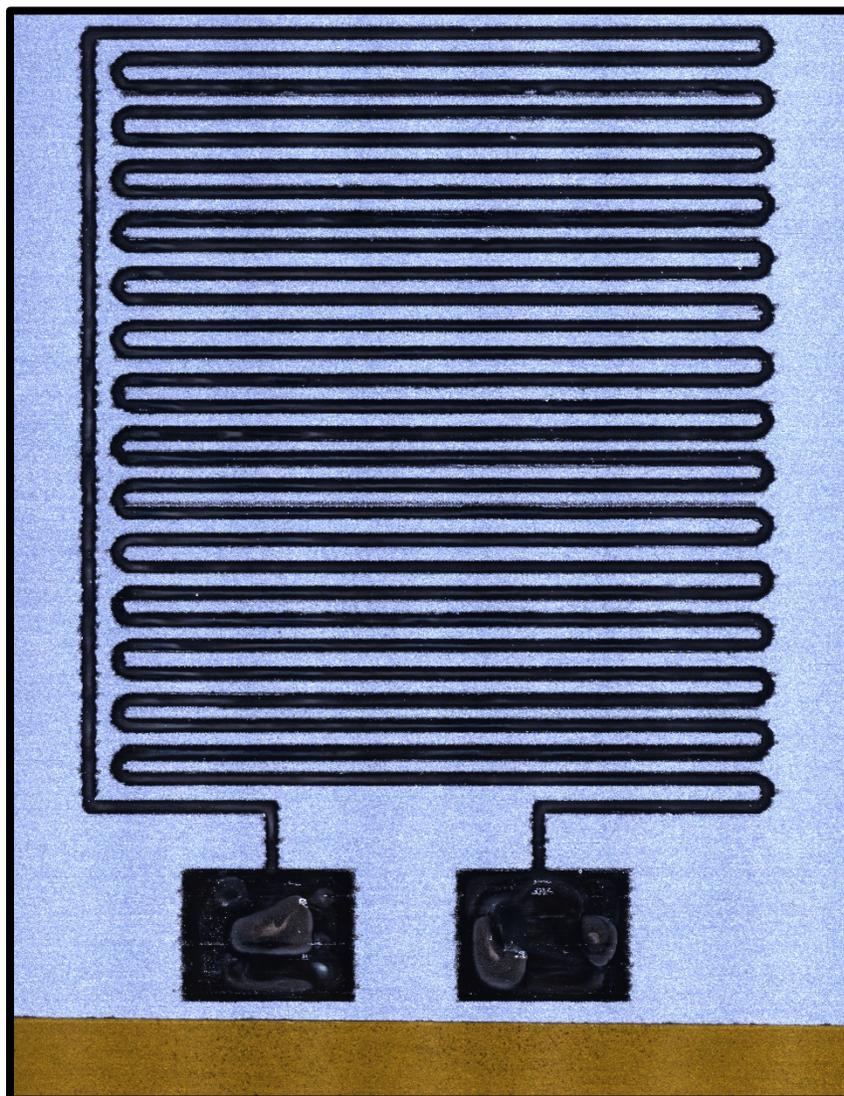


Figure 4.7 Thermistance imprimée en argent non fritté

Le premier paramètre dont il faut tenir compte est la taille de la gouttelette sur le substrat. Dépendamment, du traitement de la surface, du fini souhaité et du matériau utilisé, la taille résultante de la gouttelette sur la surface peut varier énormément. Il est donc important de faire un test et de mesurer la taille de l'éclaboussure. Par la suite, selon le type d'encre, il peut être pertinent de faire entrecroiser la déposition des gouttelettes. Ceci assure une couverture complète de la surface, mais présente aussi quelques contraintes à prendre en considération. En effet, selon les courbes et les épaisseurs de traces, il est possible que ce genre de déposition

ne couvre pas l'ensemble de l'objet uniformément, ce qui résulte en une variation d'épaisseur et, donc, de conductivité électrique.

Selon la tension de surface de l'encre, une agglomération peut survenir et causer la formation de zones contenant une quantité irrégulière de particules, lorsque le solvant s'évapore. Une trop grande quantité d'encre à un même endroit peut produire un débordement et une formation de bavures indésirables. Ces bavures présentent un très grand risque de courts-circuits. Dans le cas présent, ceux-ci doivent être évités à tout prix. Pour réduire le risque, il est possible d'imprimer plusieurs couches, les unes après les autres, en incorporant des temps de séchage, assistés ou non, avec une lampe infrarouge. Les paramètres de temps et de puissance de séchage peuvent tous être contrôlés dans la recette d'impression.

Il est aussi possible d'ajouter une légère variation de la position d'éjection pour chaque couche. Cela permet d'imprimer une première couche en évitant, entièrement, l'entrelacement des gouttelettes et le remplissage des espaces avec les couches subséquentes. La distance entre le centre d'une gouttelette et le rebord de l'objet désiré peut aussi être ajustée afin de respecter les dimensions demandées.

Toutes ces modifications de positionnement d'éjection ont pour but d'obtenir une surface imprimée uniforme et qui respecte les dimensions de l'objet à imprimer.

CHAPITRE 5

Méthodologie

5.1 Préparation de la surface

Les expérimentations ont toutes été effectuées avec une cartouche Dimatix Samba PDS00142. Cette cartouche utilise la même conception que le système G3L industriel de Fujifilm, ce qui permet une transition plus facile des encres testées, lorsque le procédé doit être transféré à une production industrielle. Ces têtes industrielles sont principalement utilisées dans le domaine de la reprographie. Elles permettent une impression à très grande vitesse de grandes surfaces, lorsqu'elles sont combinées.

Un substrat d'aluminium de 1.5mm anodisé naturel a été utilisé pour l'ensemble des tests. Ces derniers ont été faits sur de l'aluminium anodisé noir et il était beaucoup moins facile d'obtenir une déposition uniforme. L'une des hypothèses possibles est que les pigments de couleur ajoutés à l'anodisation changent la morphologie de surface et ils empêchent la déposition uniforme du scellant.

Pour permettre l'impression de circuits électriques sur une surface d'aluminium, une couche de polymère doit être déposée pour agir comme une couche isolante électrique. Le désavantage avec cette méthode est que le polymère agit aussi comme isolant thermique, ce qui réduit, ainsi, le transfert de chaleur entre les traces et le substrat. Le procédé d'anodisation, en lui-même, n'est pas une solution viable comme isolant électrique étant donné sa porosité. L'encre peut donc s'infiltrer et court-circuiter directement sur l'aluminium.

L'alumine est une céramique qui ne conduit pas l'électricité. De ce fait, en théorie, l'utilisation de l'alumine comme substrat pourrait permettre l'impression directement sur cette dernière. Cependant, lors de la formation de la couche d'anodisation d'un alliage d'aluminium, la couche

d'oxyde d'aluminium ne se forme pas de façon uniforme, ce qui fait en sorte que, fréquemment, de petites surfaces sont non traitées. Ces défauts sont dus aux éléments d'alliage, qui eux, ne forment pas de couche d'oxyde comme l'aluminium pur le fait. Le résultat obtenu est une feuille d'aluminium avec une couche d'oxyde trouée. Elle est illustrée à la Figure 5.1 a). Lorsque de l'encre d'argent est déposée sur la surface, elle permet la connexion électrique entre le substrat et la trace, ce qui rend le procédé inutilisable (Dobosz, 2021).

Une fine couche de polymère (Poly(dianhydride pyromellitique-co-4,4'-oxydianiline) provenant de chez Sigma-Aldrich (ANNEXE V) est déposée sur l'aluminium anodisé, ce qui permet de remplir les cavités. Ce polymère a été choisi en premier lieu pour sa grande résistance thermique. Le PPD/M est connu pour ses excellentes propriétés thermiques, mécaniques et électriques. Il a une résistance élevée aux températures élevées, aux produits chimiques, aux solvants et aux radiations. En raison de ces propriétés, il est souvent utilisé dans des applications nécessitant une résistance élevée à la chaleur, comme les revêtements, les adhésifs, les composites et les films pour l'industrie électronique, l'aérospatiale et l'automobile. À 300°C, le polymère subit une réaction appelée « imidization » au cours de laquelle les groupes amine et les groupes acides carboxyliques réagissent pour former des liaisons imide (Lin & Tan, 2015). Cette réaction de cyclisation est favorisée par l'élévation de la température, ce qui permet aux groupes réactifs de se rapprocher et de réagir plus efficacement. Le résultat de cette réaction est la formation du polyimide, qui est un polymère hautement stable et possède des propriétés thermiques, mécaniques et chimiques remarquables. Le polyimide est connu pour sa résistance élevée à la chaleur, aux produits chimiques et aux solvants, ainsi que pour sa stabilité dimensionnelle. Il est primordial d'appliquer la résine en récurant la surface avec un chiffon de polypropylène. L'application circulaire de résine permet de remplir les pores qui, autrement, permettent à l'encre de créer un court-circuit avec l'aluminium du substrat. Un minimum de deux couches est appliqué avec une période de séchage de 15 min à 100°C chacune. Il est, ensuite, possible d'imprimer sur cette surface, qui est maintenant scellée, tout en gardant les propriétés physiques et thermiques de l'aluminium

anodisé. Sans ce scellant, l'encre d'argent fait un court-circuit en entrant en contact avec l'aluminium, ce qui rend l'impression inutilisable.

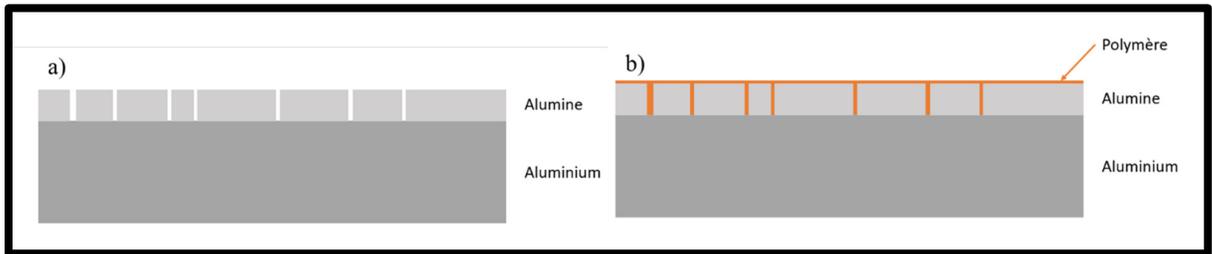


Figure 5.1 Représentation en vue de coupe du substrat d'aluminium avant scellant a) et après application du scellant polymérique

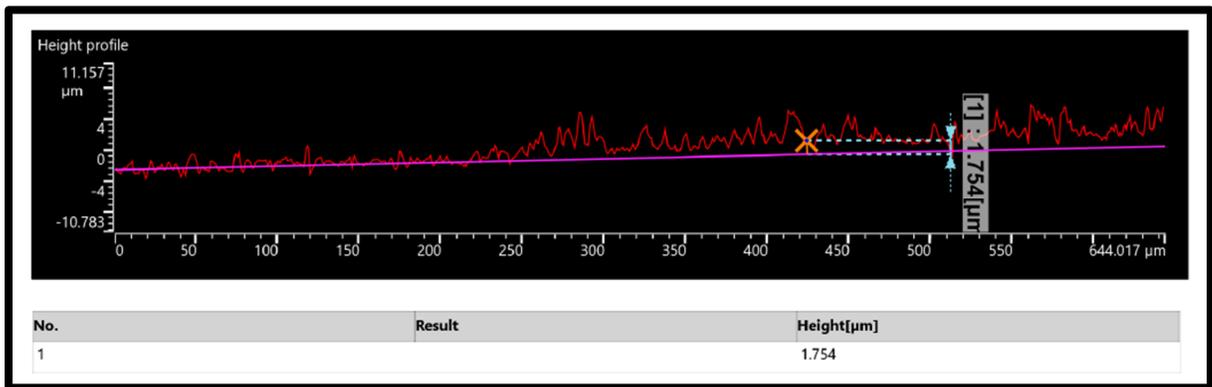


Figure 5.2 Mesure de l'épaisseur de la couche du scellant sur le substrat d'aluminium avec le microscope LEXT OLS5000 d'Olympus

Un microscope à balayage laser LEXT OLS5000 est utilisé pour mesurer l'épaisseur de la couche d'isolation électrique déposée. Ce microscope utilise un laser pour mesurer la variation d'épaisseur dans une zone précise. Il est possible, avec un tel système, d'obtenir une carte topographique très précise d'une surface, comme le démontre la Figure 5.2, dans laquelle seulement une section de la carte topographique a été extraite. La couche d'isolation finale est mesurée à environ 1.7µm d'épaisseur et elle est suffisante afin d'isoler l'encre du substrat d'aluminium non anodisé tout en réduisant au maximum l'effet d'un polymère sur le transfert de chaleur entre le substrat et le capteur. Le polymère permet aussi de faciliter l'impression en modifiant l'énergie de surface du substrat, ce qui permet à l'encre de rester en place plus facilement et de s'étendre sur une plus grande surface. La déposition qui en résulte est plus

mince et plus uniforme. La différence d'énergie de surface modifie l'interaction entre l'encre et le substrat en changeant l'angle de contact de l'encre sur le substrat.

La Figure 5.3 montre la couche de polymère disposé sur la surface d'aluminium anodisé. Il est possible de remarquer une certaine texture. Cette texture ne semble pas affecter la qualité d'impression, mais pourra probablement être améliorée dans un futur travail.

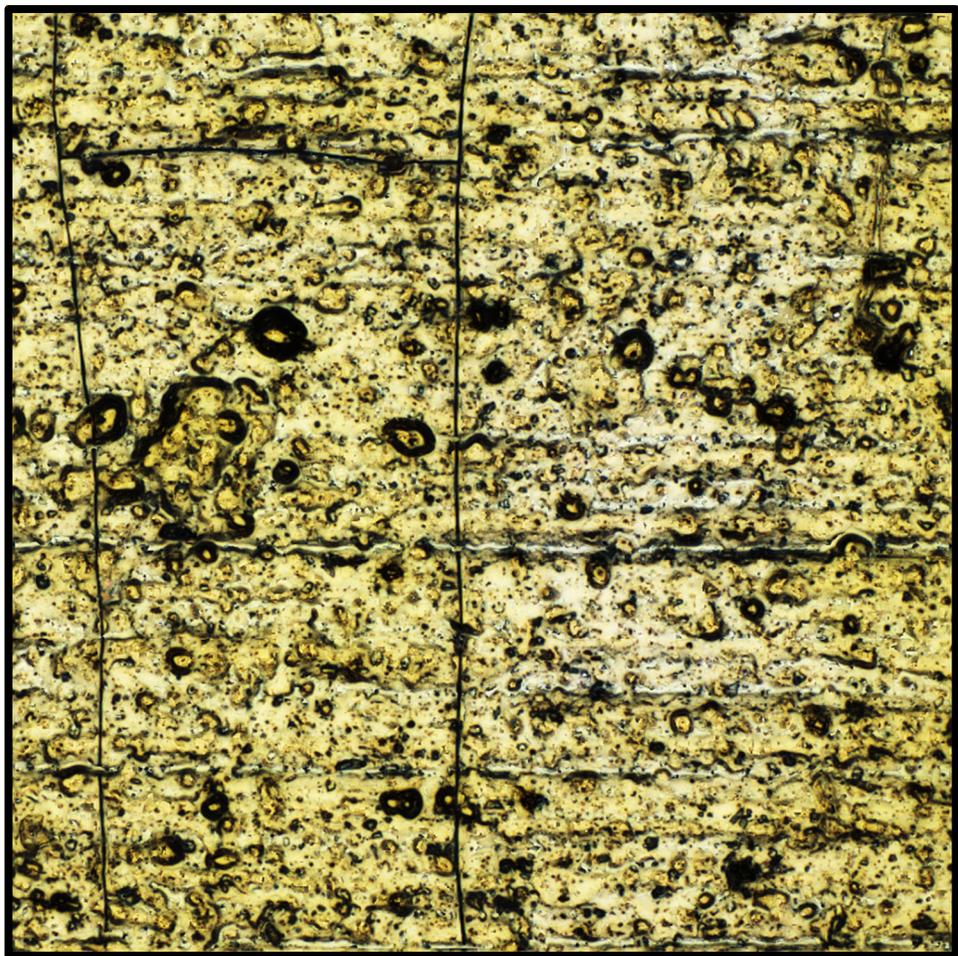


Figure 5.3 Surface d'aluminium scellé agrandissement 50X

5.2 Impression du capteur résistif

Les capteurs de températures sont fabriqués à l'aide d'une imprimante Céradrop Série-X utilisant une cartouche Dimatix/Fuji de 12 buses. Une encre d'argent DGP 40TE-20C de Advanced Nano Products a été choisie pour l'ensemble des expérimentations. Son excellente conductivité et sa facilité d'impression sont deux caractéristiques qui justifient le choix de cette encre dans ce cas-ci. La viscosité de l'encre et la dispersion des particules permettent une déposition et une stabilité étonnante (voir l'ANNEXE I). Dans son article (Trudeau, 2021, p. 126), discute en profondeur des caractéristiques de cette encre et il mentionne des paramètres optimaux à considérer pour un nombre de couches données. Dans le cas présent, le nombre de couches étant plus grand et le type de structure imprimé étant différents, un autre type de remplissage a donné de meilleurs résultats. La quantité d'encre par couche et le nombre de couches imprimées (8) sont gardés fixes, tout au long de l'expérimentation, afin de réduire le nombre de variables influençant la répétabilité des propriétés des capteurs. La thèse de Trudeau détaillant bien les performances de cette encre. C'est cette dernière qui fut choisie pour l'ensemble des expérimentations.

La surface est préparée, comme mentionnée précédemment, avant d'imprimer le capteur. Après une étape de séchage au four, une couche de polymère est appliquée afin de prévenir l'oxydation de l'argent. Le tout est ensuite mis au four pour fritter les particules d'argent.

Le capteur consiste en un serpentín de 30 mm x 20 mm avec des traces de 500 um et des espacements de 500 um ainsi que deux points de connexion pour faciliter le branchement de câbles (Figure 4.7).

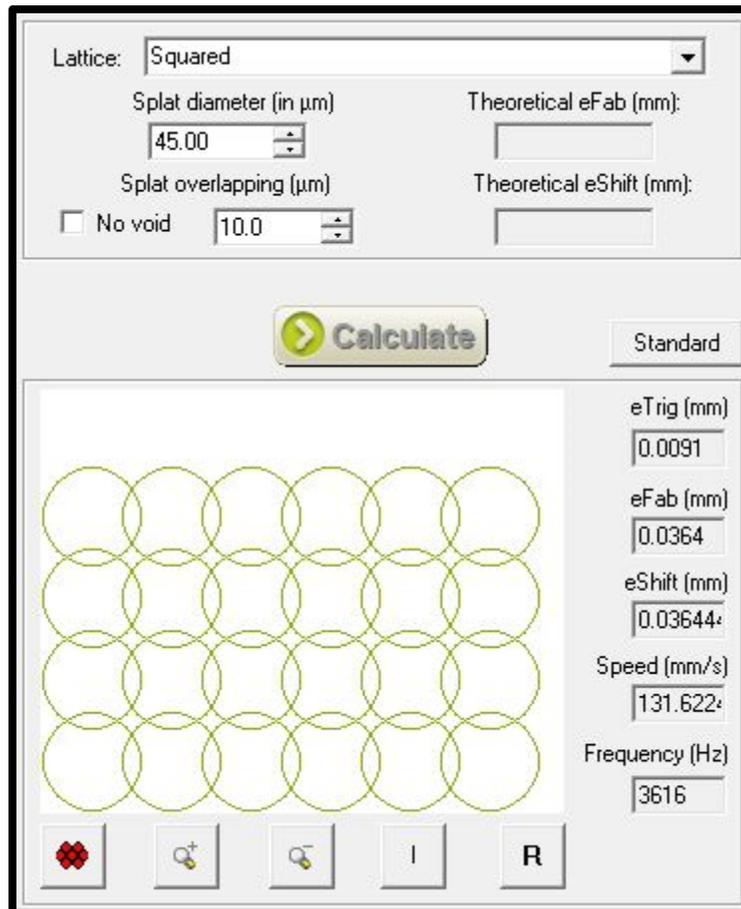


Figure 5.4 Remplissage carré du logiciel Ceraslice

Un total de huit couches sont imprimées avec un remplissage de type carré, tel que présenté à la Figure 5.4. Ce nombre de couches provient d'expériences passées en impression de traces similaires. Huit couches permettent d'obtenir une bonne uniformité et dans le cas présent, résultent en une résistance de base acceptable pour le capteur fabriqué. Dans le cas présent, un remplissage carré permet une meilleure conformité de déposition pour des courbes, comme celles présentes dans le capteur imprimé à la Figure 4.7. La Figure 5.5 montre l'effet d'une trop grande superposition dû à un trop grand nombre de gouttelettes déposées en même temps (type de remplissage « centered square » à la place de « square »). Certains endroits montrent des courts-circuits qui sont dus à un remplissage trop rapide, ce qui ne laisse pas suffisamment de temps à l'encre de sécher uniformément. Cet inconvénient est appelé « bavure ».

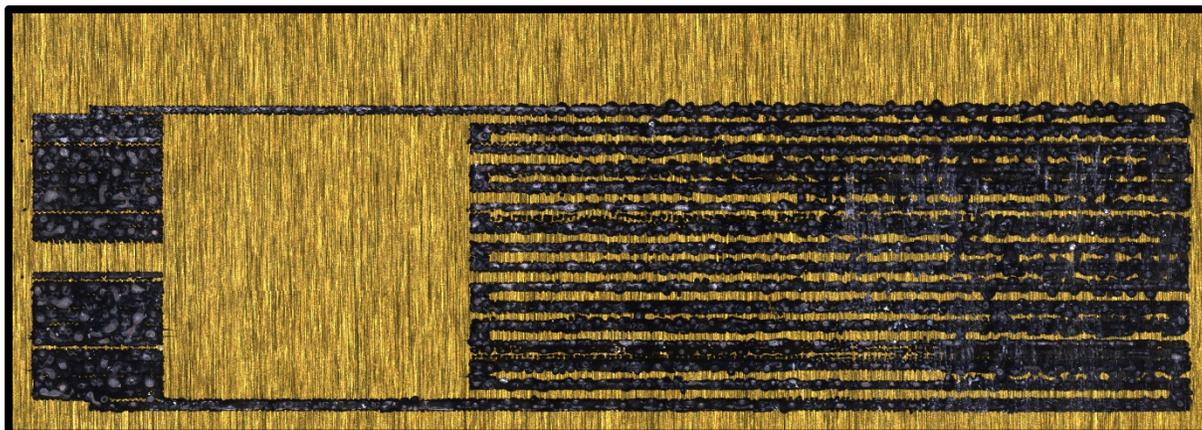


Figure 5.5 Effet d'un type de remplissage carré centré et d'un croisement de trame trop faible

Il est important de préciser que l'option « interleaving between layers » est activée, ce qui permet de remplir les espaces vides laissés par la couche précédente, tout en respectant les contours de l'impression. Un autre paramètre appelé « raster overlap » est aussi déterminé à 50% du diamètre de la gouttelette pour permettre de limiter les interstices entre les trames. Voir Figure 5.6. Leur effet peut être vu à la Figure 5.5 qui montre un croisement de trame trop faible, ce qui crée un interstice entre les passages de la tête d'impression.

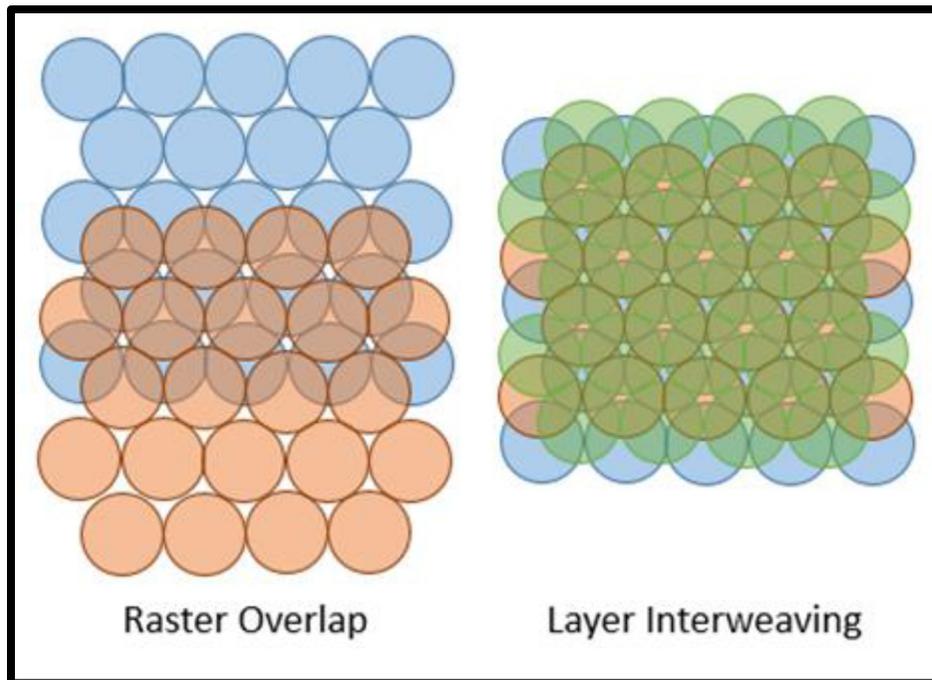


Figure 5.6 La différence entre le "Raster Overlap" et le "Layer Interweaving"
Tirée de Trudeau (2021, p. 120)

Comme la Figure 5.7 le montre, avec la préparation de la surface, les gouttelettes sont de $\text{Ø}45\mu\text{m}$, lorsqu'elles sont déposées sur le substrat. Le remplissage est optimisé par itération subséquente afin de maximiser la couverture, tout en évitant une trop grande superposition des gouttelettes. En effet, cela peut entraîner une agglomération d'encre qui cause, par la suite, un appauvrissement de particules d'argent à certains endroits adjacents aux agglomérations. L'uniformité de déposition et l'épaisseur de la déposition permettent un meilleur contrôle des propriétés du capteur en garantissant une conductivité uniforme. Cela permet un meilleur rapprochement des propriétés des capteurs les uns par rapport aux autres. Dans le cas présent, l'uniformité de remplissage est optimisée en s'assurant de la continuité du serpentin et de la présence de courts-circuits. Comme la taille des traces est près de la taille des gouttelettes, il est plus simple de s'assurer de l'uniformité de déposition. Ces paramètres d'inspection visuels sont suffisants pour l'optimisation présentée dans ce travail. Dans les expérimentations de (Trudeau, 2021), la température du plateau d'impression ne dépasse pas 40°C alors que dans

les expérimentations présentées ici, le plateau est à 60°C. Il a été trouvé qu'une température de plateau plus haute permettait d'éviter grandement l'effet d'agglomération et l'effet de séchage par anneau, aussi appelé « coffee ring effect ». La lampe ADPHOS de la Céradrop est utilisée, après l'application de chaque couche, afin de s'assurer que la majorité du solvant est évaporé, avant d'appliquer la couche suivante. La puissance et la vitesse de déplacement du plateau sont ajustées afin d'éviter un séchage trop rapide, qui causerait, à son tour, une porosité supplémentaire ou une mauvaise adhésion de l'encre sur le substrat. Une puissance de 50% et une vitesse de 10mm/s ont été utilisées pour l'ensemble des échantillons. Ces paramètres ont permis l'impression de couches successives tout en assurant que la couche précédente était totalement sèche. Ces valeurs ont été basées sur les résultats de traitement thermique infrarouge de (Trudeau, 2021) qui mentionne qu'il n'est pas possible de cuire l'encre simplement avec la lampe. L'encre nécessite plutôt une cuisson au four, telle que mentionnée par le fabricant de l'encre.

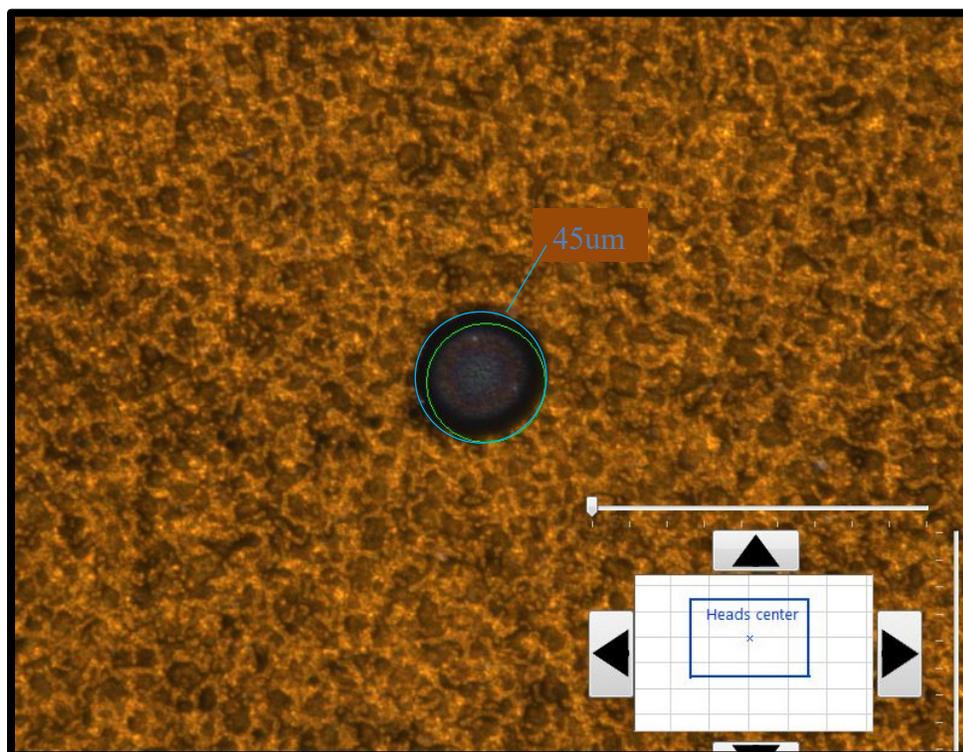


Figure 5.7 Taille d'une gouttelette sur le substrat

5.3 Mesure de la conductivité électrique

La variation de conductivité en fonction de la température est mesurée en utilisant un enregistreur de donnée Keithley DAQ6510 pour mémoriser les valeurs de résistivité ainsi que la température interne du four Mancorp MC310N. Quatre cycles sont effectués afin d'assurer l'uniformité des 14 capteurs. Ces derniers sont connectés à l'appareil de prise de données Keithley en utilisant des câbles de bobinage en cuivre vernis de taille 28AWG. Un époxy conducteur CW2400 (ANNEXE II) est utilisé pour connecter les câbles avec les capteurs.

5.4 Précision, continuité et respect des dimensions

Une vérification optique est effectuée afin de vérifier l'uniformité de la déposition, à l'aide d'un microscope LEXT d'Olympus. Le microscope permet l'acquisition d'images ainsi qu'une observation topologique de la surface. L'épaisseur et l'uniformité de l'impression sont donc mesurées sans contact avec les résultats du LEXT. Une vérification de l'épaisseur périodique a été effectuée pour s'assurer qu'il n'y avait pas de défauts majeurs qui auraient pu expliquer le non-fonctionnement d'un dispositif. La Figure 4.7 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** illustre que le serpentín est uniforme et qu'il ne présente pas de courts-circuits. La rugosité n'a pas été mesurée dans cette expérimentation.

5.5 Adhésion des traces

Afin de vérifier l'adhésion des traces d'argent, un test suivant la norme ASTM D 3359 est effectué sur l'ensemble des capteurs. Plus précisément, il consiste à appliquer une bande de ruban adhésif 3M Scotch 600 sur l'impression et de la retirer, par la suite, lentement, de manière perpendiculaire au substrat. Si l'impression reste attachée au substrat, le test est réussi. Toutes les impressions ayant couvert la surface de façon convenable ont réussi le test. L'uniformité d'impression joue un grand rôle dans l'adhésion, car les échantillons moins uniformes ont fourni des résultats moins constants. La totalité des traces imprimées a réussi le test sans aucun manquement. Cependant, certaines d'entre elles présentaient des courts-circuits

et ont été mises de côté. L'application du polymère étant fait à la main, il est possible que certaines zones n'aient pas été correctement préparés. La Figure 5.8 montre un aperçu des capteurs connectés et branchés.

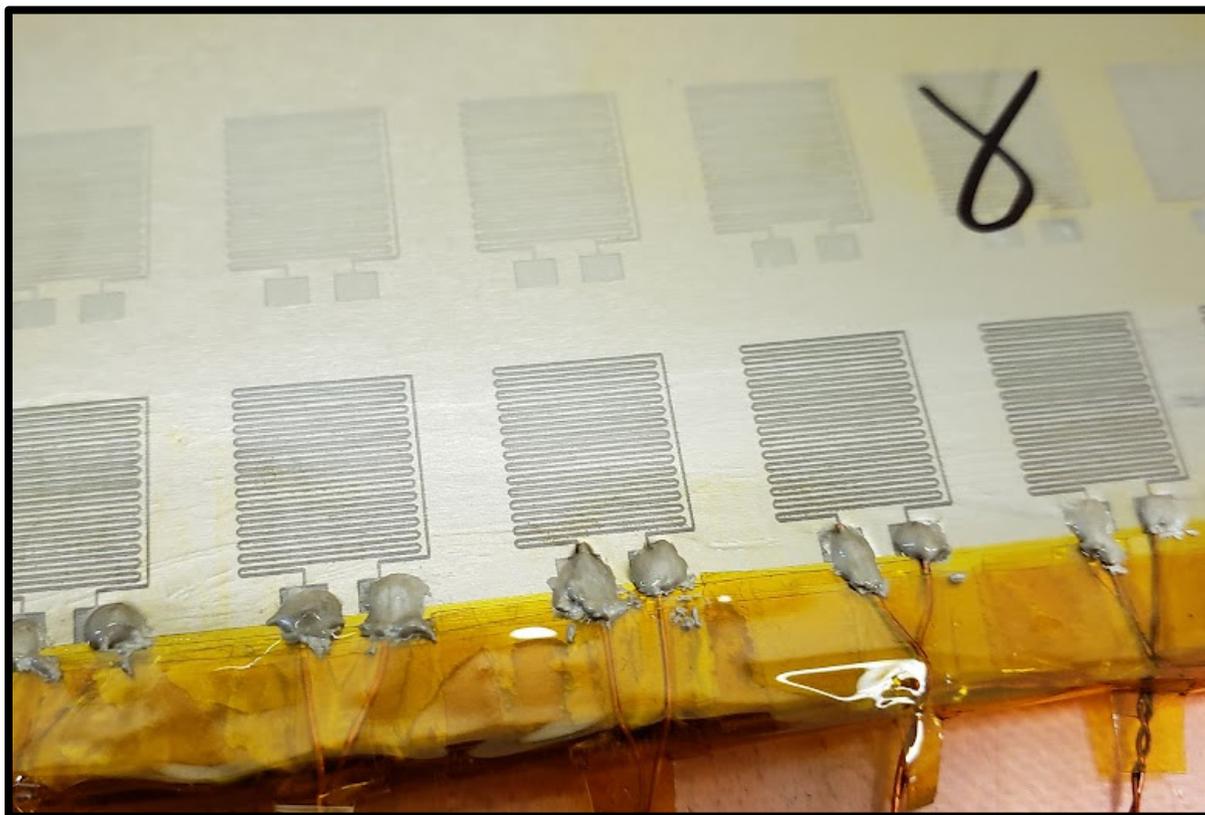


Figure 5.8 Capteurs imprimés et connectés.

CHAPITRE 6

Analyse des résultats et discussion

6.1 Frittage de l'encre d'argent

Après avoir fritté l'encre d'argent, pendant une période d'une heure et de cinq heures, le microscope électronique à balayage n'a pas permis d'observer de changement. La Figure 6.1 permet d'observer que les cols de frittage sont identiques pour l'expérimentation d'une durée de cinq heures (b) et celle de 60 minutes (a).

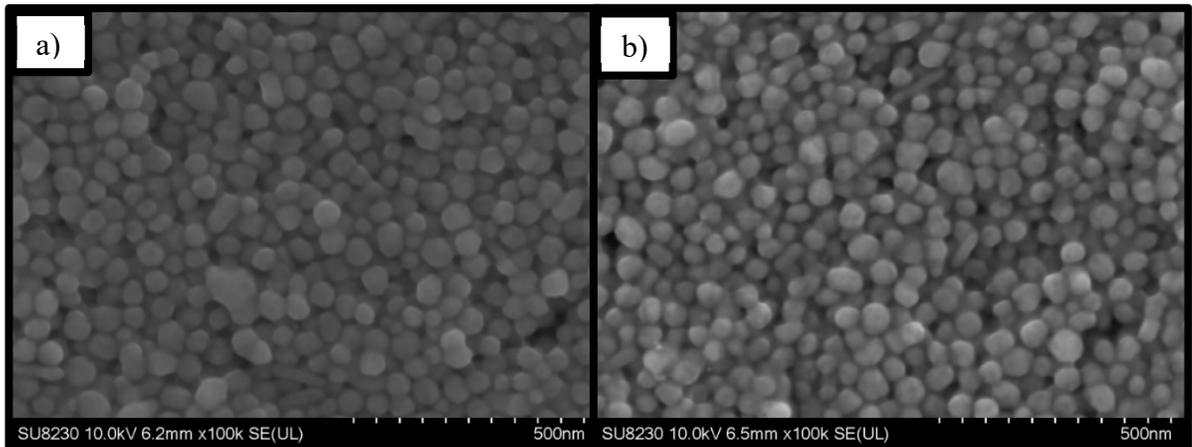


Figure 6.1 Image prise au microscope électronique à balayage des échantillons frittés une heure a) et cinq heures b)

Les résultats de cette expérimentation ont permis d'observer que le frittage ne semble pas différer d'un frittage d'une heure ou de cinq heures. Cette observation, combinée à l'observation d'une réduction de la résistance de base des capteurs, peuvent être expliquées avec la littérature qui indique que la croissance des grains à l'intérieur des particules d'encre d'argent est un facteur important qui affecte la conductivité électrique (J.-W. Park & Baek, 2006). Il est supposé que le frittage de la couche supérieure n'ait pas changé après la deuxième cuisson, ce qui ne permet pas de visualiser les interactions entre les particules. En effet, après un certain temps, les grains ne peuvent plus grossir en raison de la taille des particules. Bien que la taille des grains n'ait pas été mesurée dans le cadre de cette expérimentation, des études antérieures

ont démontré qu'un plateau pouvait être atteint après un certain temps, selon la température à laquelle les particules sont exposées (Dannenberg, Stach, Groza, & Dresser, 2000 ; Frazier, Hu, Overman, Lavender, & Joshi, 2018 ; Wu, Zhao, Zheng, & Ding, 2011). Il est important de porter une attention particulière au fait que la conductivité électrique d'un matériau dépend en partie de sa cristallinité et que la taille des grains est un facteur clé qui influence la cristallinité (Abbas, Seo, Park, Kim, & Kim, 2017 ; Bishara, Lee, Brink, Ghidelli, & Dehm, 2021). Ainsi, une augmentation de la taille des grains à l'intérieur des particules d'encre d'argent peut conduire à une amélioration de la conductivité électrique. Cela explique la raison pour laquelle la conductivité électrique des traces imprimées a atteint un plateau après un certain temps, malgré le fait que le frittage ait été complété en une heure.

Ces résultats démontrent l'importance de la maîtrise des conditions de frittage, lors de la fabrication de capteurs et d'autres dispositifs électroniques. En effet, l'optimisation des conditions de frittage peut conduire à une amélioration significative de la conductivité électrique des matériaux et, ainsi, à une performance accrue des dispositifs électroniques (Abbas et al., 2017).

6.2 Conductivité électrique

La variation de conductivité est fonction de la température et elle est dictée par l'équation (6.1).

$$R = R_0 (1 + \alpha \Delta T) \quad (6.1)$$

Où :

R est la résistance obtenue,

R_0 est la résistance du conducteur à température T_0

α est le coefficient de température (sensibilité)

ΔT est la variation de température observée

En réorganisant l'équation, il est possible d'isoler le coefficient α .

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \frac{\Delta R}{\Delta T} \quad (6.2)$$

Le coefficient de variation de résistance, selon la température donnée par la pente de la courbe de tendance, correspond à la partie de droite de l'équation soit $\frac{\Delta R}{\Delta T}$. La résistance de base R_0

Peux être calculé avec l'équation (6.3).

$$R_0 = \rho * \frac{L}{A} \quad (6.3)$$

Où ρ est la résistivité linéaire de la trave, L la longueur de la trace et A l'aire de la section de la trace. Ces équations serviront à vérifier si les valeurs mesurées sont plausibles ou non.

Les expérimentations se sont déroulées en 3 séries. La première série fut exécutée suite au frittage d'une heure. La deuxième et troisième ont été effectuées avec l'échantillon fritté 5h. La série 1 ne comportait qu'un seul cycle. La série 2 et 3 comportait 4 cycles. Un cycle consiste à une montée et une descente en température. La première série effectuée a démontré une grande valeur d'hystérésis, ce qui invalide la réponse donnée par les capteurs. (Figure 6.2). C'est pourquoi un seul cycle fût effectué à ce stade.

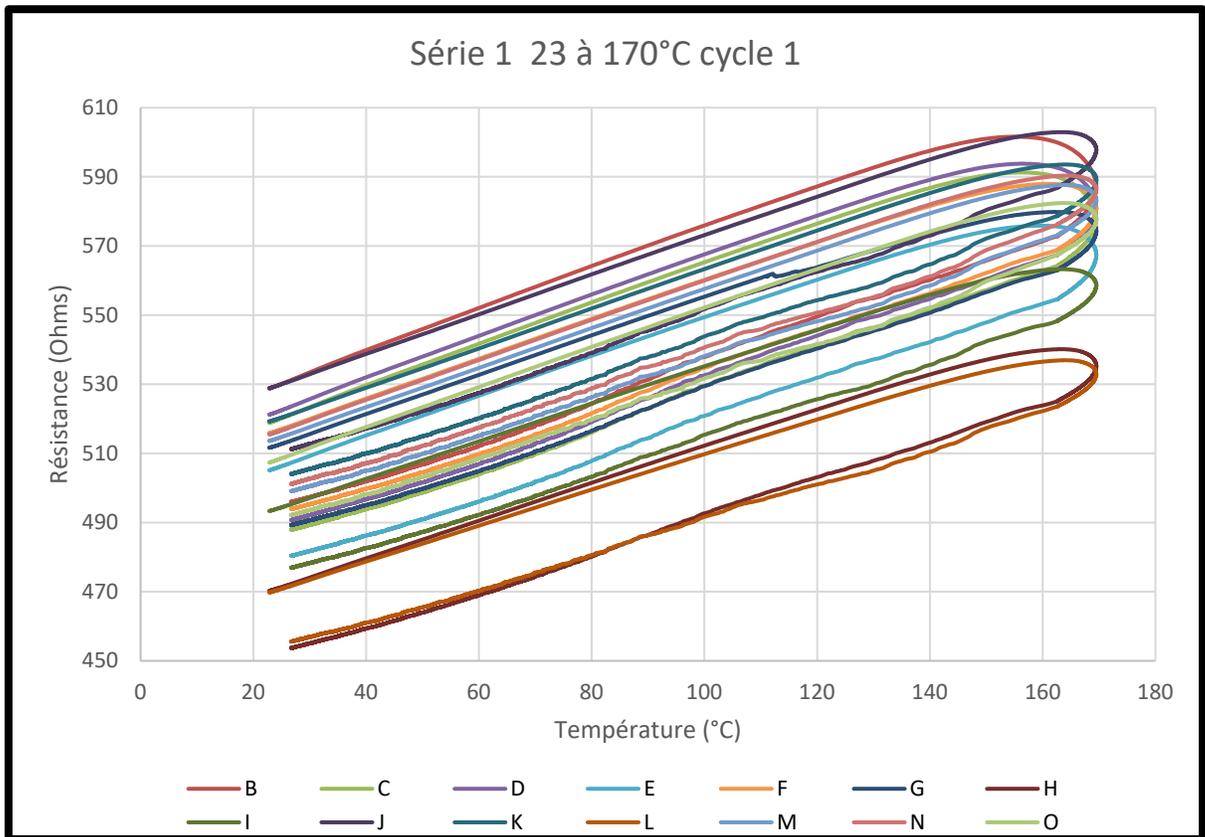


Figure 6.2 Résistance électrique selon la température cycle initiale Série 1

Cependant, cette valeur diminue, de plus en plus, à chaque cycle (ANNEXE IV). Cela indique que le frittage de l'encre n'est pas complet. Après un frittage de cinq heures à 170°C de plus, les valeurs entre les cycles se stabilisent et la valeur de la pente moyenne de la courbe de tendance linéaire est de $0.43 \Omega/^\circ\text{C}$. Le temps de frittage augmente l'interaction entre les particules métalliques. Il est important de préciser que le temps optimal de frittage n'est pas étudié dans cet ouvrage. Un temps de cuisson réduisant l'hystérésis au maximum a été utilisé afin d'assurer une stabilité, lors de l'ensemble des tests.

Avec l'équation (6.2), il est possible de calculer le coefficient de température α . Le Tableau 6.1 rassemble l'ensemble des valeurs calculées pour obtenir la moyenne des capteurs. Plus le

coefficient thermique est élevé, plus le capteur est sensible. Le coefficient moyen obtenu est de $1.19 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Cette valeur est supérieure aux thermocouples imprimés en argent par jets d'encre mentionnés dans la littérature avec un coefficient de $10.8 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ en moyenne (Liew, Q. J., & Lee, H. W., 2020). La valeur du coefficient de température alpha de l'argent homogène est de $3.8 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Cette différence pourrait être expliquée par une dilatation du substrat, ce qui fait varier la conductivité du matériau de façon plus importante. Elle pourrait aussi être due à la cohésion entre les particules d'argent. Le matériau n'étant pas 100% dense, les propriétés physiques et électriques ne peuvent pas être celles du matériau brut. La seule variable susceptible de faire varier la valeur du R_0 est la valeur de résistivité linéaire du matériau. La densité du matériau affecte directement sa conductivité (Cooper, Erikson, & Oliver, 2021).

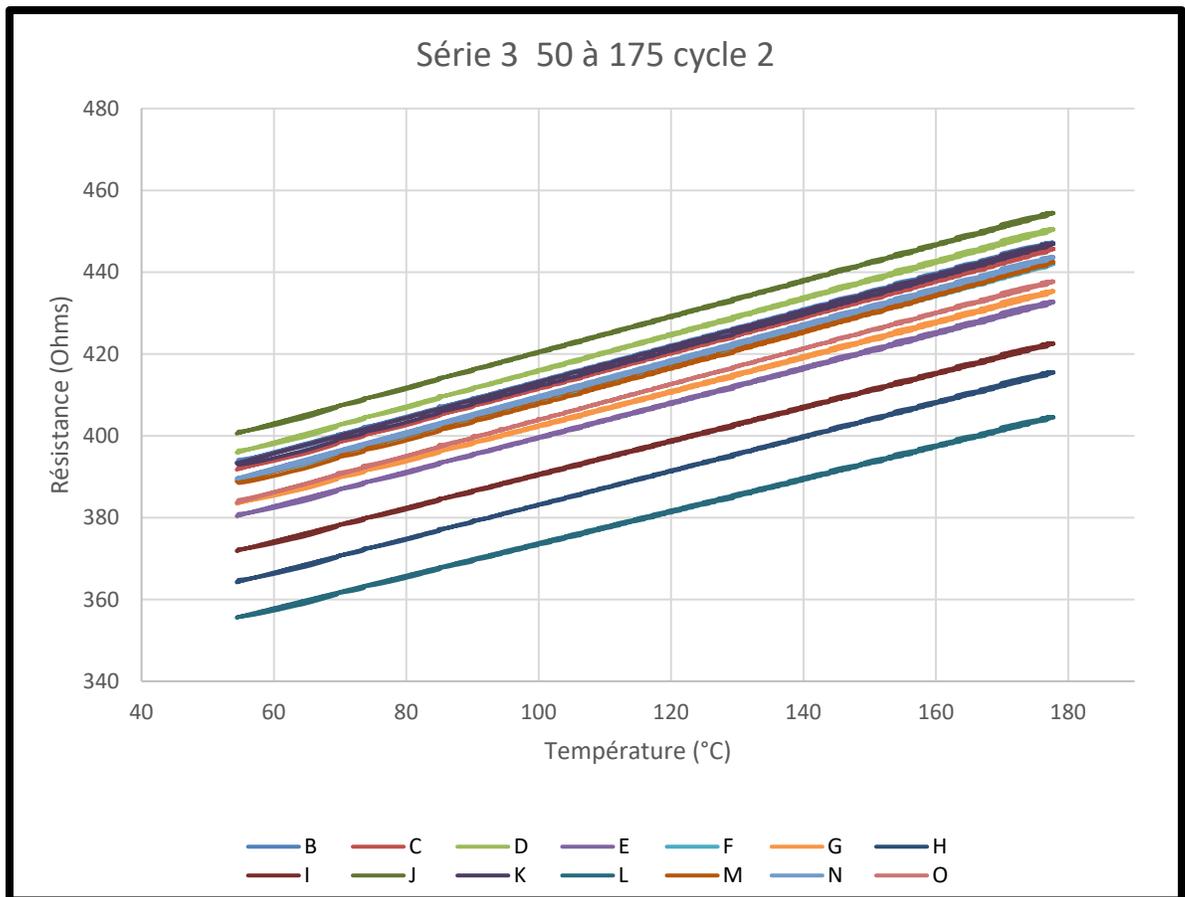


Figure 6.3 Résistances électriques selon la température cycle initiale Série 3 Cycle 2

Tableau 6.1 Valeur de résistance initial, coefficient de température et de conductivité électrique pour l'ensemble des capteurs

	B	C	D	E	F	G	H
R₀	369.80	367.81	371.66	357.14	365.78	360.35	341.53
α * E-3	1.177	1.191	1.192	1.190	1.172	1.169	1.219
ρ	3.85E-05	3.82E-05	3.86E-05	3.71E-05	3.80E-05	3.75E-05	3.55E-05
	I	J	K	L	M	N	O
R₀	349.42	376.75	369.00	333.84	364.65	365.57	360.18
α *E-3	1.178	1.161	1.186	1.192	1.200	1.201	1.212
ρ	3.63E-05	3.92E-05	3.84E-05	3.47E-05	3.79E-05	3.80E-05	3.75E-05

Malgré une résistivité initiale différente pour chacun des capteurs avec un écart moyen de 9 Ω, leurs croissances s'avèrent pratiquement identiques. Cette variation de résistivité initiale peut être attribuée à des différences d'impressions ou de connexions. Les erreurs d'uniformité d'impressions sont probablement la principale cause de cette variation de résistivité de base. Prenons la valeur théorique de R₀ donné par l'équation (6.3. Avec ρ égale à 1.65*10⁻⁶ Ωcm, L égal à 32.4cm et une aire égale à l'épaisseur de la trace mesurée 1.7 um fois la largeur de 200um. La valeur théorique R₀ est donc de 15.68 Ω. Si on y ajoute l'augmentation de la résistivité avec l'équation (6.1 et un alpha théorique de 0.0038°C⁻¹ pour une différence de température de 50°C, on obtient une valeur de 18.6543 Ω. si nous faisons varier l'épaisseur à 2 um à la place de 1.7 um pour simuler une variation d'épaisseur de dépôt, nous obtenons alors une résistance R₀ de 13.32 Ω. Ce changement de dimension de 17% entraine une réduction de la résistance de 15%. Il est donc possible de croire qu'en combinant des variations en épaisseur et en largeur sur une distance de 32.4cm, la valeur de la résistance R₅₀ puisse varier de 9 Ω entre les capteurs. L'oxydation du capteur est aussi une source possible de variation, mais étant donné que tous les capteurs ont été imprimés, simultanément dans les mêmes conditions, ce facteur est considéré comme faible. En outre, la stabilité de l'éjection de l'encre a été vérifiée, avant et après l'impression, pour assurer le fait qu'aucune buse n'avait cessé de fonctionner, écartant, ainsi cette possibilité. Enfin, l'impression uniforme dans l'axe des « X » permet également d'éliminer toute variation potentielle d'épaisseur de dépôt due à une valeur d'entrelacement des balayages.

La sensibilité offerte par une valeur de variation de résistivité de $0.43 \Omega/^{\circ}\text{C}$ est nettement supérieure à celle des capteurs de température à base d'argent imprimé sur un substrat flexible par l'expérience de Sui, Kreider, Bogie et Zorman, qui indiquait une variation moyenne de $0.25\Omega/^{\circ}\text{C}$ (Wang et al., 2020) ou du capteur en argent de Liew cité précédemment avec une sensibilité moyenne de $0.0743\Omega/^{\circ}\text{C}$ (Liew, Q. J., & Lee, H. W. ,2020). Cette découverte encourage à explorer les conditions de frittage optimales pour réduire le temps de production, tout en garantissant la stabilité à haute température. L'utilisation d'une tête d'impression plus performante pourrait également permettre une fabrication plus uniforme et à plus haut volume, tout en offrant la possibilité d'ajuster la résistance initiale du capteur et en variant la quantité d'encre déposée. En outre, une modification du serpentin pourrait faciliter l'impression et réduire les variations de résistance entre les capteurs.

CONCLUSION

Afin de produire un capteur de température sur une surface en aluminium, des dispositifs de mesure de température résistifs ont été imprimés à l'aide d'encre d'argent sur un substrat d'aluminium anodisé. Une couche isolante polymérique a été appliquée pour sceller l'aluminium. Au total, 14 dispositifs ont été testés et les résultats ont démontré des comportements similaires avec un facteur de variation de la résistance de $0,43 \Omega/^{\circ}\text{C}$. Grâce à ce procédé, il est possible d'imprimer numériquement des capteurs de température sur un substrat d'aluminium anodisé. Cela réduit ainsi la complexité d'assemblage de certains équipements nécessitant de nombreux capteurs et diminue les besoins en câblage et la complexité du positionnement de capteurs. Il est alors possible d'utiliser le dissipateur de chaleur comme point de mesure de température.

L'encre utilisée pour l'impression est un facteur crucial pour garantir une impression stable et précise. Les nombres de Reynolds et d'Ohnesorge permettent d'identifier les facteurs importants à travailler en fonction du comportement de l'encre lors de son éjection. La viscosité et la tension de surface jouent un rôle clé dans le comportement de l'encre et déterminent si elle peut être utilisée pour l'impression.

La réalisation d'un frittage de qualité pour l'encre d'argent est une tâche plus complexe qu'initialement prévu, car plusieurs facteurs doivent être pris en compte pour obtenir une conductivité électrique optimale et stable. Bien que le processus de frittage puisse être achevé, les propriétés électriques peuvent ne pas être stables dans tous les cas. La conductivité des traces imprimées est considérablement améliorée par la croissance des grains à l'intérieur des particules qui atteint un plateau après une certaine période. Même après une observation minutieuse des particules à l'aide d'une analyse SEM des échantillons frittés pendant une période d'une heure et de cinq heures, aucune différence significative n'a été observée. Seule la conductivité électrique a augmenté à la suite d'une exposition prolongée, en raison de la croissance des grains.

La Céradrop a permis de contrôler avec précision la déposition de l'encre d'argent en offrant une grande variété de paramètres d'impression. Le positionnement de chaque gouttelette peut être modifié et optimisé en fonction du temps d'impression et de séchage de l'encre. Toutefois, il est difficile d'obtenir des résultats stables, car la moindre variation d'éjection peut entraîner un retard de déposition qui réduit la qualité de l'impression. L'utilisation d'une encre contenant des particules pose toujours un risque d'agglomération, ce qui peut entraîner ce type d'erreur. Le temps d'impression avec une cartouche de 12 buses est également très long. La tête d'impression doit se déplacer sur une plus grande distance, ce qui augmente le risque d'erreur. L'utilisation d'une tête d'impression plus grande réduirait considérablement la variation de conductivité des capteurs. Étant donné que la vitesse maximale de la tête est limitée à 500 mm/s, le temps d'impression est augmenté. Les capacités de la cartouche d'impression ne peuvent pas être maximisées.

Cette expérience a permis de constater la faisabilité d'imprimer des capteurs de température résistifs par jets d'encre sur une surface d'aluminium anodisé. Pour obtenir le meilleur résultat possible, la résistance entre la source de chaleur et le capteur doit être minimisée tout en évitant que le capteur fasse court-circuit avec le substrat d'aluminium. L'implémentation de ce type de capteurs directement sur des dissipateurs de chaleur en aluminium pourrait améliorer grandement la précision et l'efficacité des mesures sans affecter les performances du dissipateur.

La prochaine étape consisterait à intégrer la fabrication de ces capteurs à une production à plus grande échelle. Cela permettrait de valider la viabilité de cette technique de fabrication à des fins industrielles à moyen volume. Il serait également possible d'optimiser le positionnement et les caractéristiques des capteurs en fonction des besoins futurs.

ANNEXE I

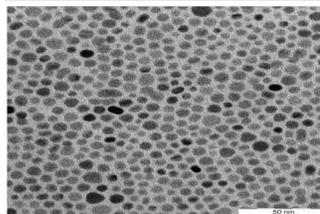
ANP DGP 40TE-20C

Nano-silver Ink for inkjet printing

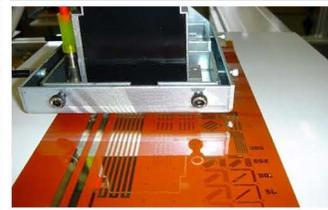
Silver Jet Ink



TEM image of Silver ink.



Silver ink Patterning image



Product Description

Nano silver particles uniformly dispersed in polar or non-polar solvent as high solid content with low viscosity for ink jet application.

Printed fine electrodes offer bulk silver conductivity even at low temperature curing conditions.

Product Characteristics

- Excellent ink stability for long term storage.
- Excellent conductivity as low as bulk silver.
- High solid % ink with superior jetting performance.
- Approved jetting performance by most of major inkjet head makers (Dimatix, Xaar, Konica-Minolta Head)
- Good adhesion to plastic and glass substrates.
- Wide range of curing temperatures (150 oC-600 oC).
- Direct printing of fine patterning with low production cost.

Product Specification

Product Information

Properties	Product Categories				
	DGP 40LT-15C	DGP 40TE-20C	DGP 45HTG	DGH 55 LT-25C	DGH 55 HTG
Solid Content	30~35%			53~60%	53~58%
Viscosity (cPs)	10~17 (adjustable)			7~16	
Surface Tension	35~38 (adjustable)			27~30	
Solvent	TGME (Triethylene glycol monoethyl ether)			Tetradecane	
Washing Solvents	Polar Solvents: Ethyl Alcohol, IPA etc.			Non-Polar Solvents: Xylene, Hexane, Octane etc.	
Curing Temp.	120~150℃	180~200 ℃	400℃~550℃	250℃	400℃~550℃
Specific Resistivity (μΩ·cm)	11~12	5~9	2~3	2.4~3.0	2.0~2.5
Substrate	Plastic films	ITO Glass Bare Glass	ITO Glass Bare Glass	Polyimide film	ITO Glass Bare Glass

※ Alcohol, Water also usable as dispersion solvent upon customer's request.

※ Viscosity and surface tension can be modified upon customer's request.

Product Applications

- Solar Cell Electrode • MLCC Electrode • PCB Board • RFID
- PDP Electrode • Other Plastic Electronics

ANNEXE II

Spécification époxy CW2400

CHEMTRONICS Technical Data Sheet

TDS # CW2400

CircuitWorks[®] Conductive Epoxy

PRODUCT DESCRIPTION

CircuitWorks[®] Conductive Epoxy is a two part, silver epoxy used in prototype, repair and general conductive bonding applications. CW2400 features strong mechanical bonds, excellent electrical conductivity, and quick room temperature curing. CircuitWorks[®] Conductive Epoxy bonds aggressively to a wide variety of materials.

- Two-component product
- Simple mixing ratios
- Excellent electrical conductivity
- Fast curing
- High strength bond
- Bonds dissimilar surfaces
- Operating temperature range from
- -91°C (-131°F) to 100°C (212°F)

TYPICAL APPLICATIONS

CircuitWorks[®] Conductive Epoxy may be used for electronics applications including:

- Conductive Bonds Between Heat Sensitive Components
- Solderless Surface Mount Connections
- Circuit Board Trace Repair
- Static Discharge and Grounding
- Solder Repair
- Conductive Structural Adhesions

TYPICAL PRODUCT DATA AND PHYSICAL PROPERTIES

Composition		
Material	Part A Part B	Epoxy Hardener
Specific Gravity (Parts A & B Mixed)		4.0
Cured Compound		
Volume Resistivity		<0.001 ohm-cm
Thermal Conductivity		
Cal-cm/sec-cm ² -°C		3.8 x 10 ⁻³
BTU-in/hr-ft ² -°F		11.0
W/m ² K		1.6
Operating Temperature Range		-131 to 212°F (-91 to 100°C)
Lap Shear (ASTM D-1002)		>1200 lbs/in ²
Shore Hardness		>70
Dropping Point (ASTM D-2266)		None @ 650°F (343°C)
Adhesion		Excellent
Cured Flexibility		Excellent
Chemical Resistance		Excellent
Moisture Resistance		Good
Typical Thickness		5 mil
Shelf life		9 months
Conditions: Store at temperatures below 77° F		

COMPATIBILITY

CircuitWorks[®] Conductive Epoxy is generally compatible with most materials used in printed circuit board fabrication. As with any adhesive/sealant, compatibility with substrate should be determined on a non-critical area prior to use.

USAGE INSTRUCTIONS

Read MSDS carefully prior to use.

Cleaning: For best results, clean the board with one of Chemtronics[®] Electro-Wash[®] or Pow-R-Wash[®] cleaners in order to remove any surface contamination which may prevent adequate material contact.

Mixing: Mix equal amounts (1:1) by weight or volume of Part A and Part B. Mix thoroughly for 2 minutes and apply within 8 minutes.

Thinning: Do not attempt to thin.

Curing: Curing times and electrical conductivity depend primarily on temperature. For fastest curing times, maximum conductivity and adhesion, cure the bond between 150-250°F (65-121°C) for 5-10 minutes. CircuitWorks[®] Conductive Epoxy can be room temperature cured at or above 75°F (25°C), for 4 hours. Maximum conductivity and bond strength are achieved in 24 hours. *Curing at temperatures below 75°F (25°C) will result in a loss of conductivity and adhesion.*

Pot Life: 8-10 Minutes at 75°F (25°C) after mixing.

AVAILABILITY

CW2400 7g/ 0.25 oz. Adhesive &
 7g/ 0.25 oz. Hardener

CW2400J 10g/ 0.35 oz. Adhesive &
 10g/ 0.35 oz. Hardener

TECHNICAL & APPLICATION ASSISTANCE

Chemtronics provides a technical hotline to answer your technical and application related questions. The toll free number is: **1-800-TECH-401.**

NOTE:

This information is believed to be accurate. It is intended for professional end users having the skills to evaluate and use the data properly. CHEMTRONICS does not guarantee the accuracy of the data and assumes no liability in connection with damages incurred while using it.

CHEMTRONICS
8125 COBB CENTER DRIVE
KENNESAW, GA 30152
1-770-424-4888

REV. K (08/13)

DISTRIBUTED BY:

--

Mouser Electronics

Authorized Distributor

Click to View Pricing, Inventory, Delivery & Lifecycle Information:

[Chemtronics:](#)

[CW2400](#)

ANNEXE III

Spécification cartouche SAMBA

Dimatix® Materials Cartridge - Samba® Cartridge

Highlights

- Compatible with all DMP-2800 model printers
- Same internal jet design as the industrial-scale Samba G3L printhead
- Easier fluid and waveform transition to Samba G3L printhead

Cartridge Specifications

- Inkjet Technology – Piezoelectric Drop-On-Demand
- PZT Technology – Sputtered
- Nozzle Plate Technology – Si-MEMS with non-wetting coating
- Jet Design – Samba G3L
- Fluid compatibility – Aqueous, Most Organic Solvents, Acrylates^a
- Fluid Module Capacity – 1.5 mL
- Native Drop Volume – 2.4 pL
- Dot Size – 30 μm^b
- Addressable Nozzles – 12 jets
- Native Resolution – 75 DPI^c
- Jetting Frequency – Up to 80 kHz^d
- Printhead Heating – Built-in heater
- Temperature Sensor – Built-in thermistor
- Operating Temperature – Up to 60° C (140° F)
- Shelf Life – 2 years^e
- Other – Non-recirculating; disposable, one-time use



Ideal Fluid Requirements

- Viscosity – 4-8 cps^f
- Surface Tension – 28-32 dynes/cm^g
- Type – Water-based, Solvent-based, UV Curable, Hybrids^g
- Mixture – Homogeneous, sub-micron particle size^h
- pH – neutralⁱ
- Stability – Thermally stable for 2 weeks at 60° C (140° F)^j

Drop Manager Printer Software

- DMP-2850 Printer – Version 3.2 or later
- DMP-2831 Printer – Version 2.1 or later

^a A chemical compatibility test is recommended

^b A 30 μm diameter of an individual printed dot is achievable on a fluid-compatible substrate

^c Nozzles are linearly spaced 338.67 μm apart

^d Due to printer motor limitations, the maximum jetting frequency for printing is 15 kHz

^e The cartridge shelf life changes when fluid is added and takes on the fluid shelf life

^f At jetting temperature; Newtonian fluid behavior is ideal (shear rates can reach above 300,000 s⁻¹ in the industrial-scale Samba G3L printhead)

^g Surface tension outside this range can result in undesired drop satellites and poor drop formation

^h A 0.2 μm or 0.45 μm filter should be used prior to ink/fluid loading

ⁱ Fluids slightly below pH 7 is tolerable however alkaline fluids will accelerate degradation of the silicon nozzle plate

^j No change in viscosity and no agglomeration or particle aggregation that would increase particle size for 2 weeks at 60° C (140° F)



Corporate Office:
FUJIFILM Dimatix, Inc.
2250 Martin Avenue
Santa Clara, CA 95050
USA

Tel: (408) 565-9150
Fax: (408) 565-9151
Email: info@dimatix.com

New Hampshire Facility:
FUJIFILM Dimatix, Inc.
109 Etna Road
Lebanon, NH 03766
USA

Tel: (603) 443-5300
Fax: (603) 448-9870
Email: info@dimatix.com

Japan Office:
Inkjet Business Division
FUJIFILM Corporation
7-3, Akasaka 9-chome
Minato-ku, Tokyo 107-0052
Japan

Tel: +81 3-6271-3971
Fax: +81 3-6271-3972
Email: ff-jhead@fujifilm.com

Europe Office:
Tel: +44 7739 863 505
Fax: +44 870 167 4328
Email: euro@dimatix.com

Korea Office:
Email: mdkorea@dimatix.com

Taiwan Office:
Email: mdtaiwan@dimatix.com

China Office:
FUJIFILM Dimatix China Service Center
Building 30, 1000 Jinhai Road
Pudong New Area, Shanghai
China 201206

Email: china@dimatix.com

Singapore Office:
Email: mdsingapore@dimatix.com

ANNEXE IV

Figures complémentaires capteurs

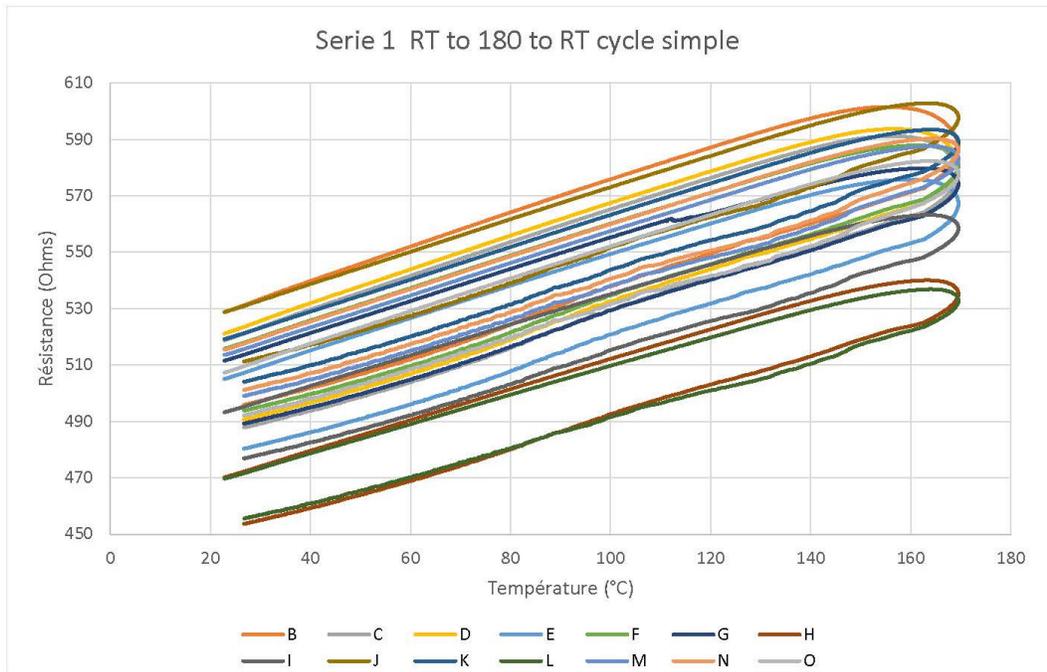


Figure-A IV-1

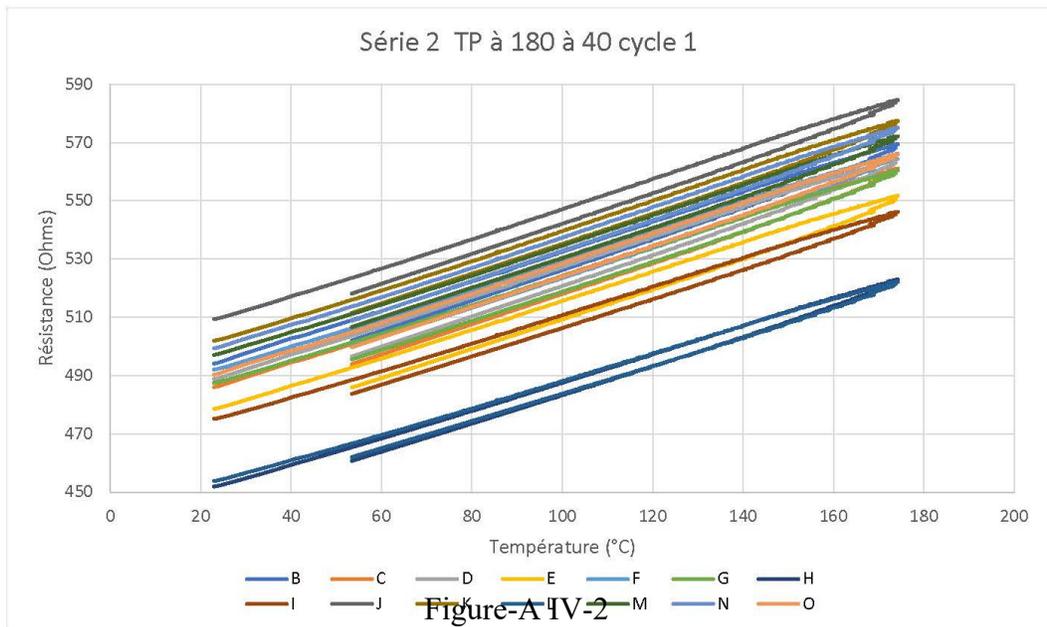


Figure-A IV-2

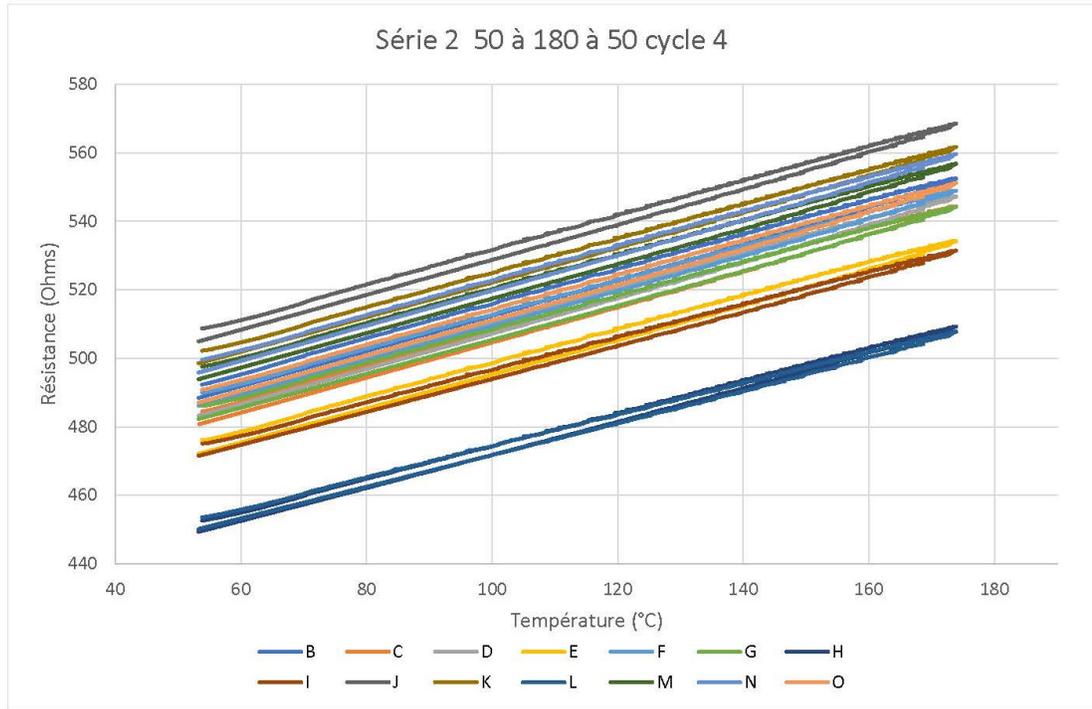


Figure-A IV-3

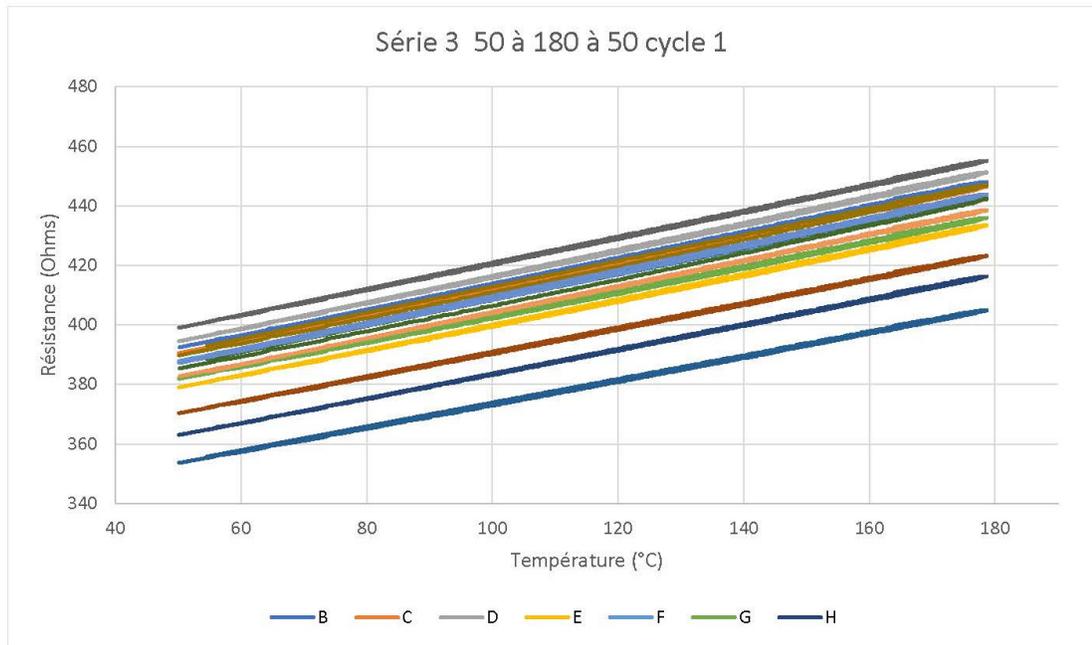


Figure-A IV-4

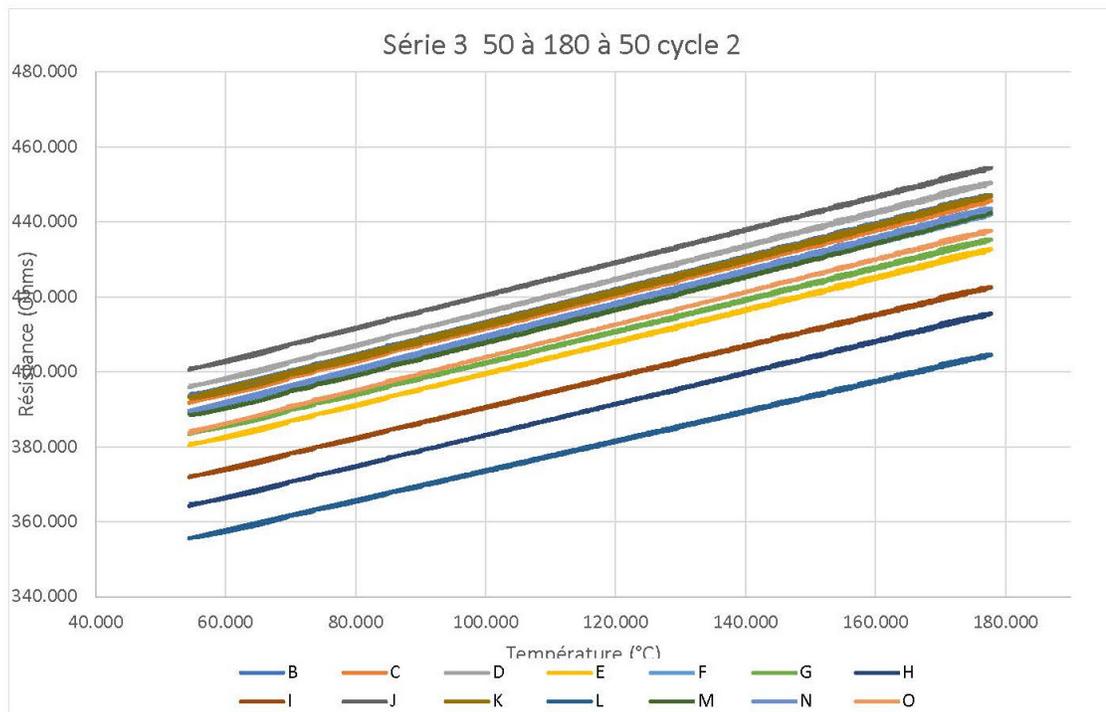


Figure-A IV-5

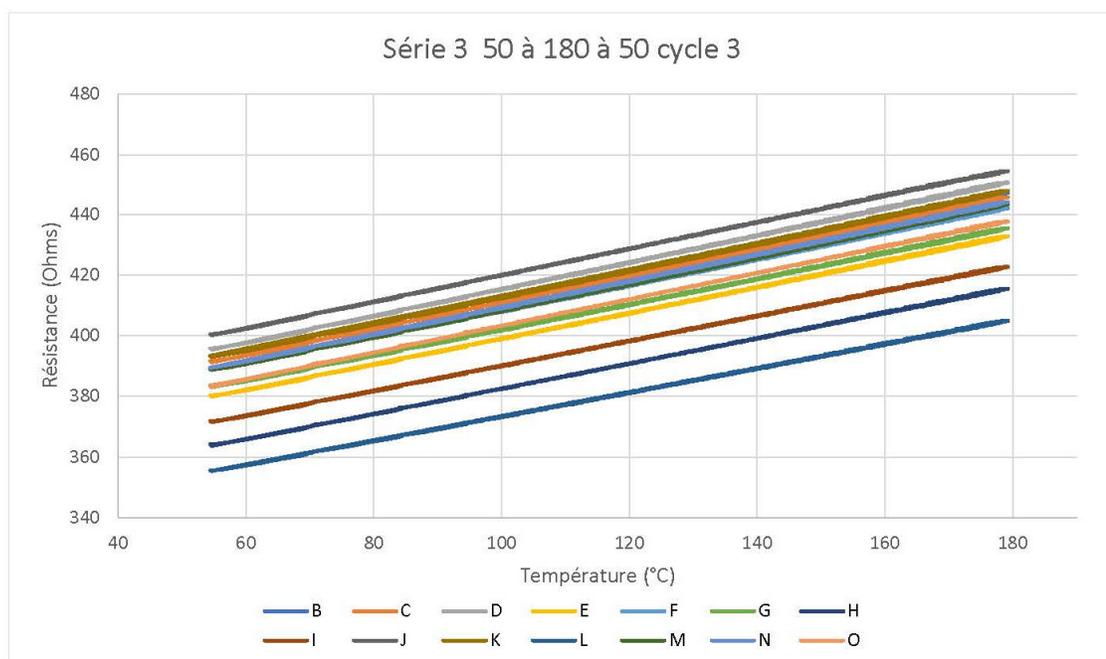


Figure-A IV-6

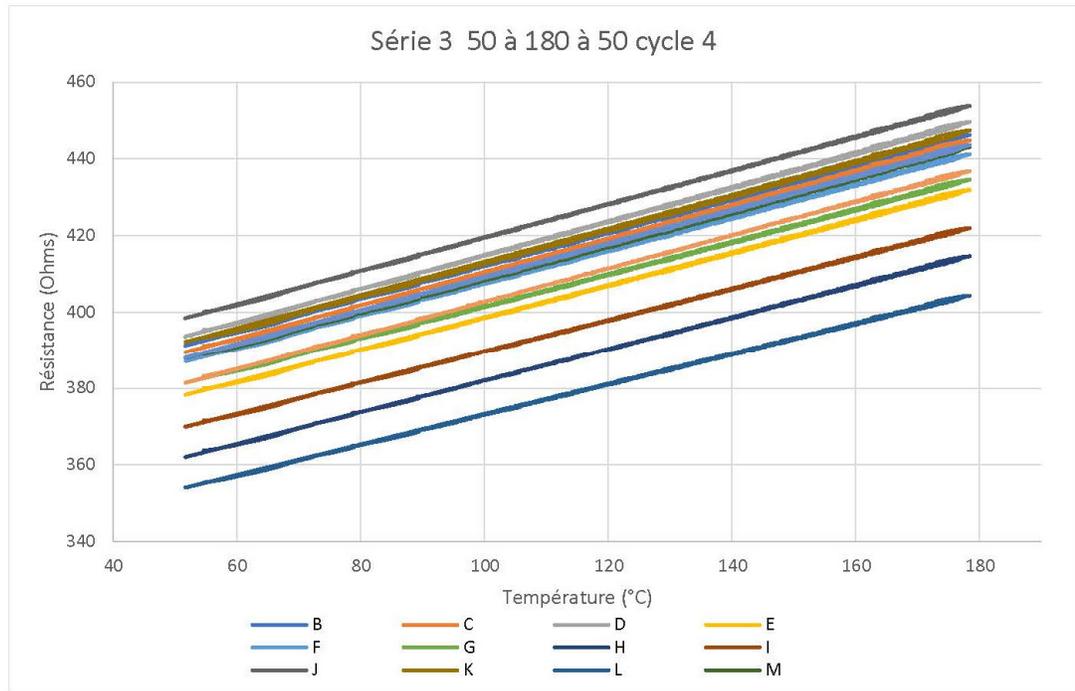


Figure-A IV-7

ANNEXE V

SDS Poly(dianhydride pyromellitique-co-4,4'-oxydianiline)


www.sigmaaldrich.com

FICHE DE DONNÉES DE SÉCURITÉ

Version 8.8
Date de révision 24.05.2023
Date d'impression 28.05.2023

RUBRIQUE 1: Identification de la substance/du mélange et de la société/l'entreprise

1.1 Identificateurs de produit

Nom du produit : Poly(pyromellitic dianhydride-co-4,4'-oxydianiline), amic acid solution

Code Produit : 575828
 Marque : Aldrich
 No.-CAS : 25038-81-7

1.2 Utilisations identifiées pertinentes de la substance ou du mélange et utilisations déconseillées

Utilisations identifiées : Substances chimiques de laboratoire, Synthèses de substances

1.3 Renseignements concernant le fournisseur de la fiche de données de sécurité

Société : SIGMA-ALDRICH CANADA LTD.
 2149 WINSTON PARK DRIVE
 OAKVILLE ON L6H 6J8
 CANADA

Téléphone : +1 905 829-9500
 Fax : +1 905 829-9292

1.4 Numéro d'appel d'urgence

Numéro d'Appel d'Urgence : 800-424-9300 CHEMTREC (USA)
 +1-703-527-3887 CHEMTREC (International)
 24 Hours/day; 7 Days/week

RUBRIQUE 2: Identification des dangers

2.1 Classification de la substance ou du mélange

Classification SGH selon le Règlement sur les produits dangereux (RPD) (SOR/2015-17)

Liquides inflammables (Catégorie 3), H226
 Irritation cutanée (Catégorie 2), H315
 Irritation oculaire (Catégorie 2A), H319
 Mutagénicité sur les cellules germinales (Catégorie 1B), H340
 Cancérogénicité (Catégorie 1B), H350
 Toxicité pour la reproduction (Catégorie 1B), H360

Aldrich - 575828 Page 1 de 13

The life science business of Merck KGaA, Darmstadt, Germany operates as MilliporeSigma in the US and Canada



P308 + P313	si la victime en porte et si elles peuvent être facilement enlevées. Continuer à rincer. EN CAS d'exposition prouvée ou suspectée: consulter un médecin.
P331	NE PAS faire vomir.
P332 + P313	En cas d'irritation cutanée: consulter un médecin.
P337 + P313	Si l'irritation oculaire persiste: consulter un médecin.
P362 + P364	Enlever les vêtements contaminés et les laver avant réutilisation.
P370 + P378	En cas d'incendie: Utiliser du sable sec, une poudre chimique ou une mousse anti-alcool pour l'extinction.
P403 + P233	Stocker dans un endroit bien ventilé. Maintenir le récipient fermé de manière étanche.
P403 + P235	Stocker dans un endroit bien ventilé. Tenir au frais.
P405	Garder sous clef.
P501	Éliminer le contenu/ récipient dans une installation d'élimination des déchets agréée.

2.3 Dangers non classifiés ailleurs

- aucun(e)

RUBRIQUE 3: Composition/informations sur les composants

3.2 Mélanges

Synonymes : Pyre-M.L.® RC-5057

Composant	Classification	Concentration *
N-Méthyl-2-pyrrolidone		
No.-CAS	872-50-4	Flam. Liq. 4; Skin Irrit. 2; Eye Irrit. 2A; Repr. 1B; STOT SE 3; H227, H315, H319, H360, H335 Limites de concentration: >= 10 %: STOT SE 3, H335;
No.-CE	212-828-1	
No.-Index	606-021-00-7	
Numéro d'enregistrement	01-2119472430-46-XXXX	
* Pourcentage de poids		
Light aromatic naphtha		
No.-CAS	64742-95-6	Muta. 1B; Carc. 1B; Asp. Tox. 1; H340, H350, H304
No.-CE	265-199-0	
No.-Index	649-356-00-4	
* Pourcentage de poids		

Pour le texte complet des Phrases-H mentionnées dans ce chapitre, voir section 16.

RUBRIQUE 4: Premiers secours
4.1 Description des premiers secours**Conseils généraux**

Montrer cette fiche de données de sécurité au médecin traitant.

En cas d'inhalation

En cas d'inhalation: faire respirer de l'air frais. Consulter un médecin.

En cas de contact avec la peau

En cas de contact avec la peau: Enlever immédiatement tous les vêtements contaminés. Rincer la peau à l'eau/ se doucher. Consulter un médecin.

En cas de contact avec les yeux

En cas de contact avec les yeux : rincer abondamment à l'eau. Consulter un ophtalmologiste. Enlever les lentilles de contact.

En cas d'ingestion

En cas d'ingestion: attention lors du vomissement. Danger d'aspiration! Tenir les voies respiratoires libres. Possibilité de défaillance pulmonaire après aspiration de vomissures. Appeler immédiatement un médecin.

4.2 Principaux symptômes et effets, aigus et différés

Les principaux symptômes et effets connus sont décrits sur l'étiquetage (voir section 2.2) et/ou section 11

4.3 Indication des éventuels soins médicaux immédiats et traitements particuliers nécessaires

Donnée non disponible

RUBRIQUE 5: Mesures de lutte contre l'incendie
5.1 Moyens d'extinction**Moyens d'extinction appropriés**

Eau Mousse Dioxyde de carbone (CO₂) Poudre sèche

Moyens d'extinction inappropriés

Aucune limitation concernant les agents d'extinction pour cette substance/cet mélange.

5.2 Dangers particuliers résultant de la substance ou du mélange

Oxydes de carbone

Oxydes d'azote (NO_x)

Combustible.

Les vapeurs sont plus lourdes que l'air et peuvent se répandre sur le sol.

En cas d'échauffement, possibilité de formation de mélanges explosibles avec l'air.

En cas d'incendie, risque de formation de gaz de combustion ou de vapeurs dangereuses.

5.3 Conseils aux pompiers

Présence dans la zone de danger uniquement avec un appareil respiratoire autonome. Pour éviter le contact avec la peau respecter une distance de sécurité et porter des vêtements de protection appropriés.

5.4 Information supplémentaire

Porter les récipients hors de la zone de danger, refroidir à l'eau. Rabattre les gaz/les vapeurs/le brouillard à l'aide d'eau pulvérisée. Empêcher les eaux d'extinction du feu de contaminer les eaux de surface ou le réseau d'alimentation souterrain.

RUBRIQUE 6: Mesures à prendre en cas de dispersion accidentelle

- 6.1 Précautions individuelles, équipement de protection et procédures d'urgence**
Conseil pour les non-secouristes: Ne pas respirer les vapeurs, aérosols. Eviter le contact avec la substance. Assurer une ventilation adéquate. Tenir à l'écart de la chaleur et des sources d'ignition. Evacuer la zone dangereuse, respecter les procédures d'urgence, consulter un spécialiste.
Pour l'équipement de protection individuel, voir rubrique 8.
- 6.2 Précautions pour la protection de l'environnement**
Empêcher le produit de pénétrer dans les égouts. Risque d'explosion.
- 6.3 Méthodes et matériel de confinement et de nettoyage**
Recouvrir les drains. Collecter, lier et pomper les produits répandus. Respecter les éventuelles restrictions concernant les matériaux (voir sections 7 et 10). Absorber avec prudence avec des produits d'absorption de liquides comme Chemizorb®. Eliminer les résidus. Nettoyer la zone.
- 6.4 Référence à d'autres rubriques**
Pour l'élimination, voir section 13.

RUBRIQUE 7: Manipulation et stockage**7.1 Précautions à prendre pour une manipulation sans danger****Conseils pour une manipulation sans danger**

Travailler sous une hotte. Ne pas inhaler la substance/le mélange. Dégagement de vapeur/éviter les aérosols.

Indications pour la protection contre l'incendie et l'explosion

Tenir à l'abri des flammes nues, des surfaces chaudes et des sources d'inflammation. Prendre des mesures de précaution contre les décharges électrostatiques.

Mesures d'hygiène

Enlever immédiatement tout vêtement souillé. Protection préventive de la peau. Se laver les mains et le visage après le travail.
Pour les précautions, voir section 2.2

7.2 Conditions d'un stockage sûr, y compris d'éventuelles incompatibilités**Conditions de stockage**

Tenir le récipient bien fermé dans un endroit sec et bien aéré. Tenir à l'écart de la chaleur et des sources d'ignition. Conserver sous clé ou dans une zone accessible uniquement aux personnes qualifiées ou autorisées.

Stabilité au stockage

Température de stockage recommandée
-20 °C

Sensible à la lumière. Sensible à l'humidité. Sensible à la chaleur.

Aldrich - 575828

Page 5 de 13

Classe de stockage

Classe de stockage (Allemagne) (TRGS 510): 3: Liquides inflammables

7.3 Utilisation(s) finale(s) particulière(s)

Hormis les utilisations mentionnées à la section 1.2, aucune autre utilisation spécifique n'est prévue

RUBRIQUE 8: Contrôles de l'exposition/protection individuelle**8.1 Paramètres de contrôle****Composants avec valeurs limites d'exposition professionnelle**

Composants	No.-CAS	Valeur	Paramètres de contrôle	Base
N-Méthyl-2-pyrrolidone	872-50-4	LMPT	400 mg/m ³	Tableau de l'Ontario: Limites d'exposition professionnelle pris en vertu de la loi sur la santé et la sécurité au travail.
Light aromatic naphtha	64742-95-6	TWA	200 mg/m ³	Canada. Alberta, Code de santé et de sécurité au travail (tableau 2 : VLE)
Remarques	La substance peut être facilement absorbée à travers la peau intacte			
		VEMP	200 mg/m ³	Québec. Règlement sur la santé et la sécurité du travail, Annexe 1 Partie 1: Valeurs d'exposition admissibles des contaminants de l'air
	Peau (percutanée) Un effet cancérigène démontré chez l'animal. Pour ces substances, les résultats des études relatives à la cancérigénicité chez l'animal ne sont pas nécessairement transposables à l'humain			

8.2 Contrôles de l'exposition**Contrôles techniques appropriés**

Enlever immédiatement tout vêtement souillé. Protection préventive de la peau. Se laver les mains et le visage après le travail.

Équipement de protection individuelle**Protection des yeux/du visage**

Utilisez un équipement de protection des yeux, testé et approuvé selon normes gouvernementales en vigueur, telles que NIOSH (US) or EN 166(EU). Lunettes de sécurité

Protection de la peau
nécessaire**Protection du corps**

Tenue de protection antistatique ignifuge.

Protection respiratoire

nécessaire en cas d'apparition de vapeurs/aérosols.
 Nos recommandations sur la protection respiratoire filtrante sont basées sur les normes suivantes : DIN EN 143, DIN 14387 et d'autres normes afférentes en lien avec le système de protection respiratoire utilisé.

Contrôle de l'exposition de l'environnement

Empêcher le produit de pénétrer dans les égouts. Risque d'explosion.

RUBRIQUE 9: Propriétés physiques et chimiques**9.1 Informations sur les propriétés physiques et chimiques essentielles**

a) Aspect	Forme: liquide
b) Odeur	Donnée non disponible
c) Seuil olfactif	Donnée non disponible
d) pH	Donnée non disponible
e) Point de fusion/point de congélation	Donnée non disponible
f) Point initial d'ébullition et intervalle d'ébullition	174 °C 345 °F à 1,013 hPa
g) Point d'éclair	59 °C (138 °F) - coupelle fermée
h) Taux d'évaporation	Donnée non disponible
i) Inflammabilité (solide, gaz)	Donnée non disponible
j) Limites supérieure/inférieure d'inflammabilité ou d'explosivité	Donnée non disponible
k) Pression de vapeur	Donnée non disponible
l) Densité de vapeur	Donnée non disponible
m) Densité	1.040 gcm ³
Densité relative	Donnée non disponible
n) Hydrosolubilité	Donnée non disponible
o) Coefficient de partage: n-octanol/eau	Donnée non disponible
p) Température d'auto-inflammation	Donnée non disponible
q) Température de décomposition	Donnée non disponible
r) Viscosité	Donnée non disponible

Aldrich - 575828

Page 7 de 13

The life science business of Merck KGaA, Darmstadt, Germany operates as MilliporeSigma in the US and Canada



- s) Propriétés explosives Non classé parmi les explosifs.
 t) Propriétés non
 comburantes

9.2 Autres informations concernant la sécurité
 Donnée non disponible

RUBRIQUE 10: Stabilité et réactivité

10.1 Réactivité

Les mélanges air/vapeur sont explosifs en cas de chauffage intense.

10.2 Stabilité chimique

La production est chimiquement stable dans conditions ambiantes standard (température ambiante).

10.3 Possibilité de réactions dangereuses

Donnée non disponible

10.4 Conditions à éviter

Chauffage.

10.5 Matières incompatibles

Bases, Oxydants forts, Acides forts, Agents réducteurs

10.6 Produits de décomposition dangereux

En cas d'incendie : voir section 5

RUBRIQUE 11: Informations toxicologiques

11.1 Informations sur les effets toxicologiques

Mélange

Toxicité aiguë

Oral(e): Donnée non disponible

Estimation de la toxicité aiguë Oral(e) - > 2,000 mg/kg
 (Méthode de calcul)

Symptômes: Irritation des muqueuses de la bouche, de la gorge, de l'oesophage et du tube digestif.

Symptômes: Symptômes possibles: irritations des muqueuses, Toux, Insuffisance respiratoire, Conséquences possibles: lésion des voies respiratoires

Dermale: Donnée non disponible

Corrosion cutanée/irritation cutanée

Remarques: Mélange provoque une irritation cutanée.

Lésions oculaires graves/irritation oculaire

Remarques: Mélange provoque une sévère irritation des yeux.

Sensibilisation respiratoire ou cutanée

Donnée non disponible

Mutagénicité sur les cellules germinales

Aldrich - 575828

Page 8 de 13

Mutagène possible

Cancérogénicité

Cancérogène possible.

Toxicité pour la reproduction

Risque pour l'enfant à naître.
Peut altérer la fertilité.

Toxicité spécifique pour certains organes cibles - exposition unique

Mélange peut irriter les voies respiratoires.

Toxicité spécifique pour certains organes cibles - exposition répétée

Donnée non disponible

Danger par aspiration

Danger par aspiration, L'aspiration peut provoquer un oedème pulmonaire et une pneumonie.

11.2 Information supplémentaire

Des rats exposés à de la méthyl-1 pyrrolidinone-2 à une concentration de 1 mg/l sous forme d'aérosol pendant 10 jours manifestent une déplétion des cellules hématopoïétiques de la moelle osseuse et une atrophie des tissus lymphoïdes du thymus, de la rate et des ganglions lymphatiques., Vue brouillée, Lacrimation, Toux, douleurs à la poitrine, Troubles respiratoires, Dépression du système nerveux central, Vertiges, Migraine, désorientation, incoordination, Perte de conscience, Nausée
D'autres propriétés dangereuses ne peuvent pas être exclues.

Manipuler la substance avec grande précaution.

À manipuler conformément aux bonnes pratiques d'hygiène industrielle et aux consignes de sécurité.

Composants

N-Méthyl-2-pyrrolidone

Toxicité aiguë

DL50 Oral(e) - Rat - mâle et femelle - 4,150 mg/kg

(OCDE ligne directrice 401)

CL50 Inhalation - Rat - mâle et femelle - 4 h - > 5.1 mg/l - aérosol

(OCDE ligne directrice 403)

DL50 Dermale - Rat - mâle et femelle - > 5,000 mg/kg

(OCDE ligne directrice 402)

Corrosion cutanée/irritation cutanée

Peau - Lapin

Résultat: Irritant pour la peau. - 24 h

(OCDE ligne directrice 404)

Remarques: Classé selon le règlement (EU) No 1272/2008, Annexe VI (Table 3.1/3.2)

Lésions oculaires graves/irritation oculaire

Yeux - Lapin

Résultat: Irritation des yeux

Aldrich - 575828

Page 9 de 13

(OCDE ligne directrice 405)
Remarques: Classé selon le règlement (EU) No 1272/2008, Annexe VI (Table 3.1/3.2)

Sensibilisation respiratoire ou cutanée

Essai de stimulation locale des ganglions lymphatiques (LLNA) - Souris
Résultat: négatif
(OCDE ligne directrice 429)

Mutagenicité sur les cellules germinales

Type de Test: Test de Ames
Système d'essais: Salmonella typhimurium
Résultat: négatif
Type de Test: Essai in vitro de mutation génique sur cellules de mammifères
Système d'essais: Cellules d'ovaires de hamster chinois
Résultat: négatif
Type de Test: essai sur la synthèse d'ADN non programmée
Système d'essais: Hépatocytes de rat
Résultat: négatif
Méthode: OCDE ligne directrice 474
Espèce: Souris - mâle et femelle - Moelle osseuse
Résultat: négatif
Méthode: OCDE ligne directrice 475
Espèce: Hamster chinois - mâle et femelle - Moelle osseuse
Résultat: négatif

Cancérogénicité

Donnée non disponible

Toxicité pour la reproduction

Peut nuire au fœtus.

Toxicité spécifique pour certains organes cibles - exposition unique

Inhalation - Peut irriter les voies respiratoires. - Système respiratoire

Toxicité spécifique pour certains organes cibles - exposition répétée

Danger par aspiration

Donnée non disponible

Light aromatic naphtha

Toxicité aiguë

DL50 Oral(e) - Rat - 8,400 mg/kg
Remarques: Effet comportemental: Somnolence (activité générale diminuée)
Effet comportemental: Tremblement
Poumons, Thorax ou Respiration: Autres modifications
CL50 Inhalation - Rat - mâle et femelle - 4 h - > 7,630 mg/m³
(OCDE ligne directrice 403)
DL50 Dermale - Lapin - mâle et femelle - > 2,000 mg/kg
(OCDE ligne directrice 402)
Donnée non disponible

Corrosion cutanée/irritation cutanée

Donnée non disponible

Lésions oculaires graves/irritation oculaire

Yeux - Lapin
 Résultat: Pas d'irritation des yeux
 (OCDE ligne directrice 405)

Sensibilisation respiratoire ou cutanée

Test de Buehler - Cochon d'Inde
 Résultat: Ne provoque pas de sensibilisation de la peau.
 (OCDE ligne directrice 406)

Mutagenicité sur les cellules germinales

Donnée non disponible
 Système d'essais: S. typhimurium
 Résultat: négatif
 Espèce: Rat - mâle et femelle
 Résultat: négatif

Cancérogénicité

Donnée non disponible

Toxicité pour la reproduction

Donnée non disponible
 Donnée non disponible

Toxicité spécifique pour certains organes cibles - exposition unique

Donnée non disponible

Toxicité spécifique pour certains organes cibles - exposition répétée

Donnée non disponible

Danger par aspiration

La substance ou le mélange est connu pour provoquer un risque de toxicité par aspiration chez l'homme ou doit être considéré comme s'il présentait un risque de toxicité par aspiration chez l'homme.

RUBRIQUE 12: Informations écologiques**12.1 Toxicité****Mélange**

Donnée non disponible

12.2 Persistance et dégradabilité

Donnée non disponible

12.3 Potentiel de bioaccumulation

Donnée non disponible

12.4 Mobilité dans le sol

Donnée non disponible

12.5 Résultats des évaluations PBT et vPvB

L'évaluation du caractère PBT / vPvB n'est pas disponible car l'évaluation de la sécurité chimique n'est pas requise / n'est pas menée

12.6 Propriétés perturbant le système endocrinien

Donnée non disponible

Aldrich - 575828

Page 11 de 13

The life science business of Merck KGaA, Darmstadt, Germany
 operates as MilliporeSigma in the US and Canada

**MILLIPORE
SIGMA**

12.7 Autres effets néfastes

Donnée non disponible

Composants**N-Méthyl-2-pyrrolidone**

Toxicité pour les poissons	Essai en statique CL50 - Oncorhynchus mykiss (Truite arc-en-ciel) - > 500 mg/l - 96 h Remarques: (ECHA)
Toxicité pour la daphnie et les autres invertébrés aquatiques	CE50 - Daphnia magna (Grande daphnie) - env. 4,897 mg/l - 48 h Remarques: (IUCLID)
Toxicité pour les algues	Essai en statique CE50 - Desmodesmus subspicatus (algues vertes) - 672.8 mg/l - 72 h (DIN 38412)
Toxicité pour la daphnie et les autres invertébrés aquatiques (Toxicité chronique)	Essai en semi-statique NOEC - Daphnia magna (Grande daphnie) - 12.5 mg/l - 21 jr (OCDE Ligne directrice 211)

Light aromatic naphtha

Donnée non disponible

RUBRIQUE 13: Considérations relatives à l'élimination**13.1 Méthodes de traitement des déchets****Produit**

Les déchets doivent être éliminés conformément aux réglementations local e chimiques dans les con teneurs d'origine. Pas de mélange avec d'autres déchets. Traiter les con teneurs non nettoyés comme le produit lui-même.

RUBRIQUE 14: Informations relatives au transport**TDG**

Numéro ONU: 1866 Classe: 3 Groupe d'emballage: III
Nom d'expédition des Nations unies: RÉSINE EN SOLUTION
Étiquettes: 3
Code ERG: 127
Polluant marin: non

IMDG

Numéro ONU: 1866 Classe: 3 Groupe d'emballage: III EMS-No: F-E, S-E
Nom d'expédition des Nations unies: RESIN SOLUTION

Aldrich - 575828

Page 12 de 13

The life science business of Merck KGaA, Darmstadt, Germany
operates as MilliporeSigma in the US and Canada



IATA

Numéro ONU: 1866 Classe: 3 Groupe d'emballage: III
Nom d'expédition des Nations unies: Resin solution

RUBRIQUE 15: Informations relatives à la réglementation

Ce produit a été classé conformément aux critères de danger énoncés dans le Règlement sur les produits dangereux et la fiche de données de sécurité contient tous les renseignements exigés par le Règlement sur les produits dangereux.

RUBRIQUE 16: Autres informations**Information supplémentaire**

Les informations ci-dessus ont été préparées sur la base des renseignements disponibles les plus sûrs. Elles ne prétendent pas être exhaustives et devront être considérées comme un guide. Le groupe Sigma-Aldrich, ne pourra être tenu responsable des dommages résultant de l'utilisation ou de tout contact avec le produit sus-mentionné.

Voir verso de la facture ou du bulletin de livraison pour nos termes et conditions de vente.

Copyright 2020 Sigma-Aldrich Co. LLC. Copies en papier autorisées pour usage interne uniquement.

La marque présente en en-tête et/ou en pied de page de ce document peut différer visuellement de celle figurant sur le produit acheté, car nous sommes en base de mise en œuvre de notre propre marque. Cependant, toutes les informations dans le document qui concernent le produit demeurent inchangées et correspondent au produit commandé. Pour de plus amples informations, veuillez contacter misbranding@sigma.com.

Version: 8.8

Date de révision: 24.05.2023

Date d'impression:
28.05.2023

BIBLIOGRAPHIE

- Abbas, S. F., Seo, S.-J., Park, K.-T., Kim, B.-S., & Kim, T.-S. (2017). Effect of grain size on the electrical conductivity of copper–iron alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, *720*, 8-16. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.05.244>
- Aden, J. S., Bohórquez, J. H., Collins, D. M., Crook, M. D., García, A., & Hess, U. E. (1994). The Third-Generation HP Thermal InkJet Printhead.
- Alamán, J., Alicante, R., Peña, J. I., & Sánchez-Somolinos, C. (2016). Inkjet Printing of Functional Materials for Optical and Photonic Applications. *Materials*, *9*(11), 910. <https://doi.org/10.3390/ma9110910>
- Aliane, A., Fischer, V., Galliani, M., Tournon, L., Gwoziecki, R., Serbutoviez, C., ... Coppard, R. (2014). Enhanced printed temperature sensors on flexible substrate. *Microelectronics Journal*, *45*(12), 1621-1626. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2014.08.011>
- Aziz, A. A., Azraie Mohd Azmi, M., Nubli Zulkifli, M., Nurashikin Nordin, A., Kamarul Bahrain, A., Zuriati Makmon, F., ... Sabdin, S. (2019). Rapid fabrication and characterization of PDMS microfluidics device using printed conductive silver ink. *Materials Today: Proceedings*, *16*, 1661-1667. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.032>
- Barmpakos, D., Segkos, A., Tsamis, C., & Kaltsas, G. (2017). A disposable flexible humidity sensor directly printed on paper for medical applications. *Journal of Physics: Conference Series*, *931*, 012003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/931/1/012003>
- Barmpakos, Dimitris, & Kaltsas, G. (2021). A Review on Humidity, Temperature and Strain Printed Sensors—Current Trends and Future Perspectives. *Sensors*, *21*(3), 739. <https://doi.org/10.3390/s21030739>
- Beedasy, V., & Smith, P. J. (2020). Printed Electronics as Prepared by Inkjet Printing. *Materials*, *13*(3), 704. <https://doi.org/10.3390/ma13030704>
- Bernard-Granger, G., & Guizard, C. (2008). New relationships between relative density and grain size during solid-state sintering of ceramic powders. *Acta Materialia*, *56*(20), 6273-6282. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2008.08.054>
- Billi, E., Viricelle, J.-P., Montanaro, L., & Pijolat, C. (2002). Development of a protected gas sensor for exhaust automotive applications. *IEEE Sensors Journal*, *2*(4), 342-348. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2002.804530>
- Bishara, H., Lee, S., Brink, T., Ghidelli, M., & Dehm, G. (2021). Understanding Grain Boundary Electrical Resistivity in Cu: The Effect of Boundary Structure. *ACS Nano*, *15*(10), 16607-16615. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c06367>
- Bolduc, M., Trudeau, C., Beaupré, P., Cloutier, S. G., & Galarneau, P. (2018). Thermal Dynamics Effects using Pulse-Shaping Laser Sintering of Printed Silver Inks. *Scientific Reports*, *8*(1), 1418. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-19801-4>
- Borghetti, M., Cantù, E., Sardini, E., & Serpelloni, M. (2020). Future Sensors for Smart Objects by Printing Technologies in Industry 4.0 Scenario. *Energies*, *13*(22), 5916. <https://doi.org/10.3390/en13225916>

- Brand, O., Fedder, G. K., Hierold, C., Korvink, J. G., & Tabata, O. (2012). *Inkjet-based Micromanufacturing*. (S.l.) : John Wiley & Sons. (Google-Books-ID: jLMqoirILhAC).
- Branbjerg, J., Eijkel, C. J. M., Gardeniers, J. G. E., & van de Pol, F. C. M. (1991). Dopant selective HF anodic etching of silicon-for the realization of low-doped monocrystalline silicon microstructures. Dans [1991] *Proceedings. IEEE Micro Electro Mechanical Systems* (pp. 221-226). Nara, Japan : IEEE. <https://doi.org/10.1109/MEMSYS.1991.114800>
- Brunetti, F., Operamolla, A., Castro-Hermosa, S., Lucarelli, G., Manca, V., Farinola, G. M., & Brown, T. M. (2019). Printed Solar Cells and Energy Storage Devices on Paper Substrates. *Advanced Functional Materials*, 29(21), 1806798. <https://doi.org/10.1002/adfm.201806798>
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). *Fluid mechanics: fundamentals and applications*. Boston : McGraw-HillHigher Education.
- Chapitre 4 perte de charge - Chapitre 4 Perte de charge Objectifs A la fin de ce chapitre, - Studocu. (s.d.). Repéré à <https://www.studocu.com/fr-ca/document/ecole-de-technologie-superieure/mecanique-des-fluides/chapitre-4-perte-de-charge/12764903>
- Chen, J., & Wise, K. D. (1997). A high-resolution silicon monolithic nozzle array for inkjet printing. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 44(9), 1401-1409. <https://doi.org/10.1109/16.622594>
- Cooper, M. A., Erikson, W. W., & Oliver, M. S. (2021). Electrical conductivity of porous binary powder mixtures. *Mechanics of Materials*, 162, 104026. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2021.104026>
- CROWLEY, J. M. (1963). *Accepted by Chairman, Departmental Commite on Graduate Students*. Citeseer.
- Dannenbergh, R., Stach, E., Groza, J. R., & Dresser, B. J. (2000). TEM annealing study of normal grain growth in silver thin films. *Thin Solid Films*, 379(1), 133-138. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(00\)01570-4](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(00)01570-4)
- De Luca, A., Santra, S., Ghosh, R., Ali, S. Z., Gardner, J. W., Guha, P. K., & Udrea, F. (2016). Temperature-modulated graphene oxide resistive humidity sensor for indoor air quality monitoring. *Nanoscale*, 8(8), 4565-4572. <https://doi.org/10.1039/C5NR08598E>
- Denneulin, A., Blayo, A., Neuman, C., & Bras, J. (2011). Infra-red assisted sintering of inkjet printed silver tracks on paper substrates. *Journal of Nanoparticle Research*, 13(9), 3815-3823. <https://doi.org/10.1007/s11051-011-0306-2>
- Dimatix® Materials Cartridge - Samba® Cartridge. (s.d.).
- Dobosz, I. (2021). Influence of the anodization conditions and chemical treatment on the formation of alumina membranes with defined pore diameters. *Journal of Porous Materials*, 28(4), 1011-1022. <https://doi.org/10.1007/s10934-021-01052-w>
- Dynamique des fluides: définition et explications. (s.d.). *Techno-Science.net*. Repéré à <https://www.techno-science.net/definition/2873.html>
- Eberstein, M., Wenzel, M., Feller, C., Seuthe, T., & Gora, F. (2012). Silver processing in thick film technology for power electronics. *Additional Conferences (Device Packaging, HiTEC, HiTEN, and CICMT)*, 2012(CICMT), 000018-000024. <https://doi.org/10.4071/CICMT-2012-TA13>

- Frazier, W. E., Hu, S., Overman, N., Lavender, C., & Joshi, V. V. (2018). Short communication on Kinetics of grain growth and particle pinning in U-10 wt.% Mo. *Journal of Nuclear Materials*, 498, 254-258. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2017.10.041>
- German, R. M. (1992). Prediction of sintered density for bimodal powder mixtures. *Metallurgical Transactions A*, 23(5), 1455-1465. <https://doi.org/10.1007/BF02647329>
- Grubb, P. M., Subbaraman, H., Park, S., Akinwande, D., & Chen, R. T. (2017). Inkjet Printing of High Performance Transistors with Micron Order Chemically Set Gaps. *Scientific Reports*, 7(1), 1202. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01391-2>
- Gu, C., Kim, M., & Anand, L. (2001). Constitutive equations for metal powders: application to powder forming processes. *International Journal of Plasticity*, 17(2), 147-209. [https://doi.org/10.1016/S0749-6419\(00\)00029-2](https://doi.org/10.1016/S0749-6419(00)00029-2)
- Haptic. (2021, 11 juin). Printed electronics offer the advantage of flexibility and low cost. *Haptic*. Repéré à <https://www.haptic.ro/printed-electronics-offer-the-advantage-of-flexibility-and-low-cost/>
- He, P., & Derby, B. (2017). Controlling Coffee Ring Formation during Drying of Inkjet Printed 2D Inks. *Advanced Materials Interfaces*, 4(22), 1700944. <https://doi.org/10.1002/admi.201700944>
- Hojjati-Najafabadi, A., Mansoorianfar, M., Liang, T., Shahin, K., & Karimi-Maleh, H. (2022). A review on magnetic sensors for monitoring of hazardous pollutants in water resources. *Science of The Total Environment*, 824, 153844. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153844>
- How inkjet printer work*. (2017). Repéré à <https://www.youtube.com/watch?v=9yeZSaigBj4>
- HP ThinkJet, 1984. (s.d.). Repéré à <https://www.hpe.com/us/en/about/history/innovation-gallery/011-product.html>
- Huang, X., Sun, Q., & Fan, K. (2006). Study on Atoms Diffusion of Vacuum Fusion Sintering WC-Co Composite Nano-coatings. Dans *2006 1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems* (pp. 1060-1063). <https://doi.org/10.1109/NEMS.2006.334612>
- Ink Jet Inks and the Measurement of Ink Jet Ink Particles Using Laser Diffraction. (2005, 28 avril). *AZoM.com*. Repéré à <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2836>
- Jang, S., & Rahman, M. (2021). Effect of sintering atmospheres on printed silver nanoparticle patterns for flexible electronics application. *Applied Physics A*, 127(10), 769. <https://doi.org/10.1007/s00339-021-04923-w>
- Jauregi, S., Fernandez, F., Palma, R. H., Martinez, V., & Urcola, J. J. (1992). Influence of atmosphere on sintering of T15 and M2 steel powders. *Metallurgical Transactions A*, 23(2), 389-400. <https://doi.org/10.1007/BF02801157>
- Javaid, M., Haleem, A., Rab, S., Pratap Singh, R., & Suman, R. (2021). Sensors for daily life: A review. *Sensors International*, 2, 100121. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100121>
- Javaid, S., Zeadally, S., Fahim, H., & He, B. (2022). Medical Sensors and Their Integration in Wireless Body Area Networks for Pervasive Healthcare Delivery: A Review. *IEEE Sensors Journal*, 22(5), 3860-3877. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3141064>

- Kamisuki, S., Hagata, T., Tezuka, C., Nose, Y., Fujii, M., & Atobe, M. (1998). A low power, small, electrostatically-driven commercial inkjet head. Dans *Proceedings MEMS 98. IEEE. Eleventh Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems. An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Systems (Cat. No.98CH36176)* (pp. 63-68). Heidelberg, Germany : IEEE. <https://doi.org/10.1109/MEMSYS.1998.659730>
- Khalate, A. A., Bombois, X., Babuška, R., Wijshoff, H., & Waarsing, R. (2011). Performance improvement of a drop-on-demand inkjet printhead using an optimization-based feedforward control method. *Control Engineering Practice*, 19(8), 771-781. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2011.02.007>
- Kim, K. T., & Jeon, Y. C. (1998). Densification behavior of 316L stainless steel powder under high temperature. *Materials Science and Engineering: A*, 245(1), 64-71. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(97\)00696-5](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00696-5)
- Kortoçi, P., Motlagh, N. H., Zaidan, M. A., Fung, P. L., Varjonen, S., Rebeiro-Hargrave, A., ... Tarkoma, S. (2022). Air pollution exposure monitoring using portable low-cost air quality sensors. *Smart Health*, 23, 100241. <https://doi.org/10.1016/j.smhl.2021.100241>
- Krainer, S., Smit, C., & Hirn, U. (2019). The effect of viscosity and surface tension on inkjet printed picoliter dots. *RSC Advances*, 9(54), 31708-31719. <https://doi.org/10.1039/C9RA04993B>
- Laerme, F., Schilp, A., Funk, K., & Offenbergh, M. (1999). Bosch deep silicon etching: improving uniformity and etch rate for advanced MEMS applications. Dans *Technical Digest. IEEE International MEMS 99 Conference. Twelfth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (Cat. No.99CH36291)* (pp. 211-216). Orlando, FL, USA : IEEE. <https://doi.org/10.1109/MEMSYS.1999.746812>
- Lall, P., & Goyal, K. (2020). Additively Printed Multi-Material Temperature Sensor Realized using Screen Printing. Dans *2020 19th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)* (pp. 827-835). Orlando, FL, USA : IEEE. <https://doi.org/10.1109/ITherm45881.2020.9190268>
- Lee, S.-K., Hsu, H.-C., & Tuan, W.-H. (2016). Oxidation Behavior of Copper at a Temperature below 300 °C and the Methodology for Passivation. *Materials Research*, 19. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2015-0139>
- Liew, Q. J., & Lee, H. W. (2020). Inkjet-Printed Flexible Temperature Sensor Based on Silver Nanoparticles Ink. Dans *Proceedings of 7th International Electronic Conference on Sensors and Applications* (p. 8216). Sciforum.net : MDPI. <https://doi.org/10.3390/ecsa-7-08216>
- Lin, H.-W., & Tan, C.-S. (2015). Preparation of polyamic acid and polyimide nanoparticles by compressed fluid antisolvent and thermal imidization. *The Journal of Supercritical Fluids*, 99, 103-111. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2015.01.028>
- Liou, J.-C., & Tseng, F.-G. (2011). Multi-dimensional data registration CMOS/MEMS integrated inkjet printhead. *Microelectronic Engineering*, 88(6), 888-901. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2010.11.052>
- Majeed Khan, M. A., Kumar, S., Ahamed, M., Alrokayan, S. A., & AlSalhi, M. S. (2011). Structural and thermal studies of silver nanoparticles and electrical transport study of

- their thin films. *Nanoscale Research Letters*, 6(1), 434. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-6-434>
- Mannerbro, R., Ramlöf, M., Robinson, N., & Forchheimer, R. (2008). Inkjet printed electrochemical organic electronics. *Synthetic Metals*, 158(13), 556-560. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2008.03.030>
- Mo, L., Guo, Z., Yang, L., Zhang, Q., Fang, Y., Xin, Z., ... Li, L. (2019). Silver Nanoparticles Based Ink with Moderate Sintering in Flexible and Printed Electronics. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(9), 2124. <https://doi.org/10.3390/ijms20092124>
- Nandy, J., Yedla, N., Gupta, P., Sarangi, H., & Sahoo, S. (2019). Sintering of AlSi10Mg particles in direct metal laser sintering process: A molecular dynamics simulation study. *Materials Chemistry and Physics*, 236, 121803. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.121803>
- Oh, C., Choi, Y., Kim, D., Won, M., Yang, H., & Hong, W. (2020). Effect of oxygen on pressureless silver sintering in a nitrogen atmosphere. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31(1), 488-494. <https://doi.org/10.1007/s10854-019-02553-w>
- Öhlund, T., Schuppert, A., Andres, B., Andersson, H., Forsberg, S., Schmidt, W., ... Olin, H. (2015). Assisted sintering of silver nanoparticle inkjet ink on paper with active coatings. *RSC Advances*, 5(80), 64841-64849. <https://doi.org/10.1039/C5RA06626C>
- Oyane, M., Shima, S., & Tabata, T. (1978). Consideration of basic equations, and their application, in the forming of metal powders and porous metals. *Journal of Mechanical Working Technology*, 1(4), 325-341. [https://doi.org/10.1016/0378-3804\(78\)90036-0](https://doi.org/10.1016/0378-3804(78)90036-0)
- Park, E. S., Chen, Y., Liu, T.-J. K., & Subramanian, V. (2013). A New Switching Device for Printed Electronics: Inkjet-Printed Microelectromechanical Relay. *Nano Letters*, 13(11), 5355-5360. <https://doi.org/10.1021/nl4028632>
- Park, J.-W., & Baek, S.-G. (2006). Thermal behavior of direct-printed lines of silver nanoparticles. *Scripta Materialia*, 55(12), 1139-1142. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2006.08.032>
- Payette, J., Cloutier, S. G., & Vaussenat, F. (2022, 6 décembre). Multidimensional analysis using sensor arrays with deep learning for high-precision and high-accuracy diagnosis. arXiv. Repéré à <http://arxiv.org/abs/2211.17139>
- Perelaer, J., Klokkenburg, M., Hendriks, C. E., & Schubert, U. S. (2009). Microwave Flash Sintering of Inkjet-Printed Silver Tracks on Polymer Substrates. *Advanced Materials*, 21(47), 4830-4834. <https://doi.org/10.1002/adma.200901081>
- Petani, L., Wehrheim, V., Koker, L., Reischl, M., Ungerer, M., Gengenbach, U., & Pylatiuk, C. (2021). Systematic assessment of the biocompatibility of materials for inkjet-printed ozone sensors for medical therapy. *Flexible and Printed Electronics*, 6(4), 043003. <https://doi.org/10.1088/2058-8585/ac32ab>
- Rainville, G. (2008). Twenty Years of Innovation:
- Raut, N. C., & Al-Shamery, K. (2018). Inkjet printing metals on flexible materials for plastic and paper electronics. *Journal of Materials Chemistry C*, 6(7), 1618-1641. <https://doi.org/10.1039/C7TC04804A>

- Reinhold, I., E. Hendriks, C., Eckardt, R., M. Kranenburg, J., Perelaer, J., R. Baumann, R., & S. Schubert, U. (2009). Argon plasma sintering of inkjet printed silver tracks on polymer substrates. *Journal of Materials Chemistry*, 19(21), 3384-3388. <https://doi.org/10.1039/B823329B>
- Reynolds' Number - an overview | ScienceDirect Topics. (s.d.). Repéré à <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/reynolds-number>
- Robinson, B. H. (2009a). E-waste: An assessment of global production and environmental impacts. *Science of The Total Environment*, 408(2), 183-191. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.09.044>
- Robinson, B. H. (2009b). E-waste: An assessment of global production and environmental impacts. *Science of The Total Environment*, 408(2), 183-191. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.09.044>
- Schulte, D. W. (2002). *Brevet n° US6402283B2*. United States. Repéré à <https://patents.google.com/patent/US6402283B2/en>
- Scott, J., Gupta, N., Weber, C., Newsome, S., Wohlers, T., Associates, W., ... Associates, W. (s.d.). Additive Manufacturing: Status and Opportunities.
- Shah, M. A., Lee, D.-G., Lee, B.-Y., & Hur, S. (2021). Classifications and Applications of Inkjet Printing Technology: A Review. *IEEE Access*, 9, 140079-140102. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3119219>
- Shaler, A. J., & Wulff, J. (1948). Mechanism of Sintering. *INDUSTRIAL AND ENGINEERING CHEMISTRY*, 40(5).
- Sharif, A., Farid, N., McGlynn, P., Wang, M., Vijayaraghavan, R. K., Jilani, A., ... O'Connor, G. M. (2023). Ultrashort laser sintering of printed silver nanoparticles on thin, flexible, and porous substrates. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 56(7), 075102. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/acb367>
- Shen, W., Zhang, X., Huang, Q., Xu, Q., & Song, W. (2014). Preparation of solid silver nanoparticles for inkjet printed flexible electronics with high conductivity. *Nanoscale*, 6(3), 1622-1628. <https://doi.org/10.1039/C3NR05479A>
- Shin, K.-Y., Lee, S.-H., & Oh, J. H. (2011). Solvent and substrate effects on inkjet-printed dots and lines of silver nanoparticle colloids. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 21(4), 045012. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/21/4/045012>
- Snyder, B. A. (2019). *Evolutionary controllers for identifying viable regimes and obtaining optimal performance in precision inkjet systems*. Thesis. (Accepted: 2022-01-28T20:50:58Z). Repéré à <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/96419>
- Soft Lithography | Materials Research Institute. (s.d.). Repéré à <https://www.mri.psu.edu/nanofabrication-lab/capabilities/lithography/soft-lithography>
- Sowade, E., Polomoshnov, M., & Baumann, R. R. (2016). The design challenge in printing devices and circuits: Influence of the orientation of print patterns in inkjet-printed electronics. *Organic Electronics*, 37, 428-438. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2016.07.008>
- Subramanian, V., Chang, J. B., de la Fuente Vornbrock, A., Huang, D. C., Jagannathan, L., Liao, F., ... Zhang, Q. (2008). Printed electronics for low-cost electronic systems: Technology status and application development. Dans *ESSCIRC 2008 - 34th European*

- Solid-State Circuits Conference* (pp. 17-24).
<https://doi.org/10.1109/ESSCIRC.2008.4681785>
- The Automotive Market and Flexible and Printed Electronics. (s.d.). *Printed Electronics Now*.
 Repéré à https://www.printedelectronicsnow.com/issues/2021-12-01/view_features/the-automotive-market-and-flexible-and-printed-electronics/
- TheIJC 2019: Inkjet printhead design: Approaches to modelling the complexity*. (2020).
 Repéré à <https://www.youtube.com/watch?v=dxAL-bxQ-rU>
- Trudeau, C. (2021). Printed electronics prototyping of flexible optoelectronic methylammonium trihalide perovskite-based devices.
- Turkani, V. S., Maddipatla, D., Narakathu, B. B., Altay, B. N., Fleming, P. D., Bazuin, B. J., & Atashbar, M. Z. (2019). Nickel Based RTD Fabricated via Additive Screen Printing Process for Flexible Electronics. *IEEE Access*, 7, 37518-37527.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2904970>
- Wang, Y.-F., Sekine, T., Takeda, Y., Yokosawa, K., Matsui, H., Kumaki, D., ... Tokito, S. (2020). Fully Printed PEDOT:PSS-based Temperature Sensor with High Humidity Stability for Wireless Healthcare Monitoring. *Scientific Reports*, 10(1), 2467.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-59432-2>
- Wawrzynek, E., Baumbauer, C., & Arias, A. C. (2021). Characterization and Comparison of Biodegradable Printed Capacitive Humidity Sensors. *Sensors*, 21(19), 6557.
<https://doi.org/10.3390/s21196557>
- Wijshof, H. (2008, 25 janvier). Structure- and fluid-dynamics in piezo inkjet printheads.
 Repéré à https://ris.utwente.nl/ws/portalfiles/portal/6085963/thesis_Wijshoff.pdf
- Wu, S. P., Zhao, Q. Y., Zheng, L. Q., & Ding, X. H. (2011). Behaviors of ZnO-doped silver thick film and silver grain growth mechanism. *Solid State Sciences*, 13(3), 548-552.
<https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2010.12.024>
- Xiao, G., Aflaki, P., Lang, S., Zhang, Z., Tao, Y., Py, C., ... Change, S. (2018). Printed UHF RFID Reader Antennas for Potential Retail Applications. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 2(1), 31-37. <https://doi.org/10.1109/JRFID.2018.2823640>
- Xu, J. (2007). Novel method for printing high-quality metal wires. *SPIE Newsroom*.
<https://doi.org/10.1117/2.1200712.0969>
- Yeo, J., Kim, G., Hong, S., Kim, M. S., Kim, D., Lee, J., ... Ko, S. H. (2014). Flexible supercapacitor fabrication by room temperature rapid laser processing of roll-to-roll printed metal nanoparticle ink for wearable electronics application. *Journal of Power Sources*, 246, 562-568. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.08.012>
- Yin, Z., Huang, Y., Bu, N., Wang, X., & Xiong, Y. (2010). Inkjet printing for flexible electronics: Materials, processes and equipments. *Chinese Science Bulletin*, 55(30), 3383-3407. <https://doi.org/10.1007/s11434-010-3251-y>
- Yoshida, H., Nakatani, S., Usui, Y., Wakabayashi, D., & Ohtsuka, F. (s.d.). High-precision and high-stability inkjet printing technology for QD color converter-type micro-LED display. *Journal of the Society for Information Display*, n/a(n/a).
<https://doi.org/10.1002/jsid.1218>

- Zha, X. F., & Du, H. (2003). Manufacturing process and material selection in concurrent collaborative design of MEMS devices. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 13(5), 509-522. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/13/5/301>
- Zhang, S., Li, Y., Zhang, S., Shahabi, F., Xia, S., Deng, Y., & Alshurafa, N. (2022). Deep Learning in Human Activity Recognition with Wearable Sensors: A Review on Advances. *Sensors*, 22(4), 1476. <https://doi.org/10.3390/s22041476>