

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

CONCEPTION ET FABRICATION D'UNE MATRICE DE MICROPROPULSEURS À
COMBUSTIBLE SOLIDE

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR

PHILIPPE DESCENT

FÉVRIER 2016

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.07-2011). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, Monsieur Ricardo Izquierdo, ainsi que mon codirecteur, Monsieur Frédéric Nabki pour leurs conseils et leurs suggestions qui m'ont été utiles durant tout mon mémoire.

Je remercie aussi le personnel du Centre de Recherche pour la Défense Canada – Valcartier (RDDC-Valcartier), particulièrement ceux du bâtiment 14. Un merci particulier à Madame Suzanne Paradis, grâce à qui ce projet n'aurait pu se concrétiser.

Finalement, je tiens à remercier mes parents, Murielle et Pierre qui m'ont soutenu tout au long de ce périple et surtout à ma chère partenaire de vie, Marie-France, qui fut à mes côtés du début à la fin, des meilleurs moments aux plus difficiles.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	IX
LISTE DES TABLEAUX	XI
LISTES DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES.....	XIII
RÉSUMÉ.....	XV
ABSTRACT	XVII
CHAPITRE I	
INTRODUCTION	1
1.1 Les microsattellites	2
1.1.1 Qu'est-ce qu'un microsattellite.....	2
1.1.2 Utilité	3
1.1.3 Avantages et utilisateurs	5
1.2 Exigences des microsattellites	5
1.3 Objectif de la recherche	5
1.4 Hypothèse de la recherche	6
1.5 Présentation du mémoire	6
1.6 Contributions attendues	7
CHAPITRE II	
REVUE DE LITTÉRATURE	9
2.1 Types de micropropulsion	9
2.2 Micropropulsion à combustible solide.....	12
2.2.1 Architecture.....	13
2.2.2 Chambre à combustion	13
2.2.3 Tuyère	15
2.2.4 Allumeur	15
2.3 Résumé	17

CHAPITRE III	
THÉORIE.....	21
3.1 Fonctionnement des micropropulseurs à combustible solide	21
3.2 Définitions	23
3.2.1 Le LTCC (Low Temperature Cofired Ceramic).....	23
3.2.2 La microrésistance thermique.....	24
3.2.3 Les nanothermites.....	25
CHAPITRE IV	
PROCÉDÉ DE FABRICATION ET ASSEMBLAGE	27
4.1 Fabrication	27
4.1.1 Couches de LTCC.....	27
4.1.2 Couche des chambres	28
4.1.3 Couche des tuyères	29
4.1.4 Couche d'allumage	31
4.2 Assemblage du dispositif.....	37
CHAPITRE V	
CONCEPTION ET SIMULATIONS.....	39
5.1 Conception.....	39
5.1.1 Couche des chambres	39
5.1.2 Couche des tuyères	42
5.1.3 Couche d'allumage	44
5.2 Simulation.....	49
5.2.1 Substrat	49
5.2.2 Branchements vers les résistances	51
5.2.3 Forme des résistances	53
5.3 Montage des tests.....	55
5.3.1 Caméras thermiques.....	58
5.3.2 Nanothermites.....	59

CHAPITRE VI	
RESULTATS ET DISCUSSION	61
6.1 Couche des chambres	61
6.2 Couche des tuyères	65
6.2.1 Partie supérieure (Tuyère 12°)	66
6.2.2 Partie inférieure (Tuyère 45°)	68
6.2.3 Couche des tuyères assemblée	70
6.3 Couche allumage	76
6.3.1 Substrat	78
6.3.2 Branchements.....	81
6.3.3 Motifs de résistance	83
6.3.4 Recette de nanothermite.....	85
6.4 Discussion.....	88
6.4.1 Couche des chambres.....	88
6.4.2 Couches des tuyères.....	88
6.4.3 Couche d'allumage	89
CONCLUSION	93
Avancées.....	93
Travaux futurs.....	94
ANNEXE A	
MASQUES PHOTOLITHOGRAPHIQUES	97
ANNEXE B	
DESSINS TECHNIQUES DES CHAMBRES ET DES TUYÈRES.....	101
BIBLIOGRAPHIE.....	103

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Vue d'un CubeSat	3
Figure 1.2 : Satellites en orbite formant le réseau du système GPS	4
Figure 2.1 : Réservoir de combustible au peroxyde d'hydrogène.....	10
Figure 2.2 : Propulseur micro-ionique.....	11
Figure 3.1 : Exemple d'un système d'interconnexions	21
Figure 3.2 : Représentation latérale d'un micropropulseur à combustible solide	22
Figure 3.3 : Étapes de fabrication du LTCC.....	23
Figure 3.4 : Microrésistance d'aluminium sur une feuille de Kapton	25
Figure 3.5 : Image SEM d'un composé de particules nanométriques d'Al et MoO ₃	26
Figure 4.1 : Étapes de fabrication de la couche des chambres	28
Figure 4.2 : Couche des chambres non recuite.....	29
Figure 4.3 : Sous-couche de tuyères côté petit angle et grand angle et vue latérale.....	30
Figure 4.4 : Étapes de fabrication de la couche des tuyères	31
Figure 4.5 : Préparation du substrat de Kapton	32
Figure 4.6 : Dépôt d'aluminium sur Kapton	33
Figure 4.7 : Résine photosensible développée.....	35
Figure 4.8 : Échantillon après gravure de l'aluminium.....	36
Figure 4.9 : Échantillon d'allumeur terminé.....	36
Figure 4.10 : Vue de coupe d'un micropropulseur chargé.....	37
Figure 4.11 : Vue de profil non collé du dispositif et vue éclatée des couches.....	38
Figure 5.1 : Vue de coupe avec mesures d'un micropropulseur	40
Figure 5.2 : Vue de coupe de la couche des chambres	41
Figure 5.3 : Vue de coupe de la couche des tuyères.....	43
Figure 5.4 : Dimension d'une résistance à six branches	45
Figure 5.5 : Première version du masque interconnexions et résistances d'aluminium....	46
Figure 5.6 : Deuxième version des masques	47
Figure 5.7 : Troisième version des masques.....	48

Figure 5.8 : Température maximale possible selon le substrat utilisé.....	50
Figure 5.9 : Quatres architectures de connections simulées.....	52
Figure 5.10 : Simulation des différents motifs de résistance.....	54
Figure 5.11 : Schéma du montage test.....	56
Figure 5.12 : Échantillon de Kapton avant et après allumage des nanothermites	57
Figure 5.13 : Explosion d'une goutte de nanothermite pendant l'allumage	57
Figure 5.14 : Capture test d'échantillon avec caméras thermiques SWIR et LWIR.....	59
Figure 6.1 : Rebord d'une des chambres non recuites et vue de biais.....	62
Figure 6.2 : Profil d'une chambre non recuite	63
Figure 6.3 : Profil d'une chambre avant recuit et après recuit	64
Figure 6.4 : Matrice de chambres recuite	65
Figure 6.5 : Vue de biais de la sous-couche de la Tuyères 12° non recuits	66
Figure 6.6 : Profil d'une tuyère de demi-angle de 12° non recuite.....	67
Figure 6.7 : Vue de biais de la couche de la Tuyères 45° non recuites	68
Figure 6.8 : Profil d'une tuyère de demi-angle de 45° non recuite	69
Figure 6.9 : Profil d'une tuyère à demi-angle de 12° avant recuit et après recuit.....	71
Figure 6.10 : Profil d'une tuyère de demi-angle de 45° avant recuit et après recuit.....	72
Figure 6.11 : Vue sur une des tuyères du Silex retiré de la couche après recuit	74
Figure 6.12 : Représentation 3D de la tuyère recuite vue de la Tuyère 45°	75
Figure 6.13 : Couche des tuyères	75
Figure 6.14 : Courbe typique des essais	77
Figure 6.15 : Image IR d'un échantillon sur silicium et post-traitement de l'image	79
Figure 6.16 : Image IR filtrée avec substrat de verre à 5 V et de Kapton à 2 V.....	79
Figure 6.17 : Graphe comparatif des substrats de verre et Kapton.....	81
Figure 6.18 : Simulation et image thermique des interconnexions minces à 3 V	82
Figure 6.19 : Simulation et image thermique des interconnexions à pointe triangulaire .	82
Figure 6.20 : Simulation et image thermique des interconnexions triangulaires	83
Figure 6.21 : Puissance d'allumage selon le motif de résistance	84
Figure 6.22 : Simulation et photo prise d'une résistance à 6 branches ayant chauffé.....	85
Figure 6.23 : Puissance d'allumage selon la recette de nanothermites	87

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Classification des satellites	2
Tableau 2.1 : Comparaison d'éléments des matrices de micropropulseurs existantes	17
Tableau 2.2 : Propriétés nécessaires au dispositif	18
Tableau 4.1 : Recette d'épandage de la résine photosensible	34
Tableau 5.1 : Dimensions désirées des chambres.....	42
Tableau 5.2 : Dimensions désirées des tuyères	44
Tableau 5.3 : Températures de surface atteinte par résistance	55
Tableau 6.1 : Dimensions désirées et réelles des chambres	64
Tableau 6.2 : Comparatifs des valeurs de la Tuyères 12° non recuits	67
Tableau 6.3 : Comparatifs des valeurs de la Tuyères 45° non recuite.....	69
Tableau 6.4 : Dimensions réelles de la sous-couche Tuyères 12°	71
Tableau 6.5 : Dimensions réelles de la sous-couche Tuyères 45°	73
Tableau 6.6 : Mesure du décalage entre les couches de tuyères.....	76
Tableau 6.7 : Taux de succès selon le substrat	80
Tableau 6.8 : Taux de succès des motifs de résistance.....	84
Tableau 6.9 : Taux de succès des recettes de nanothermite	86

LISTES DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

AP	Ammonium Perchlorate (NH_4ClO_4)
DRIE	Deep Reactive-Ion Etching
ESD	Electro Static Discharge
GAP	Glycidyl Azide Polymer
GPS	Global Positioning System
HTCC	High Temperature Cofired Ceramic
IPA	IsoPropanol Alcohol
KOH	Hydroxyde de potassium
LTCC	Low Temperature Cofired Ceramic
MIC	Metastable Intermolecular Composite
SPM	Solid Propellant Microthruster
SSI	Station Spatiale Internationale
UV	Ultraviolet

RÉSUMÉ

Ce mémoire présente la conception, la fabrication et les tests d'allumage d'une matrice de micropropulseurs à combustible solide servant à améliorer la manœuvrabilité des microsattellites du type CubeSat dans l'espace. La trajectoire orbitale de ces petits engins d'exactement un litre de volume se doit d'être continuellement corrigée et ils doivent éventuellement être redirigés vers la Terre pour éviter l'accumulation de déchets spatiaux. En plus des restrictions au niveau du poids et de la puissance, des contraintes importantes de dimensions doivent être tenues en compte afin de rendre les dispositifs de propulsion utilisables sur des microsattellites. Ainsi, le design conçu pour le présent projet permet la réalisation d'une matrice avec un total de 192 micropropulseurs (14 x 14) à poussée unique, disposés sur une surface d'à peine 25 cm² et d'une épaisseur de 3 mm. La particularité de ce dispositif provient du procédé de fabrication innovateur. En effet, ce type de conception de couches superposées à la verticale, plutôt que latéralement, n'a jamais été réalisé avec les matériaux du projet. En outre, l'emploi d'un modèle superposé permet de fabriquer des matrices de micropropulseurs sur deux dimensions dans un nombre beaucoup plus élevé que ce qui existe actuellement. De plus, les matériaux utilisés permettent d'obtenir des dimensions précises pour les couches des chambres et des tuyères, tout en ayant une très bonne isolation thermique et résistance mécanique. D'autre part, les tests effectués sur l'amorce de nanothermite ont montré qu'une puissance de seulement 275 mW est nécessaire à l'allumage. Le procédé de fabrication novateur des chambres et des tuyères en LTCC et les résultats des tests d'allumage seront détaillés. Finalement, la possibilité d'améliorer le dispositif ainsi que des pistes de recherche sur les matériaux seront aussi discutées.

MOTS-CLÉS : micropropulseurs, combustible solide, CubeSat, tuyères, chambres, Low Temperature Cofired Ceramic

ABSTRACT

This thesis presents the design, fabrication process and ignition tests of a matrix of solid propellant microthrusters (SPM). Those microthrusters are used to increase the maneuverability of miniaturized satellites, like CubeSat. The orbital trajectory of those small objects, whose volume is exactly a liter and weight is around one kilogram, must be continually corrected. Also, at the end of its functional life, the satellite should be redirected to Earth to avoid the accumulation of spatial garbage. In addition to the weight and the power restrictions, more important constraints of dimensions must be considered to ensure the usability of the device on microsattellites. Therefore, the conceived design for this project allows the realization of a matrix of 192 unique digital microthrusters (14 x 14) on a surface as small as 25 cm² with a thickness of 3 mm. The uniqueness of this device is a result of the innovative fabrication process. Indeed, the layered design proposed, vertically instead of laterally, has never been produced with the kind of materials used. Moreover, the use of this layered model allows a fabrication of a 2D matrix of microthrusters in a bigger number than what presently exists. The material used allows accurate dimensions for the chambers and nozzles layers with a good thermal insulation and mechanical resistance as well. Also, the results of the nanothermite ignitions tests showed a required power as low as 275 mW. The innovative fabrication process of the chambers and nozzles layers and the tests of the first ignition step are detailed. Finally, the upgradability of the device and some new research avenues will be discuss.

KEYWORDS : microthrusters, solid propellant, CubeSat, nozzles, chambers, Low Temperature Cofired Ceramic

CHAPITRE I

INTRODUCTION

De la fin des années 1950 à aujourd'hui, l'industrie spatiale s'est développée à une vitesse fulgurante. Des premiers satellites artificiels, en passant par les premières missions habitées jusqu'aux stations de recherche de la défunte Mir à la Station Spatiale Internationale (SSI), l'Homme s'est approprié l'orbite de sa propre planète. À un point tel qu'aujourd'hui, nombreux sont les systèmes qui nous sont indispensables et qui dépendent de satellites en orbite. Nous n'avons qu'à penser au GPS, au système de télécommunication, à la météorologie ainsi qu'aux systèmes de surveillance.

Les satellites orbitaux ont cependant quelques défauts. Les dimensions de ceux-ci les rendent très onéreux, plusieurs millions de dollars pièces, et leur déploiement requiert beaucoup de main-d'œuvre et une très grande précision. De plus, la durée de vie des satellites conventionnels est habituellement limitée entre 10 à 15 années de service. Ceci met une grande pression quant aux retombées économiques de la mise en service d'un satellite. Cependant, avec les exploits accomplis dans le domaine de la miniaturisation, il est maintenant possible de fabriquer un satellite d'une dimension réduite à un coût beaucoup plus faible, de l'ordre de dizaines de milliers de dollars. Un seul satellite pourra alors être remplacé par une multitude de petits (microsatellite), fonctionnant comme un ensemble neuronique, le tout à coût moindre et sans entretien.

1.1 Les microsattellites

L'utilisation de microsattellites aux mêmes fins que ceux de grandeur standard actuellement déployés est en voie de devenir une norme dans l'industrie. Ce changement est principalement dû aux coûts induits par la fabrication des satellites traditionnels (quelques millions de dollars) et aussi ceux des lancements, s'élevant entre 10 000 et 20 000 \$ par kilogramme. Des raisons organisationnelles sont aussi en cause dans le remplacement de ces satellites conventionnels par leurs semblables en version miniature.

1.1.1 Qu'est-ce qu'un microsattellite

Un amalgame est souvent fait entre picosatellite, nanosatellite et microsattellite. La différence est cependant bien établie selon leur masse, comme mentionné au tableau 1.1 (Buchen, 2014).

Tableau 1.1 : Classification des satellites

Classe de satellite	Masse
Femtosatellite	10 à 100 g
Picosatellite	Moins de 1 kg
Nanosatellite	1 à 10 kg
Microsatellite	10 à 100 kg
Petit satellite	100 à 500 kg
Satellite standard	500 kg à plusieurs tonnes

Un projet de standardisation a débuté en 1999 par la collaboration de deux universités, délivrant un manuel de spécifications. Ce manuel, continuellement remis à jour (Pignatelli, 2013), a pour but de rendre plus accessible, tant aux universités qu'à des entreprises ou des particuliers, le développement et l'utilisation de picosatellites. Ce projet, CubeSat (fig. 1.1), est alors devenu une référence, organisant des concours annuels et offrant une ouverture sur une communauté spécialisée. Cependant, aucune

norme officielle ne gère la dénomination des satellites précédemment cités. De plus, plusieurs composants peuvent s'incorporer à la fois à des picosatellites et à des microsattelites. C'est pourquoi on se doit de garder un esprit ouvert sur l'appellation d'un satellite, microsattellite faisant plutôt une référence générale à un satellite de petite taille.

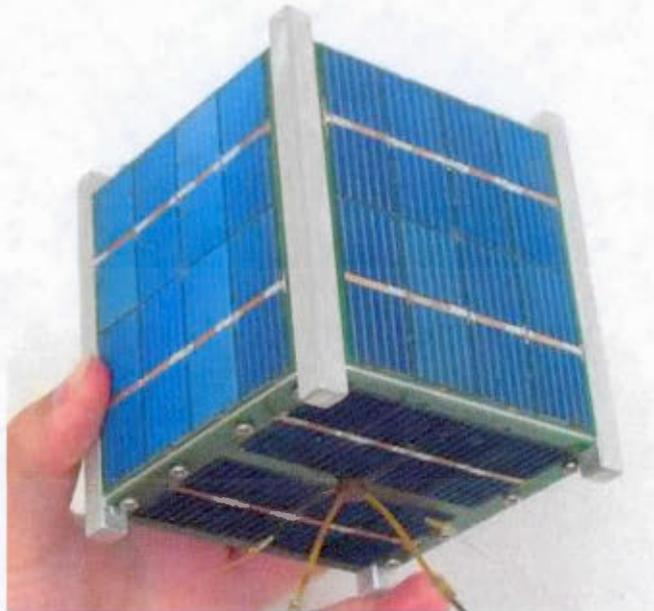


Figure 1.1 : Vue d'un CubeSat

Récupéré de <http://www.space.com/13283-small-satellites-cubesats-research-technology.html>

1.1.2 Utilité

Le principal attrait de ces petits satellites est à priori leur cycle de développement très réduit. De ce fait, cela ouvre la porte aux projets universitaires, aux plus petits centres de recherche, aux entreprises, voire même aux particuliers. Différentes missions sont maintenant envisageables grâce au faible coût de production et des coûts de lancement inférieurs grâce à la réduction du poids des satellites. Ces missions peuvent être liées à la télécommunication, à la recherche atmosphérique, biologique ou fondamentale et même à l'imagerie spatiale et terrestre.

À l'instar du système de positionnement GPS (Global Positioning System), qui dépend d'un réseau de 24 satellites positionné à des orbites précises (voir fig. 1.2), il est possible de concevoir un réseau de microsattelites.

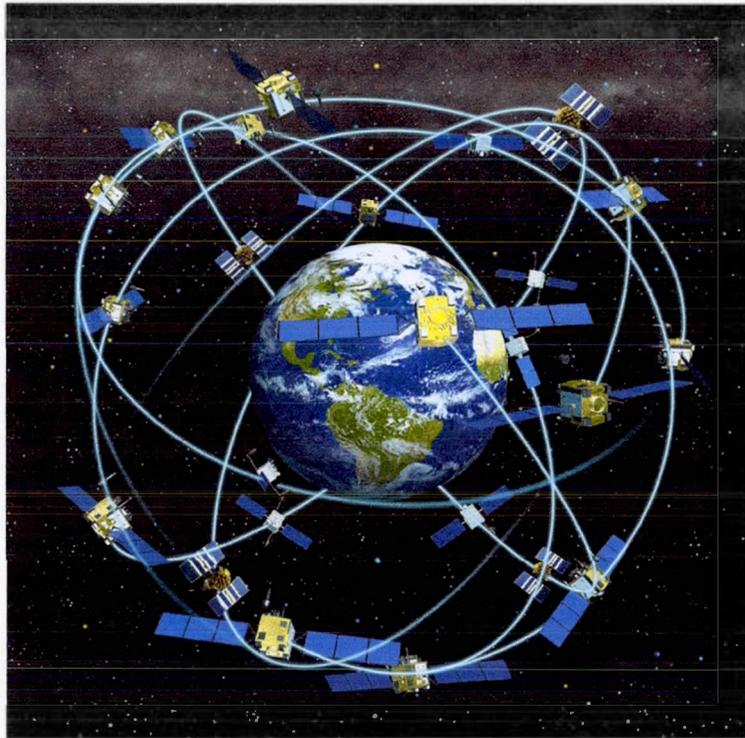


Figure 1.2 : Satellites en orbite formant le réseau du système GPS
Récupéré de <http://celebrating200years.noaa.gov/transformations/gps/#intro>

Ces microsattelites peuvent fonctionner de manière indépendante ou en coopération les uns avec les autres. D'ailleurs, un projet regroupant plusieurs communautés universitaires internationales, le projet QB50 (www.qb50.eu), s'est développé. Celui-ci a pour but de créer un réseau de 50 microsattelites à placer en orbite dans la basse thermosphère (90 à 350 km), afin de prendre différentes mesures et surtout de démontrer la faisabilité de cette technique.

1.1.3 Avantages et utilisateurs

Ce qui fait que ces missions soient plus envisageables est principalement les coûts de conception, de fabrication et de mise en orbite. Ceux-ci étant moindres, les risques financiers sont de beaucoup amoindris. Les durées de vie de ces microsattellites en orbite rapprochée étant autour de 40 jours, une mauvaise conception peut plus facilement être corrigée par des versions améliorées. Le cycle de conception est aussi tellement réduit que presque n'importe qui pourrait en fabriquer et en envoyer un. Cette démocratisation de l'orbite spatiale a pour effet de faire éclater le vase clos des quelques privilégiés que sont les agences gouvernementales et les grosses entreprises aux moyens financiers suffisants.

1.2 Exigences des microsattellites

Un problème se pose quant à la manœuvrabilité de ces microsattellites une fois dans l'espace. Afin de bien les positionner en orbite, d'opérer des corrections de trajectoires ou même d'effectuer un décrochage vers la Terre, l'amenant à se désintégrer, un système de propulsion est requis. Ce système se doit d'être petit, léger et relativement puissant afin de procurer une force assez grande pour bouger l'engin. De plus, il devrait être possible de propulser l'engin à plusieurs reprises afin qu'il soit fonctionnel jusqu'à la fin de sa durée de vie utile.

1.3 Objectif de la recherche

Le principal objectif de cette recherche est de développer un système de micropropulseurs à combustible solide permettant une manœuvrabilité du microsattellite tout au long de sa durée de vie. Le système compact et léger devra tout de même pouvoir fournir une poussée suffisante à la redirection de l'engin spatial. De plus, le tout doit être fait avec une perspective de faible coût et de grande flexibilité et adaptabilité.

1.4 Hypothèse de la recherche

Pour remplir les objectifs fixés, l'utilisation du matériau LTCC (Low Temperature Cofired Ceramic) pour les couches des chambres et des tuyères est une des options étudiées. Ce matériau étant une céramique, malléable avant cuissons, offre une bonne isolation thermique et une solidité accrue. De plus, il peut être travaillé afin de lui donner la forme désirée. Une technique de fabrication innovante, à la verticale, a été sélectionnée pour permettre de produire des matrices de micropropulseurs en s'assurant un coût moindre et en un temps réduit.

Afin d'obtenir un système d'allumage consommant beaucoup moins de puissance, une amorce de nanothermites allumée par une microrésistance sera utilisée. De surcroît, l'utilisation d'un substrat de Kapton, qui est un faible conducteur thermique et sur lequel repose la microrésistance, devrait diminuer les pertes de chaleur et ainsi maximiser le rendement énergétique du dispositif.

1.5 Présentation du mémoire

Dans ce mémoire, une vue d'ensemble des technologies de micropropulsion existantes sera présentée. En ressortiront les bases nécessaires pour la conception et la fabrication d'un bon micropropulseur. Ensuite sera abordée la théorie de fonctionnement du micropropulseur à combustible solide. Le quatrième chapitre se concentrera sur les procédés de fabrication des couches formant la matrice de micropropulseurs. Les détails ayant mené à la conception ainsi que les résultats des multitudes simulations seront présentés au cinquième chapitre. Le montage test utilisé pour les essais du premier étage d'allumage y sera aussi détaillé. Le sixième chapitre présentera les résultats de fabrication des couches ainsi que les résultats d'allumage. Ce mémoire se terminera par les conclusions et abordera les avancements futurs possibles à court et moyen terme.

1.6 Contributions attendues

Cette recherche doit contribuer à l'avancement des techniques de propulsion pour de petits objets dans l'espace. De plus, la technique de fabrication qui sera démontrée étant abordable, cela devrait paver encore plus la voie à des projets de microsattellites pour les universités ou les petites entreprises qui ne peuvent actuellement se le permettre. Aussi, il est permis de penser qu'une commercialisation future du dispositif est possible. Des contributions plus spécifiques sont aussi anticipées :

- Il pourra être possible de déterminer dans quelle mesure l'utilisation d'une amorce permettra d'améliorer l'efficacité des micropropulseurs.
- La technique d'allumage des nanothermites utilisée, par effet Joule, n'est pas courante et apportera assurément beaucoup de renseignements sur cette façon de faire.
- Les simulations effectuées vont permettre d'identifier les caractéristiques optimales pour obtenir un allumage à une puissance la plus basse possible.
- L'incorporation d'un substrat flexible de Kapton, sur lequel repose la résistance chauffante, permettra du même coup l'isolement du combustible et une force nécessaire à sa rupture bien plus faible, accordant le surplus de force à une plus grande poussée.
- L'utilisation d'un matériau non conventionnel tel que le LTCC pourrait offrir de nouvelles possibilités de conception pour des couches nécessitant un usinage de précision. La possibilité de choisir l'angle d'ouverture des tuyères est une des options intéressantes provenant du LTCC.

CHAPITRE II

REVUE DE LITTÉRATURE

Plusieurs prototypes de micropropulseurs ont été conçus, jumelant les concepts de propulsion spatiale à la miniaturisation. Tous ont leurs avantages et leurs inconvénients propres. Le choix du micropropulseur à utiliser est fait en tenant compte des compromis qu'il est possible de faire dans un projet donné.

Le type de micropropulseur se définit essentiellement par le combustible utilisé. Les principaux sont ceux à gaz refroidi, à bicombustible, à monocombustible, à ion, à plasma et finalement à combustible solide (Sathiyathan, 2011) (Larangot *et al.*, 2002).

2.1 Types de micropropulsion

Un document compilant les types de propulsions (Mueller *et al.*, 2010) fait une énumération plus exhaustive dans lequel se trouvent les avantages et inconvénients de chacun. Cependant, les modes de propulsion non mentionnés ici sont très exotiques et leur utilisation est plutôt théorique.

Le micropropulseur à gaz refroidi utilise, comme son nom l'indique, un gaz froid. Ce dernier, plus couramment de l'azote, est comprimé à haute pression dans un réservoir. Il est relâché une fois l'allumage activé. C'est la différence de pression, jumelée à la forme de la tuyère qui entrainera une poussée de quelques mN sur une dizaine de

secondes (Larangot *et al.*, 2002). L'azote a comme avantage de ne coûter presque rien. Par contre, le transport de ce gaz refroidi jusque dans l'espace peut poser problème.

Celui à deux combustibles fonctionne grâce à la réaction engendrée par le mélange des deux carburants, habituellement de l'oxygène liquide et de l'éthanol. Ceux-ci sont contenus dans deux réservoirs indépendants. Un système de petits tuyaux les relie à une chambre des mélanges, où la réaction se passe. Un gradient de pression s'installe ensuite dans la chambre et provoque une poussée de près de 1 N (Larangot *et al.*, 2002). Cette fois aussi, les carburants ne sont pas très chers. Mais le transport pose encore problème et le mélange que l'on doit faire pour démarrer la réaction n'est pas toujours des plus homogène.

Les micropropulseurs fonctionnant à l'aide d'un seul combustible sont généralement alimentés par de l'hydrazine, qui sert de combustible pour le système de fusées d'appoints, ou du peroxyde d'hydrogène. Les principaux inconvénients de ces dispositifs sont les grandes précautions à prendre lors de la manutention et la toxicité du carburant. Cependant, une faible puissance d'entrée est requise afin de déclencher la réaction (500 mW) pour obtenir une poussée de quelques mN (Platt, 2002). Le coût de ces micropropulseurs est très faible, de l'ordre des quelques centaines de dollars. La figure 2.1 montre un modèle de micropropulseurs à un seul combustible.



Figure 2.1 : Réservoir de combustible au peroxyde d'hydrogène (Platt, 2002)

Le propulseur micro-ionique (fig. 2.2) est basé sur l'ionisation d'un gaz, habituellement le Xénon. En appliquant une différence de potentiel de l'ordre de 1 kV, une force électrostatique est créée, entraînant une accélération. Il est ainsi possible d'obtenir des poussées de quelques mN, mais pour des périodes de temps très étendues, de près de 300 secondes. Une puissance de 50 Watt est cependant requise (Mueller *et al.*, 2000).

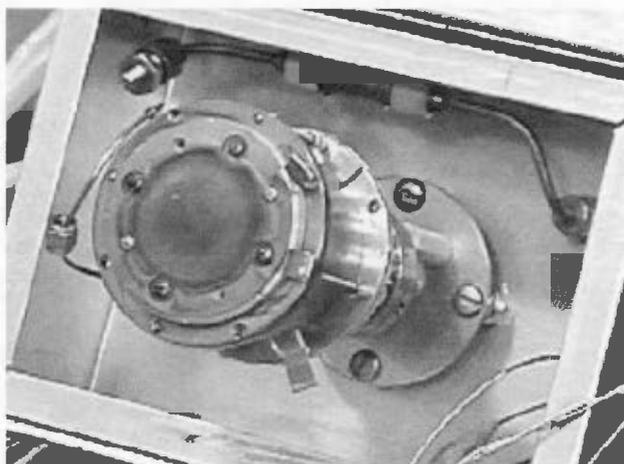


Figure 2.2 : Propulseur micro-ionique (Mueller *et al.*, 2000)

Une autre technique de propulsion intéressante est la propulsion par plasma. Généré à l'aide d'une diode, un faisceau laser produit un pulse, créant un plasma sur une surface à graver. Une lentille focalise le faisceau laser afin de diriger l'ablation, ce qui provoque un jet qui amène la poussée. Une faible puissance de 1 Watt est requise pour obtenir une poussée de 100 μ N pendant 100 secondes (Phipps et Luke, 2002). La création de ce type de propulsion requiert cependant une habileté technique hautement spécialisée.

Finalement, les micropropulseurs peuvent être faits de combustible solide (Lewis *et al.*, 2000) (Rossi, C *et al.*, 2006). Étant donné que c'est l'option sélectionnée dans le cadre de ce projet, elle sera plus longuement détaillée dans la section suivante.

2.2 Micropropulsion à combustible solide

De la multitude de micropropulseurs mentionnés, il y en a un particulier qui semble être le plus réalisable avec la technologie d'aujourd'hui. Il s'agit de celui développé par Rossi *et al.* (2002) comprenant un combustible solide. D'ailleurs à la même époque, un groupe d'Américains développait un micropropulseur semblable (Lewis *et al.*, 2000). À l'aide d'un matériau résistif, une température d'allumage est atteinte et allume un combustible. Celui-ci, en se consumant, augmente la pression dans la chambre et, à l'aide d'une tuyère, produit une force de poussée.

Le combustible étant solide, aucune pièce n'est mobile, augmentant du coup sa résistance aux vibrations. Aucune fuite n'est aussi possible, car aucun liquide n'est présent. De plus, l'assemblage est très simple comparé aux autres types de micropropulseurs et la fabrication de chaque couche est indépendante des autres. Ceci rend le processus de fabrication beaucoup moins critique. La puissance requise pour atteindre la température d'allumage est de l'ordre des milliwatts et est dépendante du matériau utilisé.

Le principal inconvénient est l'impossibilité de se servir du micropropulseur plus d'une fois, ce qui signifie qu'une seule correction de trajectoire est possible. C'est pourquoi une conception matricielle est intéressante pour pallier ce manquement. C'est d'ailleurs ce qui fait du modèle élaboré par Rossi *et al.* une des références, car une conception en matrice peut facilement être implémentée.

2.2.1 Architecture

En regardant uniquement leur architecture, les différents micropropulseurs à combustible solide conçus peuvent être classifiés en deux catégories.

Il y a tout d'abord ceux faits d'une manière latérale, fabriqués et assemblés de côté (Zhang, K. *et al.*, 2005) (Cheah et Chin, 2011) (London *et al.*, 2001). La gravure nécessaire pour donner au composant la forme désirée, qu'elle soit humide (KOH, HF), sèche (O₂) ou mécanique, est beaucoup plus facile à faire, car elle est moins profonde. Les temps de gravure sont donc beaucoup moins importants et la contrôlabilité de la gravure est supérieure. Il est cependant très difficile de concevoir une matrice de plusieurs micropropulseurs avec une telle architecture.

La seconde catégorie d'architecture est celle proposée par Rossi *et al.* (2002), les couches empilées les unes sur les autres, donc bâties en hauteur. Cette manière de faire permet de fabriquer une matrice de deux dimensions de micropropulseurs, ayant ainsi comme résultat un grand nombre de poussées individuelles disponibles. Le modèle de Rossi propose trois couches distinctes à des micropropulseurs à combustible solide. La chambre contenant le combustible, l'allumeur et la tuyère, servant à transformer l'énergie des gaz en force de poussée. Le tout est scellé par le bas à l'aide d'une mince couche de Pyrex. C'est cette architecture qui est devenue un modèle de référence pour les micropropulseurs, principalement ceux à combustible solide. La facilité avec laquelle il est possible de construire plusieurs micropropulseurs dans un même procédé (Rossi, C *et al.*, 2006) est le principal avantage de son utilisation.

2.2.2 Chambre à combustion

La plupart des chambres fabriquées dans les articles analysés ont une forme de prisme rectangulaire (Rossi *et al.*, 2002) (Tanaka *et al.*, 2003) (Zhang *et al.*, 2004) (Lee *et al.*, 2010). Ceci est dû aux différents procédés de fabrication utilisant des gravures

anisotropiques afin d'obtenir des murs les plus droits possible. Le matériau le plus utilisé est le silicium. Très peu coûteux, il est isolant thermiquement, bien qu'il ne soit pas le meilleur. Le procédé de gravure Bosch, utilisé lorsque la gravure est profonde, est fréquemment employé pour construire les chambres à combustion. Ce procédé utilise le DRIE avec les gaz SF_6 et C_4F_8 à tour de rôle. Le premier est un réactif gravant le silicium et le second agit comme couche de passivation.

Afin d'augmenter l'isolation thermique autour du carburant, du Pyrex a été utilisé au lieu du silicium (Tanaka et al., 2003). Les gravures ont été effectuées avec de l'HF. D'autres ont plutôt utilisé du verre photosensible Foturan (Rossi, C *et al.*, 2002). Ce verre, une fois exposé aux UV, se grave beaucoup plus rapidement, toujours avec du HF. Il est cependant très dispendieux et les gravures humides faites avec cet acide peuvent poser des problèmes lorsque le matériau est épais. En effet, les UV n'atteignent pas le fond de la même manière qu'à la surface, à cause de la réfraction et de la perte de puissance de ceux-ci. À mesure qu'ils s'enfoncent dans le verre, il devient donc difficile d'obtenir des murs aussi droits que désiré.

Un matériau plus moderne est maintenant utilisé par certains pour diminuer encore plus la conductivité thermique, il s'agit du Low Temperature Cofired Ceramic (LTCC) (Zhang, K. *et al.*, 2005). Cette céramique est très molle et malléable avant sa cuisson. Il est donc possible de la travailler, d'y déposer de minces couches métalliques et même de la percer et la poinçonner. C'est un avantage considérable que les autres matériaux ne possèdent pas, étant déjà très rigides à la base. La céramique peut aussi être empilée par laminage afin d'obtenir l'épaisseur désirée. L'alignement des couches, une fois travaillées, amène cependant une difficulté au niveau de la précision requise. Après avoir fait les motifs désirés, la céramique est cuite en suivant une courbe de température très précise, avec un maximum de 875 °C. Un désavantage de ce matériau est qu'il se contracte lors de la cuisson. Il est donc impératif de prendre en compte cette diminution lors de la coupe des morceaux de céramique.

2.2.3 Tuyère

Les tuyères sont faites, dans la plupart des articles revus, du même matériau que celui de la chambre (London *et al.*, 2001) (Cheah *et al.*, 2011) (Zhang *et al.*, 2004). Il faut cependant leur donner une forme particulière, une partie doit être concave et l'autre convexe. Tout comme pour les chambres à combustion, la plupart des modèles utilisent des tuyères en forme pyramidale. C'est dû aux limites associées aux différents procédés utilisés, dont le Bosch, la gravure HF ou le KOH (Rossi, C *et al.*, 2002). Par contre, l'utilisation d'un laser pour l'ablation du matériau offre la possibilité de contrôler l'angle d'ouverture de la tuyère, ce qui influence directement la force de poussée. Le laser perdant de la puissance en fonction de la profondeur désirée, il en résulte une tuyère mal définie, surtout si elle est épaisse. Tout ceci est sans parler du temps de fabrication qui est extrêmement long. L'utilisation du LTCC offre encore une fois de multiples possibilités quant au design de la tuyère. Il est possible d'utiliser le laser pour l'ablation, mais aussi des moyens mécaniques tels le fraisage ou le poinçonnage. C'est grâce à de tels procédés que des dispositifs de micropropulsion ont déjà été conçus (Zhang, K. *et al.*, 2005) (Tanaka *et al.*, 2003).

2.2.4 Allumeur

La source d'allumage pour un micropropulseur à combustible solide est une microrésistance chauffante. Afin de minimiser la puissance consommée, le transfert de chaleur entre la résistance chauffante et le combustible devra être maximal. Toute perte thermique est une dépense d'énergie inutile. Il est donc impératif que la résistance soit en contact direct avec le carburant. C'est ce qui fait défaut dans le modèle de Lee (Lee *et al.*, 2010), car la chaleur doit diffuser à travers une mince couche de verre afin de se rendre au carburant. C'est pour cette raison qu'une puissance élevée de 340 mW est nécessaire pour une augmentation de température de seulement 235 °C afin d'atteindre

260 °C, soit la température d'allumage du combustible qu'ils ont utilisé (Rossi, C et *al.*, 2006) (Zhang, K. L. *et al.*, 2007).

L'uniformité de la température sur l'élément chauffant est aussi un des facteurs importants à considérer. Plus la température sera uniforme, meilleur sera le transfert vers le combustible avec lequel il est en contact. C'est un thème abordé dans l'article de Roy (Roy *et al.*, 2010). En ayant de grosses disparités entre divers endroits de la résistance, un stress est induit pouvant causer des ruptures. Ces points chauds sont donc à éviter le plus possible. C'est pourquoi Roy a arrondi tous les coins de la résistance. De cette manière, la densité de courant devient beaucoup plus uniforme à travers la résistance, de même que la température.

Finalement, les matériaux utilisés devront, tout comme pour les autres sections du système, avoir une excellente résistance aux vibrations excessives et aux chocs. La mise en orbite des satellites met ceux-ci et leurs composantes à rude épreuve.

2.3 Résumé

Quelques-uns des dispositifs permettant une manœuvrabilité dans l'espace de petits satellites de type CubeSat viennent d'être passés en revue. Certains semblent assez exotiques, d'autres promis à des développements futurs. Ils ont cependant tous des points positifs et négatifs qui les distinguent. Le tableau 2.1 qui suit relève quelques éléments importants de chacun des dispositifs. De plus, les meilleures options ont été mises en évidence.

Tableau 2.1 : Comparaison d'éléments des matrices de micropropulseurs existantes

Modèles de matrice de micropropulseurs	Puissance d'allumage requise	Matériel de fabrication	Assemblage	Fabrication	Demi-angle des tuyères	Poussée mesurée
Zhang <i>et al.</i> (2005)	1332 mW	LTCC	Latérale	Couches indépendantes	16°	380 mN
Rossi <i>et al.</i> (2006)	80 à 150 mW	Foturan (chambre) et Silicium	Superposé	Couches indépendantes	2° fixe	0.3 à 30 mN
Tanaka <i>et al.</i> (2007)	3000 à 4000 mW	Verre et silicium (tuyère)	Superposé	Plusieurs étapes sur 3 couche indépendantes	35,25° fixe	4 mN
Lee <i>et al.</i> (2010)	340 mW	Verre	Superposé	Couches indépendantes	7° fixe	3619 mN

Les micropropulseurs nécessitant le moins de puissance pour l'allumage ne requièrent que des centaines de milliwatts. Par contre, les plus énergivores doivent consommer plus d'un Watt. Le matériau dans lequel ils sont fabriqués est soit du verre, photosensible (Foturan) ou non, du silicium ou de la céramique sous forme de LTCC. Un assemblage superposé est à prioriser, car cela permet la fabrication d'une matrice en deux dimensions et donc, un plus grand nombre de micropropulseurs à la fois. Afin de faciliter la réalisation, la fabrication d'une manière indépendante des différentes couches est préférable, comme dans la plupart des modèles fabriqués. Le principal problème des micropropulseurs passés en revues est la difficulté d'avoir un demi-angle

d'ouverture suffisant pour maximiser la poussée. Les techniques et les matériaux utilisés, tels que la gravure DRIE ou l'utilisation du KOH sur le silicium, sont les causes de cette limitation. Ainsi, la possibilité de modifier les angles d'ouverture en apportant peu de changements au procédé serait un grand avantage. Enfin, les forces de poussée mesurées varient beaucoup selon le micropropulseur testé. Celle de Lee *et al.* (2010) a une surprenante poussée de près de 4 N. Les autres ont cependant une poussée oscillant entre un et quelques centaines de millinewtons.

C'est avec ces considérations d'assemblage et de fabrication que l'élaboration d'une matrice de micropropulseurs à combustible solide a été développée. Ce procédé est relativement simple et peut facilement être amélioré.

Afin d'obtenir le meilleur micropropulseur possible, il faudra remplir des conditions essentielles pour chacune des couches fabriquées. Plusieurs d'entre elles sont évidemment interreliées. Elles sont détaillées dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Propriétés nécessaires au dispositif

Chambre et tuyère	Allumeur
<ul style="list-style-type: none"> • Isolation thermique élevée • Parois internes droites pour les chambres • Angles d'ouvertures précis pour les tuyères • Procédé de fabrication simple • Résistance aux vibrations • Assemblage facile 	<ul style="list-style-type: none"> • Puissance nécessaire à l'allumage minimal (quelques mW) • Transfert de chaleur optimal (résistance en contact avec le combustible) • Coût relativement faible • Résistance mécanique élevée • Répartition uniforme de la chaleur

En ce qui concerne les chambres à combustion, la priorité ira à l'isolation thermique. Il est impératif qu'une charge, lorsqu'allumée, n'en déclenche pas une autre voisine. Le matériau se doit donc d'être isolant. Théoriquement, la céramique s'y emploie très bien. Les murs des chambres doivent être le plus lisse et droit possible, car des défauts dans ceux-ci peuvent amener des différences dans les poussées.

Les tuyères doivent être elles aussi très lisses afin de garantir l'uniformité de la poussée. Permettant de transformer la différence de pression en une force de poussée, elles sont essentielles au fonctionnement des dispositifs. Lors de la fabrication, il sera nécessaire de pouvoir choisir l'angle d'ouverture afin d'ainsi obtenir des tuyères optimisant l'efficacité.

Finalement, pour ce qui est de l'allumeur, il doit d'abord consommer le moins de puissance possible et permettre l'ignition du combustible. Cette puissance d'allumage dépend d'abord du combustible, mais aussi du transfert de la chaleur de l'élément au carburant. En effet, l'énergie consommée, une fois le satellite dans l'espace, est une des principales données à tenir en compte. L'énergie emmagasinée n'étant pas infinie, chaque instrument fonctionnel draine une partie de celle-ci. De plus, le système devra pouvoir résister aux vibrations et garantir l'allumage du combustible une fois en orbite.

Il est donc possible, aux vues des autres dispositifs qui sont rapportés dans la littérature, de développer et fabriquer un prototype de matrice de micropropulseurs à combustible solide combinant les avantages de chacun. L'utilisation de LTCC viendra simplifier cette démarche, ayant les caractéristiques thermiques de la céramique, tout en étant malléable avant sa cuisson. Aussi, l'amélioration de l'allumeur réduira la puissance consommée pour amorcer la réaction délivrant la poussée requise.

CHAPITRE III

THÉORIE

Ce chapitre présente les bases théoriques permettant de comprendre le fonctionnement d'un micropropulseur à combustible solide. Quelques notions supplémentaires sur des parties essentielles du dispositif seront aussi définies.

3.1 Fonctionnement des micropropulseurs à combustible solide

Tous les micropropulseurs de la matrice sont identiques et indépendants les uns des autres. Un circuit de contrôle, qui ne sera pas conçu dans le cadre de ce mémoire, permettra de choisir le micropropulseur à utiliser. Ce circuit guidera alors le courant à travers un réseau d'interconnexions, jusqu'au système d'allumage du micropropulseur désiré (fig. 3.1).

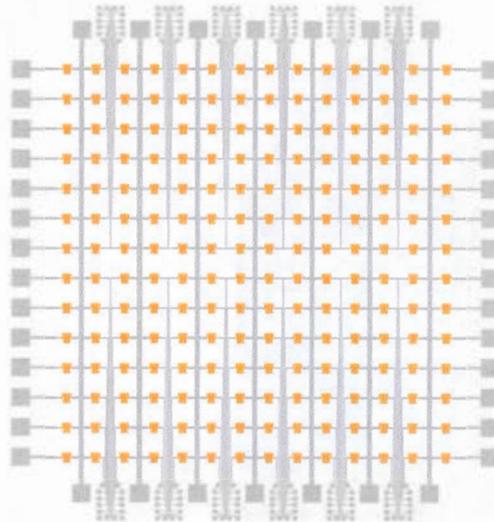


Figure 3.1 : Exemple d'un système d'interconnexions

Le système d'allumage d'un micropropulseur est constitué d'une petite résistance métallique sur un substrat étant à la fois un isolant électrique et thermique. Par l'effet Joule, la résistance dégagera de la chaleur. Cette chaleur sera transmise par conduction à une amorce composée de nanothermite. Lorsqu'une certaine température est atteinte (près de 200 °C), les nanothermites s'allument et déclenchent alors une explosion. Cette explosion entraîne une augmentation fulgurante de la température localement, permettant d'atteindre la quantité d'énergie nécessaire à l'allumage du combustible principal contenu dans la chambre. Ce propergol, le GAP/AP (Glycidyl Azide Polymer / Ammonium Perchlorate), se consume lentement. Un gaz est produit à mesure que la combustion se fait dans la chambre. Arrivé à la tuyère, ce gaz est comprimé du côté convergent de la tuyère, augmentant encore plus la pression. Il est ensuite évacué par le col de la tuyère, et se décompresse du côté divergent de celle-ci. C'est de cette manière que la force de poussée est créée. La figure 3.2 illustre une représentation latérale des principales couches d'un micropropulseur, tels la tuyère, la couche d'allumage, la chambre et le scellant.

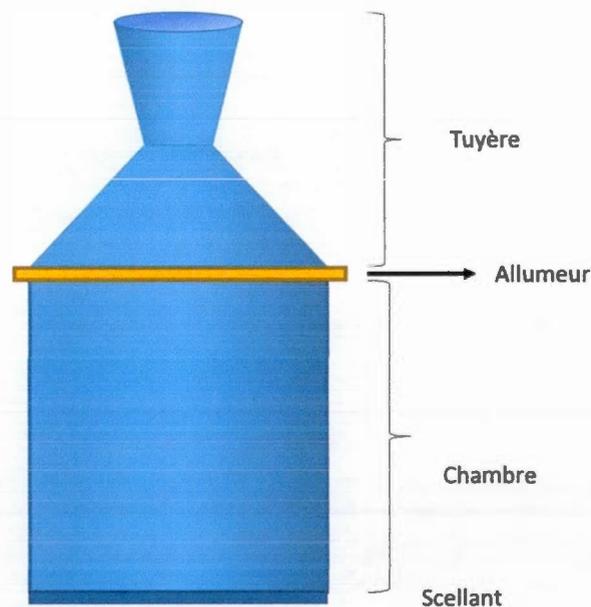


Figure 3.2 : Représentation latérale d'un micropropulseur à combustible solide

3.2 Définitions

3.2.1 Le LTCC (Low Temperature Cofired Ceramic)

Le LTCC est un matériau utilisé habituellement dans la confection de circuits RF à faible coût. Il est composé de céramique, de verre et d'un liant organique. Il est produit sous forme de minces feuilles flexibles et empilables. Elles sont offertes en différentes épaisseurs selon la compagnie (2 mils, 4.5 mils, 6.5 mils et 10 mils). Une feuille plus épaisse entraîne nécessairement une meilleure isolation au bruit induit par les couches voisines. Ces dernières sont traitées séparément pour ensuite être empilées les unes sur les autres afin de concevoir le circuit final.

La fabrication de circuits sur du LTCC doit être faite en plusieurs étapes (voir la figure 3.3).

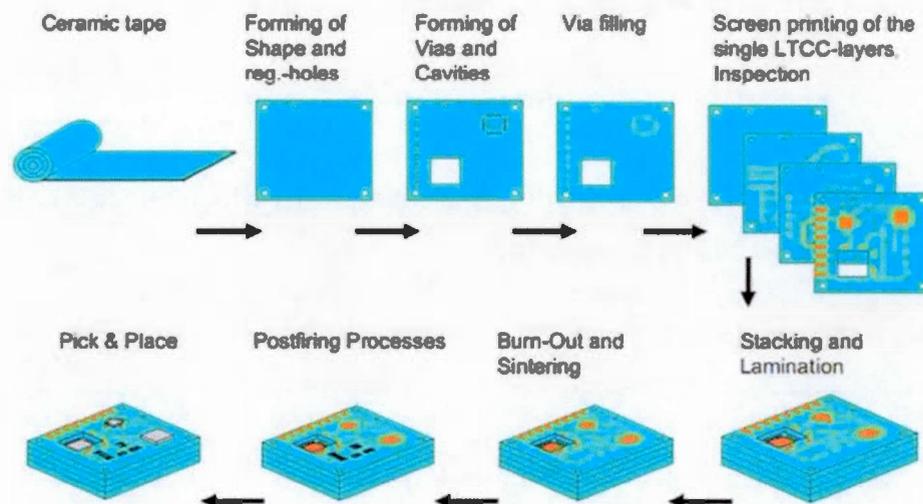


Figure 3.3 : Étapes de fabrication du LTCC Récupéré de <http://www.telecom-bretagne.eu/research/resources/lccc/>

Habituellement, le substrat, les pâtes conductrices formant les interconnexions, ainsi que les composants sont recuits en même temps. Une courbe de cuisson doit être suivie

avec un plateau supérieur sous les 1000 °C. D'où son acronyme de Low Temperature Cofired Ceramic. Le HTCC pour High Temperature Cofired Ceramic nécessite quant à lui une température de recuit aux alentours de 1600 °C.

Outre la caractéristique de très bon isolant électrique de la céramique, elle possède aussi une bonne isolation thermique. C'est un matériau permettant la fabrication de circuits fonctionnant à des températures élevées ainsi que dans des milieux hostiles.

3.2.2 La microrésistance thermique

La microrésistance est, comme son nom l'indique, une résistance de l'ordre du micromètre. Elle varie selon ses dimensions et les matériaux utilisés. Une image prise d'un échantillon d'aluminium sur un substrat de Kapton est illustrée à la figure 3.4. La résistance de celle-ci est donnée par la formule 3.1.

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (3.1)$$

R étant la résistance (Ω), ρ la résistivité du matériau (Ωm), l la longueur de la résistance et s la surface de section transversale (m^2).

Une fois alimentée électriquement, elle chauffe par effet Joule. La puissance peut être calculée par la formule 3.2 qui suit.

$$P = \frac{R}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} i^2 dt \quad (3.2)$$

P étant la puissance moyenne dissipée sous forme de chaleur en une période de temps (W), R la valeur de la résistance (Ω), i le courant circulant dans la résistance (A) et t le temps (s).

La chaleur se dissipe alors de trois différentes façons. Il y a d'abord la convection, en perdant sa chaleur dans l'air ambiant. C'est le principe du chauffage par plinthe électrique. Cet effet ne s'applique cependant pas dans l'espace, dû à l'absence d'air. Ensuite par conduction, lorsqu'il est en contact avec un autre matériau solide ou liquide. La cuisson d'aliments dans une poêle illustre bien cette façon. Finalement, il y a la perte par radiation, émettant de la lumière, visible ou pas, à la manière des ampoules incandescentes.

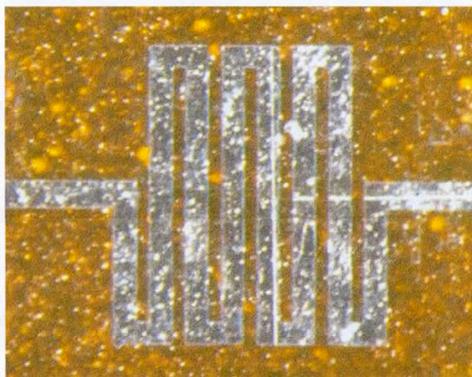


Figure 3.4 : Microrésistance d'aluminium sur une feuille de Kapton

3.2.3 Les nanothermites

Les nanothermites font partie d'une nouvelle classe de matériaux énergétique, les composites intermoléculaires métastables (MIC). Comme son nom l'indique, la nanothermite est constituée de particules nanométriques, sous les 100 nm. Comme la thermite, il s'agit d'un matériau hautement énergétique très sensible à la chaleur ainsi qu'aux décharges électromagnétiques (ESD). Par une réaction d'oxydoréduction, une grande quantité d'énergie peut être violemment produite, principalement sous forme de lumière et de chaleur. Il est d'ailleurs possible d'obtenir des températures de plusieurs milliers de degrés localement. La particularité des nanothermites par rapport à la thermite est sa faible dimension. Ceci augmente de beaucoup la surface de contact entre les particules et, par le fait même, la vitesse, la sensibilité et l'amplitude de la

réaction. Les combinaisons de nanoparticules les plus courantes afin de former des nanothermites contiennent de l'aluminium avec un oxyde de molybdène (MoO_3), de cuivre (CuO), de magnésium (MnO_2) ou de fer (Fe_2O_3) (Yen et Wang, 2012). La figure 3.5 montre des images d'un mélange de particules d'aluminium et d'oxyde de molybdène.

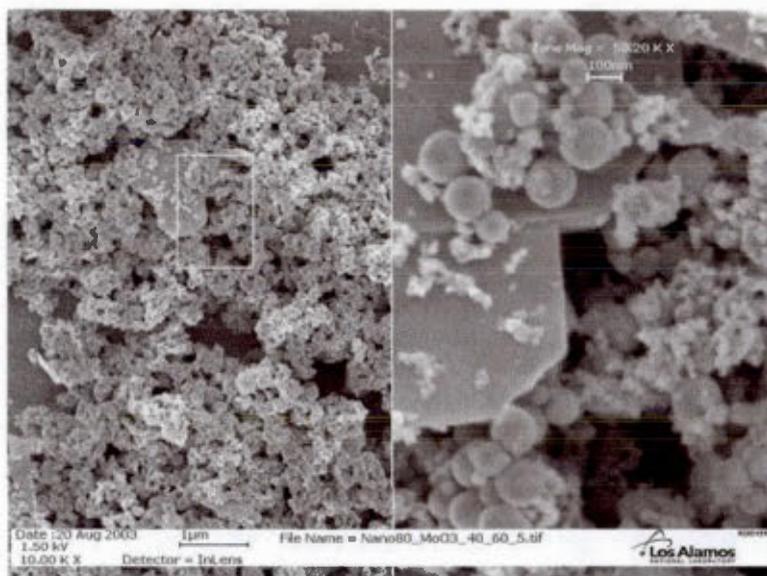


Figure 3.5 : Image SEM d'un composé de particules nanométriques d'Al et MoO_3 avec permission (Granier et Pantoya, 2004)

Grâce à sa capacité accrue d'emmagasiner de l'énergie et à sa vitesse de relâche, comparé à la thermité, la nanothermite est actuellement étudiée à des fins militaires. Les recherches conduites visent principalement la conception de nouvelles classes de bombes et d'explosifs utilisant les nanothermites comme amorce à l'explosif secondaire plutôt que comme explosif principal.

Il a été vu dans ce chapitre le fonctionnement global du micropropulseur à combustion solide ainsi que les principales bases théoriques s'y rattachant, tel que l'utilisation du LTCC, de la résistance thermique et des nanothermites. Ceci aidera à la compréhension des chapitres subséquents.

CHAPITRE IV

PROCÉDÉ DE FABRICATION ET ASSEMBLAGE

Cette partie détaillera les procédés de fabrication pour chacune des couches composant la matrice de micropropulseurs. La dernière section expliquera la manière de procéder pour l'assemblage de ces couches afin d'obtenir un dispositif final fonctionnel.

4.1 Fabrication

Chaque couche du micropropulseur est indépendante des autres. La fabrication des couches peut donc se faire séparément. Cela donne l'avantage de décomplexifier le procédé, permettant, en cas d'erreur, de recommencer la fabrication d'une seule couche plutôt que du dispositif en entier.

4.1.1 Couches de LTCC

La préparation des différentes couches de LTCC se fait d'abord en laminant les feuilles une par-dessus les autres. Le nombre de feuilles ainsi que leur épaisseur respective dépend de l'épaisseur finale désirée des couches. La couche des tuyères est, quant à elle, séparée en deux sous-couches plus minces, qui seront jointes plus tard dans le procédé. Une fois laminées aux épaisseurs voulues, les trois couches de LTCC (la couche des chambres et les deux sous-couches des tuyères) sont taillées afin d'obtenir la longueur et la largeur du dispositif. Après cette étape, les couches sont usinées séparément.

4.1.2 Couche des chambres

La couche des chambres est travaillée en utilisant une mèche cylindrique. Les trous constituant les chambres sont faits à égale distance les uns des autres. Quatre trous, de plus grand diamètre, sont aussi faits près des coins afin de bien aligner les couches à l'assemblage final. Finalement, l'échantillon est recuit en se basant sur une courbe de température bien précise, établie par le fabricant, avec un pic de température se situant entre 850 °C et 900 °C. La figure 4.1 qui suit illustre les principales étapes pour la fabrication de la couche des chambres.

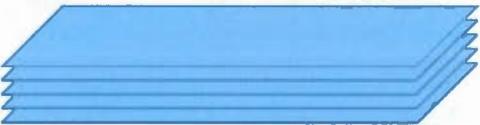
Étapes de fabrication	Schémas de fabrication
Prends le nombre de feuilles de LTCC selon l'épaisseur de couche désirée	
Empilage et lamination des feuilles de LTCC	
Coupe des bords et perçage des chambres	
Cuisson au four à température contrôlée	

Figure 4.1 : Étapes de fabrication de la couche des chambres

La figure 4.2 est une photo d'un échantillon complet fabriqué, mais sans que le recuit final ait été fait.

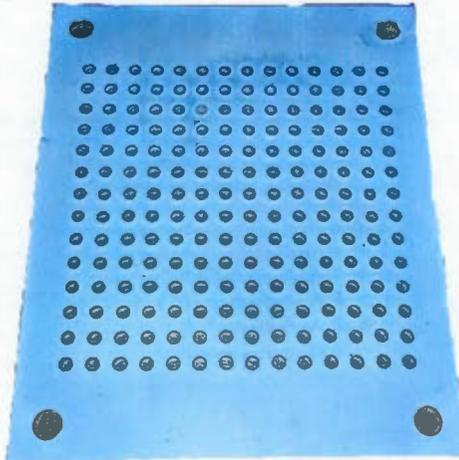


Figure 4.2 : Couche des chambres non recuite

4.1.3 Couche des tuyères

La couche des tuyères a un procédé de fabrication quelque peu différent. Elle est subdivisée en deux sous-couches, l'une pour le côté concave, à angle d'ouverture plus grand, et l'autre convexe, à angle plus petit. Elles sont cependant usinées de la même manière, mais avec des mèches coniques de dimensions différentes. Chacune des deux sous-couches est percée en utilisant ces mèches aux mêmes endroits afin de pouvoir les juxtaposer et d'obtenir toutes les ouvertures qui concordent parfaitement entre elles. Les mêmes quatre trous d'alignement que sur la couche des chambres sont aussi percés aux coins des deux morceaux. La figure 4.3 illustre les deux sous-couches des tuyères non recuites ainsi qu'une vue latérale de la couche assemblée.

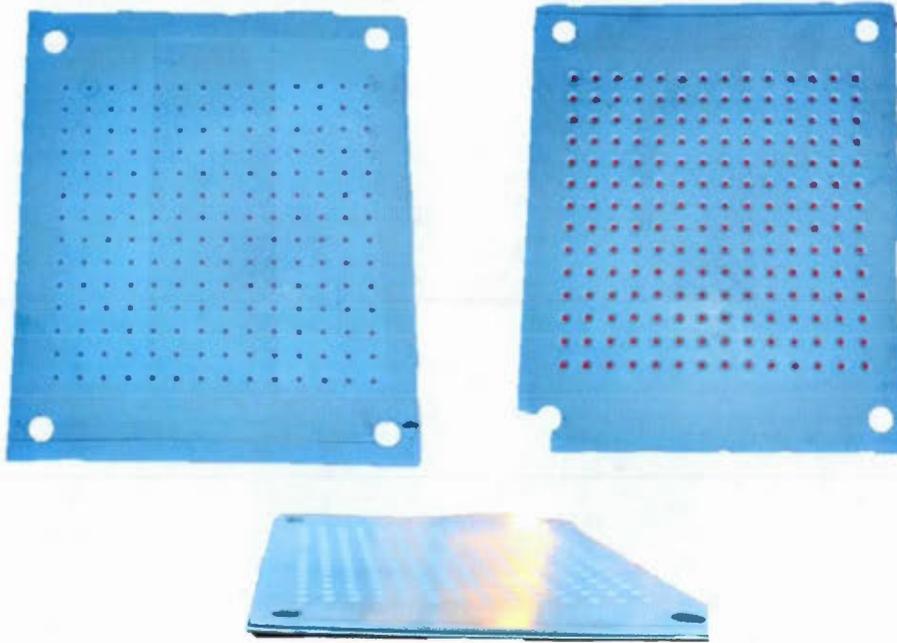


Figure 4.3 : Sous-couche de tuyères non recuite côté petit angle (gauche) et grand angle (droite) et vue latérale de la couche

Par la suite, un empileur est utilisé afin de jumeler les deux plaques ensemble en y appliquant une certaine pression uniforme et en s'assurant du bon alignement. La couche des tuyères formée, du Silex est inséré dans les ouvertures. Celui-ci sert à diminuer les effets de contractions au niveau des tuyères lors du recuit de la couche. Afin de bien remplir les ouvertures, un appareil permettant la mise sous vide est utilisé, pour que le Silex remplisse au complet les tuyères vidées d'air. Une pression plus forte est ensuite appliquée à l'aide d'une presse isostatique, entraînant alors une adhésion permanente des deux plaques préalablement jointes. Finalement, une cuisson est nécessaire en suivant la même courbe de température que celle de la couche des chambres. La figure 4.4 illustre, de manière schématique, les principales étapes de fabrication de la couche des tuyères. Quelques étapes de plus se sont ajoutées, dont l'empilage des deux sous-couches et le remplissage de silex avant la cuisson.

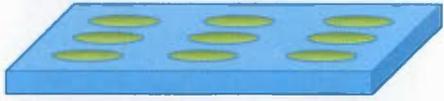
Étapes	Petite ouverture	Grande ouverture
Prends le nombre de feuilles de LTCC selon l'épaisseur des sous-couches désirées		
Empilage et lamination des feuilles de LTCC		
Coupe des bords et perçage des ouvertures des tuyères		
Empilage des sous-couches à faible pression		
Remplissage des ouvertures avec du silex et pression isostatique		
Cuisson au four à température contrôlée et retrait du silex		

Figure 4.4 : Étapes de fabrication de la couche des tuyères

4.1.4 Couche d'allumage

La couche d'allumage est la partie comprenant les plus petits dispositifs. Le tout est fait sur un substrat flexible de Kapton. Celui-ci étant un polymère captant l'humidité, il doit être mis sur une plaque chauffante à 100 °C pendant quelques minutes avant chaque étape ou entreposé à 60 °C dans un four pour le déshydrater. Une déshydratation à température plus élevée entraîne une contraction de la feuille, induisant des plis qui poseront problème lors de la fabrication des dispositifs chauffants.

Étape 1 Préparation et fixation du substrat de Kapton

Un morceau carré de Kapton d'un peu plus de 5 cm sur 5 cm est d'abord coupé. Il est fixé sur une lamelle de verre à l'aide de collant de type Kapton, comme illustré à la figure 4.5. Le Kapton a la propriété d'être résistant à des températures élevées. Ceci permet d'avoir une surface solide sur laquelle travailler. La surface du Kapton est par la suite nettoyée à l'aide de IPA et séchée au jet d'azote. Il est enfin mis dans un four pour le déshydrater.

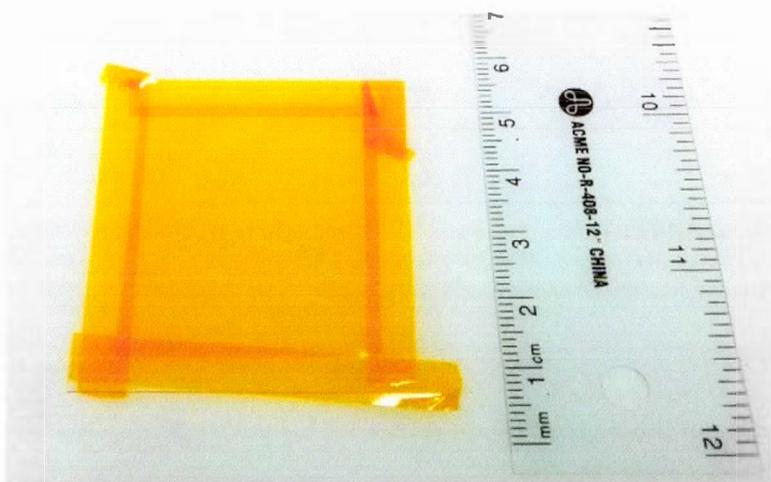


Figure 4.5 : Préparation du substrat de Kapton

Étape 2 Dépôt d'une couche d'aluminium

Une mince couche d'aluminium doit ensuite être déposée sur le Kapton, comme sur la figure 4.6. Cette couche sera ensuite mise en forme pour produire une microrésistance. Une épaisseur de 500 nm d'aluminium procure une utilisation de puissance faible, par une faible résistance, mais aussi une bonne résistance mécanique, ce qui est nécessaire, dû à l'utilisation d'un substrat flexible. Ce dépôt peut se faire par évaporation à effet Joule ou par pulvérisation.

Le dépôt par évaporation se fait à une pression de près de 3×10^{-6} mbar. Le taux de dépôt est gardé constant à 3 Å/s grâce à un ajustement automatique de la puissance. Cette

dernière se situe aux alentours des 600 W tout au long du processus qui dure un peu moins d'une heure.

La même épaisseur a été déposée par pulvérisation RF. Le substrat a été placé à 10 cm de la cible d'aluminium. La pression de base était autour de 5×10^{-7} mTorr, soit $6,7 \times 10^{-10}$ mbar. Le débit d'argon lors du procédé était fixé à 5 SCCM et une rotation de 10° . La puissance de la source RF a été fixée à 120 W pour une durée de 25 min.



Figure 4.6 : Dépôt d'aluminium sur Kapton

Étape 3 Photolithographie de l'échantillon

Le principe de photolithographie consiste à épandre une couche de quelques micromètres de résine photosensible sur l'échantillon. Il faut ensuite l'exposer pendant quelques secondes aux rayons ultraviolets à travers un masque qui contient le design du dispositif que l'on veut fabriquer. La résine est ensuite développée dans une solution spécifique, à l'image d'une photographie. Dans le cas des résines dites positives, la portion exposée aux UV sera dissoute dans la solution alors que celle protégée restera sur l'échantillon. Pour des résines photosensibles négatives, on aura l'effet inverse.

Dans le cadre des expérimentations faites, les résines positives S1811 et S1813 ont été utilisées. La différence entre les deux ne tient principalement que sur l'épaisseur finale de la résine après l'avoir épanchée et chauffée.

Une quantité de 1,5 mL de résine est tout d'abord déposée à l'aide d'une pipette. L'échantillon est placé sur une tournette mécanique et la recette du tableau 4.1 est suivie pour étaler la photorésine. Le contrôle de l'accélération est aussi primordial pour une bonne distribution de la résine.

Tableau 4.1 : Recette d'épandage de la résine photosensible

	Rotation (RPM)	Durée (s)	Accélération (RPM/s)
Étape 1	500	5	200
Étape 2	4000	25	4000

Un recuit sur une plaque chauffante est ensuite nécessaire pendant 60 s à 115 °C. L'échantillon de Kapton contenant une couche d'aluminium est ensuite exposé aux rayons UV avec le masque comprenant les motifs désirés. Un temps d'exposition de 10 s est requis avec une puissance de 6 mW/cm².

Le développement de la résine se fait en trempant l'échantillon pendant 45 s dans une solution de MF-319. Par la suite, un rinçage est nécessaire à l'eau DI pendant encore 45 s. Finalement, un recuit servant à durcir ce qui reste de résine est fait sur la plaque chauffante à 115 °C pour 60 s, permettant d'avoir l'échantillon de la figure 4.7.

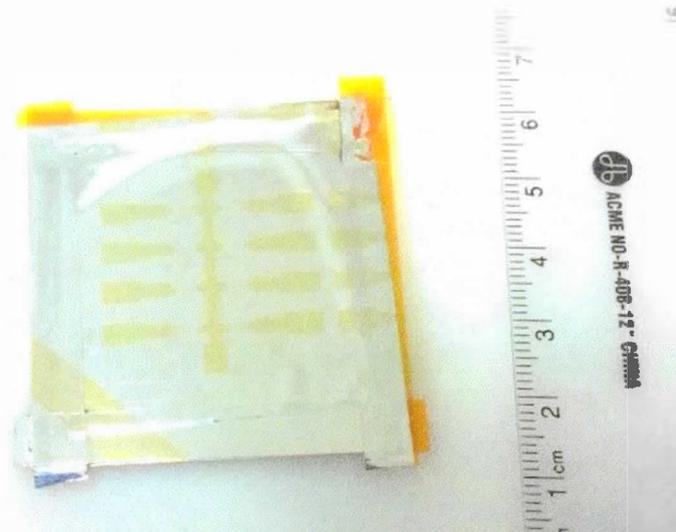
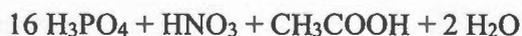


Figure 4.7 : Résine photosensible développée

Étape 4 Gravure de l'aluminium

L'aluminium est gravé à l'aide d'un acide communément appelé PAN. Il s'agit en fait d'un acronyme des trois différents acides le composant, soit l'acide phosphorique, l'acide acétique et l'acide nitrique. Son ratio stœchiométrique est le suivant :



Cette solution est portée à 50 °C tout en agitant, ce qui augmente grandement le taux de gravure. L'échantillon est alors plongé dans ce bain d'acide pendant 40 s. C'est le temps requis pour graver la couche de 500 nm d'aluminium. L'échantillon doit ensuite être mis sous un jet constant d'eau déionisée pendant 60 s afin de s'assurer qu'aucune trace d'acide n'est présente. Par la suite, tout doit être bien séché au jet d'azote gazeux, obtenant l'échantillon de la figure 4.8.

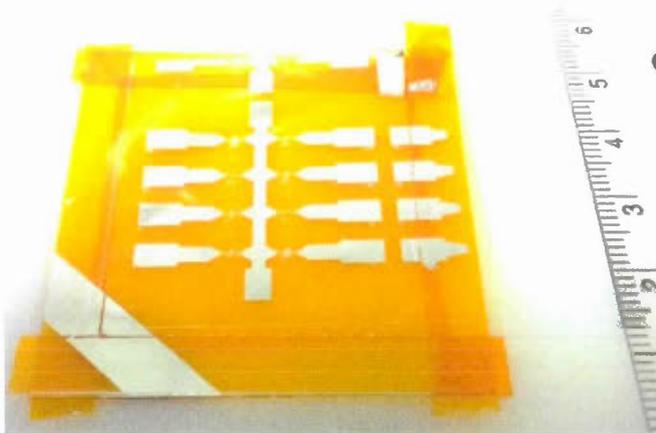


Figure 4.8 : Échantillon après gravure de l'aluminium

Étape 5 Finalisation de l'échantillon

Le retrait de la résine photosensible se fait en laissant tremper l'échantillon dans de l'acétone pendant une période de deux minutes. Ensuite, afin d'enlever toute trace d'acétone, il faut le tremper dans l'IPA pendant un autre deux minutes. Finalement, un séchage au jet d'azote doit être effectué.

Pour libérer le substrat flexible de Kapton de la lamelle de verre, il suffit de retirer avec précaution les collants à sa périmétrie, donnant l'échantillon terminé de la figure 4.9.

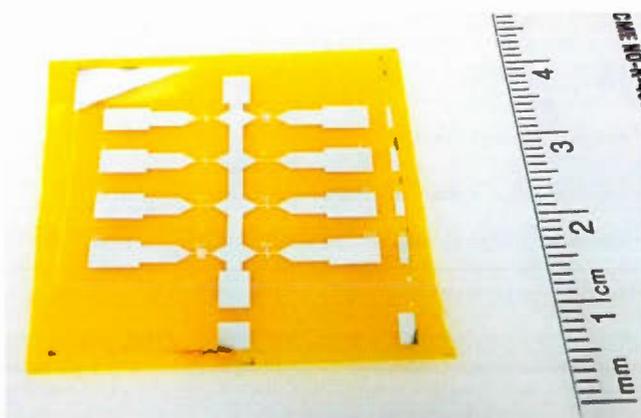


Figure 4.9 : Échantillon d'allumeur terminé

4.2 Assemblage du dispositif

L'assemblage des différentes couches débute en collant avec de l'époxy thermique la couche des chambres avec une fine couche de LTCC servant de fond. En utilisant de l'époxy, un petit espace entre les couches à joindre est créé. Il faut alors s'assurer de la bonne étanchéité de la jonction après cette étape ainsi qu'avec les étapes subséquentes incluant l'utilisation de colle époxy. Le carburant GAP/AP est ensuite soigneusement mis à l'intérieur de chaque chambre. Le vide doit être fait simultanément afin de s'assurer qu'il n'y ait aucune présence de bulle d'air. Parallèlement, la couche d'allumage et celle des tuyères sont aussi collées ensemble avec la même époxy en s'assurant d'un alignement parfait. Les nanothermites sont ensuite déposées dans les chambres, au-dessus du carburant. Finalement, la couche des chambres remplies est collée avec celles des allumeurs et des tuyères à l'aide d'époxy. La figure 4.10 illustre les parties du micropropulseur, incluant le combustible et l'amorce. Là encore, l'alignement est crucial afin d'assurer le bon fonctionnement du dispositif. La figure 4.11 montre des photos prises des couches du dispositif, une fois empilée et une seconde en vue éclatée.

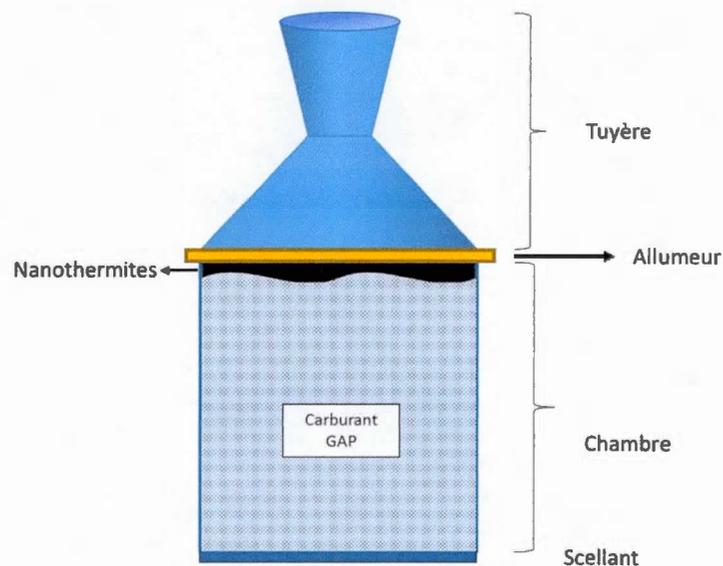


Figure 4.10 : Vue de coupe d'un micropropulseur chargé

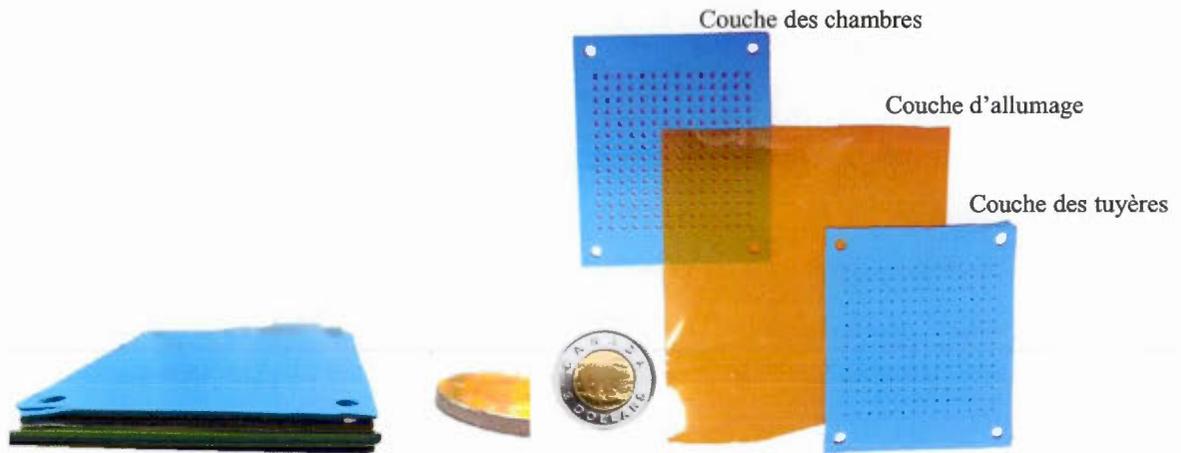


Figure 4.11 : Vue de profil non collé du dispositif (gauche) et vue éclatée des couches (droite)

Ce chapitre a permis de détailler les procédés de fabrication des différentes couches composant la matrice de micropropulseurs à combustible solide. L'assemblage des couches a aussi été abordé, permettant ainsi d'avoir un dispositif fonctionnel.

CHAPITRE V

CONCEPTION ET SIMULATIONS

Ce chapitre détaille d'abord les différents matériaux utilisés ou écartés pour chaque couche des micropropulseurs. L'explication de chacune des dimensions choisies est aussi donnée. Par la suite, les résultats de simulations thermiques de la couche d'allumage comprenant plusieurs types de résistance, de connexions et de matériaux utilisés comme substrat sont montrés. Finalement, une description du montage test ayant servi aux expérimentations d'allumage de l'amorce de nanothermites est faite.

5.1 Conception

5.1.1 Couche des chambres

Il a tout d'abord été pensé de fabriquer la couche des chambres en verre photosensible de type *FoturanTM*. Ce verre est cependant onéreux et la technique développée pour son utilisation ne permettait pas de garantir les formes et dimensions voulues.

L'utilisation d'un amalgame de verre et céramique de Corning, le MACOR, a aussi été envisagée. Ce matériau possède une bonne résistance thermique et peut être machiné avec des outils conventionnels. Il ne résiste cependant pas à des températures dépassant 1000 °C et est plus ou moins élastique avec un module de Young de 66,9 GPa (Holand et Beall, 2012).

Il a donc été convenu d'utiliser le LTCC comme matériau de base, autant pour la couche des chambres que pour la couche des tuyères. Ce matériau est malléable et usinable, avant son recuit final, est peu élastique, avec un module de Young de

120 GPa, et est très résistant thermiquement. Il est aussi très abordable, résiste aux températures élevées et vient en une variété de feuilles d'épaisseur différentes, permettant ainsi d'obtenir une épaisseur totale précise. Son principal défaut est que le matériau se contracte lors de la cuisson finale, soit après l'avoir machiné. Cette contraction provoque un rétrécissement du matériau qui, heureusement, est quantifiable et reproductible. Dans les faits, le rétrécissement est de 15 % pour l'épaisseur (axe Z) et de 12,7 % pour la longueur et la largeur (axes X et Y).

La figure 5.1 présente les dimensions des différentes couches constituant le micropropulseur. La couche de l'allumeur étant très mince (une centaine de micromètres), sa dimension a été négligée afin de ne pas trop encombrer le schéma. Les diamètres d'ouvertures des tuyères et de la chambre y est représenté. Les autres dimensions seront détaillées un peu plus loin.

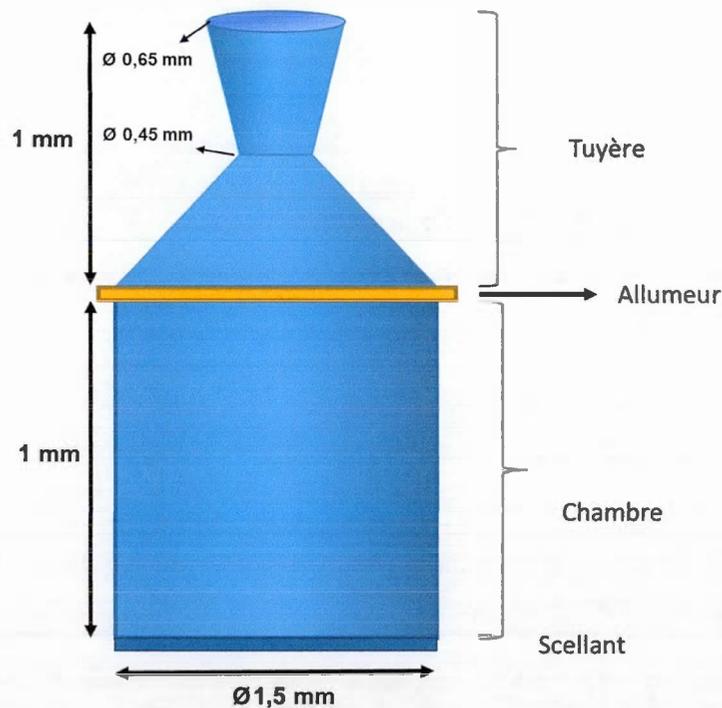


Figure 5.1 : Vue de coupe avec mesures d'un micropropulseur

La couche des chambres est constituée en tout de 5 feuilles de LTCC *Greentape™ 951* de Dupont. Il y en a 4 d'une épaisseur de 254 μm (PX) et une autre de 114,3 μm (PT) pour obtenir une épaisseur cumulative de 1130 μm . En tenant compte du facteur de rétrécissement par rapport à l'épaisseur, qui est de 15%, une épaisseur d'environ 1 mm devrait être atteinte après le recuit.

Des trous circulaires de 1,5 mm de diamètre sont percés, au nombre de 192. Ils font office de chambres. L'absence de coins de la forme circulaire permet une uniformisation de la combustion et de la poussée, ce qu'une chambre en forme carrée ne peut donner. Il faut là aussi tenir compte du rétrécissement du matériau qui est de 12,7 % dans les deux orientations. Il est donc nécessaire de percer des ouvertures plus grandes pour garantir les 1,5 mm désirés. La figure 5.2 illustre une vue de coupe de deux des chambres, incluant les différentes feuilles de LTCC utilisées.

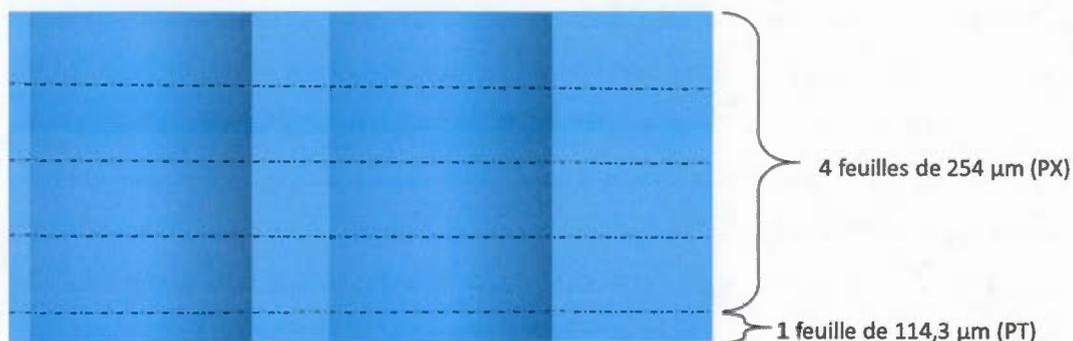


Figure 5.2 : Vue de coupe de la couche des chambres

Les dimensions des chambres sont fixées à partir des recherches de Rossi *et al.*, qui tiennent compte de la poussée désirée (de quelques millinewtons) et du combustible utilisé (GAP/AP). Une ouverture de 1 mm de diamètre est un minimum requis afin d'obtenir la poussée voulue (Rossi, Carole *et al.*, 2006). De plus, le combustible utilisé a de la difficulté à s'allumer avec un diamètre de 1,4 mm et ce, à pression atmosphérique normale (Rossi, Carole *et al.*, 2007). Afin de pallier ce problème, un trou d'un diamètre de 1,5 mm est fait pour chaque chambre. L'épaisseur de la couche

quant à elle tient principalement au fait de pouvoir entreposer assez de combustible pour produire une poussée d'une durée suffisante. Le tableau 5.1 qui suit montre les dimensions des chambres requises pour l'usinage afin d'obtenir, après le rétrécissement dû au recuit, des 1,5 mm de diamètre d'ouverture.

Tableau 5.1 : Dimensions désirées des chambres

	Chambre non cuite	Chambre recuite	Rétrécissement théorique
Diamètre d'ouverture (μm)	1690	1500	12,7%
Profondeur (μm)	1150	1000	15%

5.1.2 Couche des tuyères

Le matériau utilisé pour fabriquer les tuyères est lui aussi la LTCC. Il a été pensé d'utiliser ici aussi du *MACORTM*, du *FoturanTM* ou bien du silicium. Dans ce dernier cas, la gravure anisotrope faite avec de l'hydroxyde de potassium (KOH) permet d'obtenir, sur un disque de silicium avec un arrangement cristallographique de $\langle 100 \rangle$, un angle précis de $54,7^\circ$. La valeur de cet angle est cependant fixe, ce qui ne nous permet pas d'optimiser les angles afin d'avoir une poussée maximale. De plus, la faible résistance thermique du silicium et sa fragilité mécanique nous ont conduits à prioriser le LTCC.

La partie des tuyères se divise en deux sous-couches distinctes. Elles sont toutes deux de même épaisseur, comportant deux feuilles de LTCC de *GreentapeTM 951* de $254 \mu\text{m}$ d'épaisseur (PX) et une autre de $50,8 \mu\text{m}$ (C2). L'épaisseur totale est donc de $558 \mu\text{m}$ pour chacune des couches. Jointes ensemble, elles feront $1116 \mu\text{m}$ qui, après avoir pris en considération le rétrécissement de 15% de l'épaisseur du matériau, donnera environ 1 mm. Ce qui diffère les deux sous-couches de tuyères est leurs demi-angles d'ouverture désirés, l'un d'approximativement 45° pour la section convergente et

l'autre d'environ 12° pour la section divergente. L'utilisation des valeurs de demi-angle est priorisée plutôt que les angles complets afin d'éviter quelque ambiguïté. Le demi-angle, pour chaque côté, se trouve à être la moitié de l'angle d'ouverture. Les valeurs de ces angles ont été attribués selon des calculs de propulsion, afin de maximiser la poussée lors de l'allumage (Bayt *et al.*, 1997). Les demi-angles d'ouverture sont présentés à la figure 5.3 avec la distinction entre les deux sous-couches.

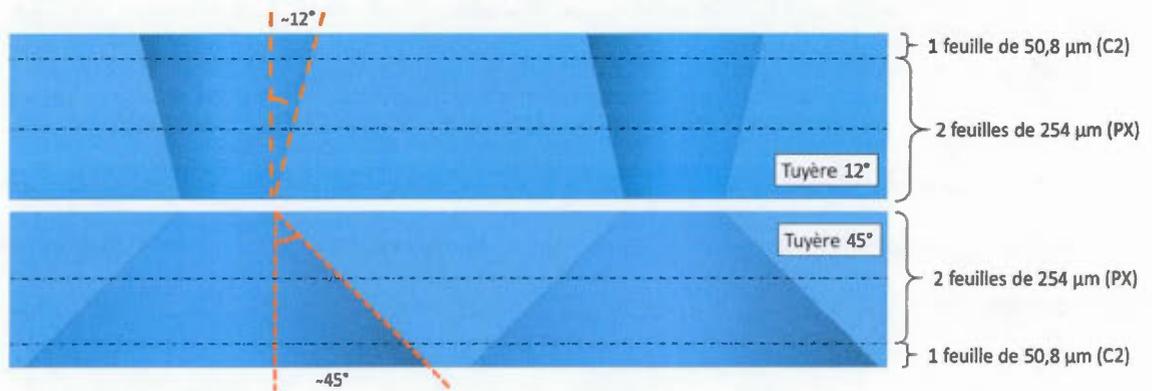


Figure 5.3 : Vue de coupe de la couche des tuyères

Les plus grandes ouvertures de la tuyère convergente (Tuyère 45°) doivent être parfaitement alignées avec la chambre. C'est pourquoi elles auront une dimension de 1,5 mm. Afin d'obtenir le demi-angle de 45° , l'ouverture sur l'autre face devra être d'environ $450\ \mu\text{m}$, qui est la dimension du col. De la même manière, le col de la Tuyère 12° sera de $450\ \mu\text{m}$. Pour obtenir l'angle divergent, l'ouverture de sa face devra être de $650\ \mu\text{m}$. Il faut compenser, lors de la fabrication, du rétrécissement théorique de 12,7 % en élargissant du même facteur les ouvertures. Le tableau 5.2 énonce les dimensions requises avant et après cuisson en tenant compte du rétrécissement théorique. Les dimensions des sous-couches des Tuyère 12° et Tuyère 45° y sont présentées ainsi que les valeurs des demi-angles.

Tableau 5.2 : Dimensions désirées des tuyères

	Tuyère 12° non cuite	Tuyère 45° non cuite	Tuyère 12° recuite	Tuyère 45° recuite	Rétrécissement théorique
Diamètre d'ouverture externe (μm)	730	1690	650	1500	12,7%
Diamètre d'ouverture interne (μm)	510	510	450	450	12,7%
Profondeur (μm)	558		500		15%
Demi-angle d'ouverture	12°	46°	12°	46°	

5.1.3 Couche d'allumage

La couche d'allumage est constituée à la base d'une feuille de polymère de Kapton. Ce dernier étant un très bon isolant thermique et électrique, les pertes sont alors diminuées de beaucoup. De plus, à la seconde où l'allumage s'effectue, cette feuille doit se briser afin de dépressuriser la chambre. Cette pression est induite par la combustion. L'utilisation du Kapton 100HN, d'une épaisseur de 1 mil (25,4 μm), a été priorisée au lieu de 30HN (7,5 μm) et du 50HN (12,7 μm). C'est principalement dû au fait que cette épaisseur est un petit peu moins flexible que les autres et donc plus facile à manipuler. Lors de l'allumage, elle requiert cependant une plus grande différence de pression afin de céder et de permettre une poussée.

Les branchements et les résistances, situées sur la feuille de Kapton, sont constitués d'aluminium d'une épaisseur d'environ 500 nm. Cette épaisseur permet d'obtenir une faible résistance, et par conséquent, une puissance plus élevée pour une même tension électrique. De plus, comme le substrat est flexible, une couche mince d'aluminium est plus susceptible de se briser. Une épaisseur de 500 nm permet donc d'amoindrir cet

effet destructeur tout en utilisant un système de dépôt de couches minces. Toutes les résistances conçues ont une longueur totale de 2 mm et une largeur maximale de 1,1 mm. D'autres dimensions, telle que la largeur des traces et la distance séparant les branches sont illustrées à la figure 5.4.

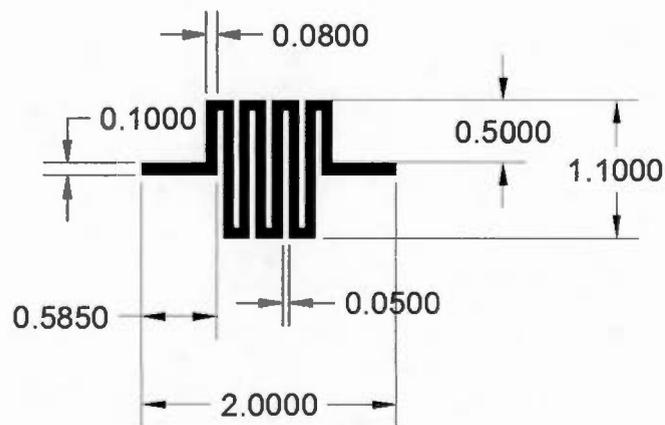


Figure 5.4 : Dimension d'une résistance à six branches (en mm)

Le motif des résistances et des branchements fait en aluminium a été changé à trois différentes reprises. Ces trois versions de dessin de masques ont à chaque fois évolué afin de résoudre différents problèmes. Il avait été envisagé d'utiliser, à priori, de l'aluminium pour les interconnexions et une mince couche de titane pour les résistances. De plus, la gravure du titane s'est faite à l'acide fluorhydrique (HF), un acide très fort et qu'il faut utiliser avec les plus grandes précautions. En ne gardant qu'uniquement la couche d'aluminium, le procédé fût simplifié, de par l'absence d'utilisation du HF ainsi que l'élimination d'une étape d'alignement de masques essentielle lors de la photolithographie.

La première version du masque, représentée à la figure 5.5, contenait l'ensemble des allumeurs de la matrice. La dimension très petite des contacts électriques rendait les tests extrêmement difficiles, voire impossibles, même en utilisant une station de test sous pointes.

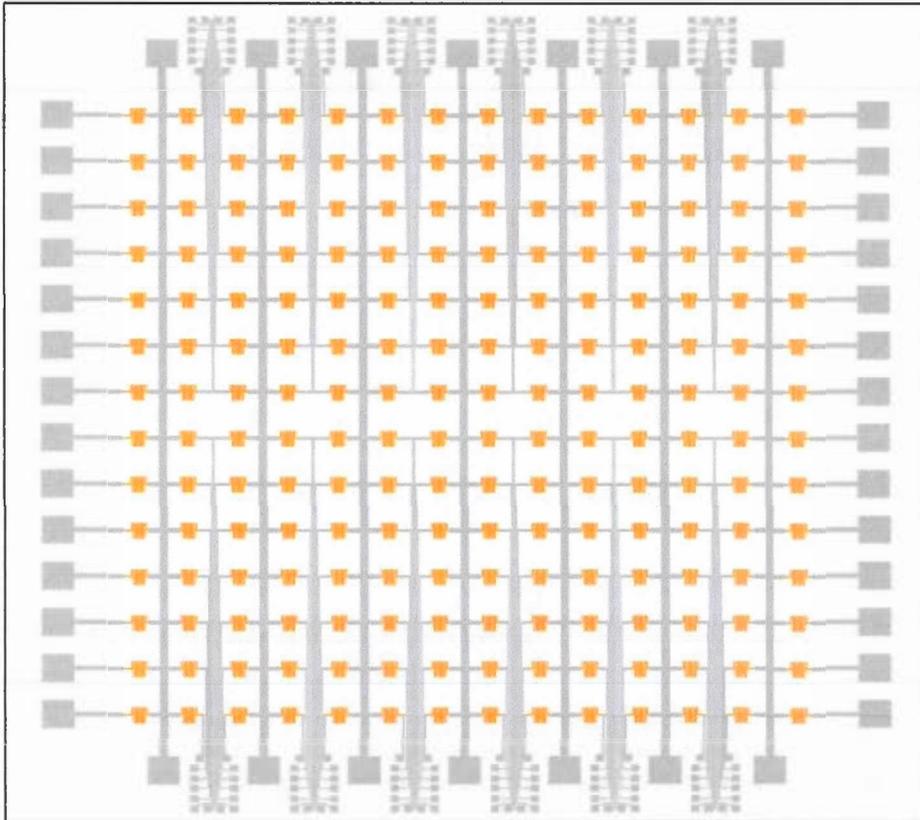


Figure 5.5 : Première version du masque des interconnexions et résistances d'aluminium

Dans la deuxième version des masques, à la figure 5.6, les contacts électriques ont été grossis. Deux schémas différents ont été faits, contenant beaucoup moins de résistance chacun. Le but était en fait de se concentrer sur l'efficacité des résistances plutôt que des interconnexions. Quatre différents modèles de résistances ont aussi été introduits, faisant varier leurs nombres de branches ainsi que leur largeur. Les branchements les

reliant étaient cependant trop étroits, cédant plus souvent avant même avoir effectué des tests. De plus, la valeur de résistance des interconnexions était sensiblement la même que celle des résistances chauffantes. Ceci avait comme effet de répartir la différence de potentiel, et donc la chaleur, sur tout le dispositif.

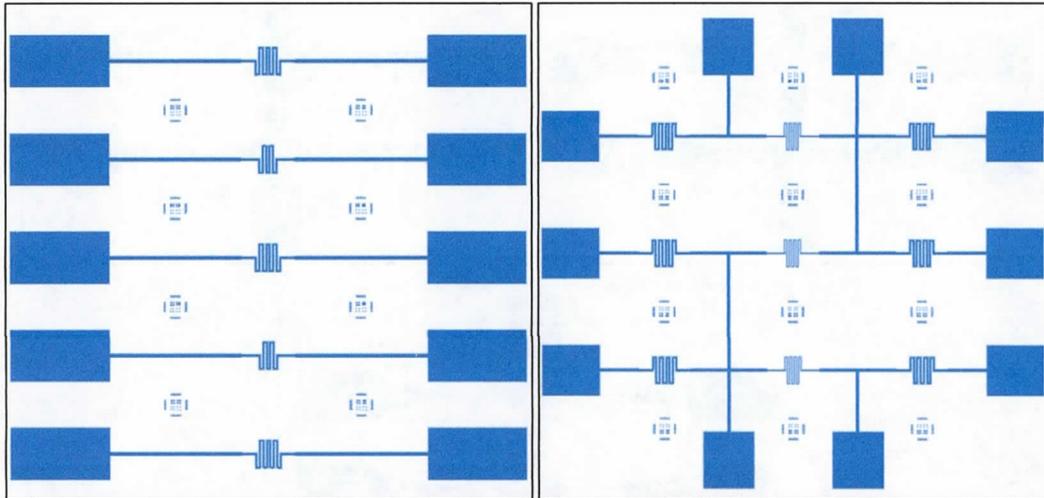


Figure 5.6 : Deuxième version des masques

Finalement, la troisième version du masque, la figure 5.7, comprend sept différents motifs de résistance, jouant avec le nombre de branches, la forme arrondie ou la forme générale. Trois différents schémas ont été faits, chacun ayant une forme de connexion distincte et comprenant cinq résistances. Ces connexions sont cependant toutes beaucoup plus larges que l'ancienne version, permettant ainsi d'éliminer leur bris avant ou pendant les tests.

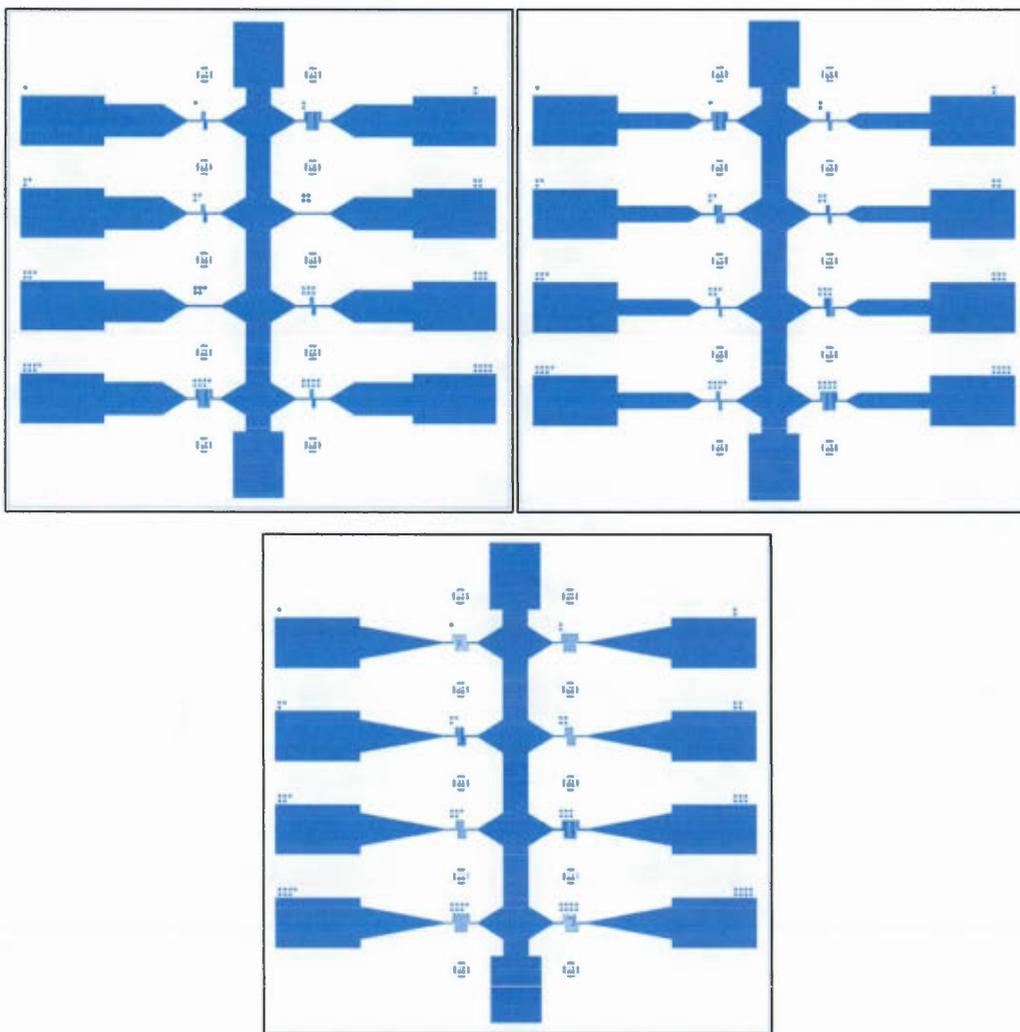


Figure 5.7 : Troisième version des masques

5.2 Simulation

Les simulations des différents dispositifs ont été faites à partir du logiciel COMSOL Multiphysics 4.2a. Le but recherché est l'optimisation de la section d'allumage afin d'obtenir une ignition de l'amorce à la plus faible puissance possible. À cet effet, trois principales variables ont été retenues : le type de substrat sur lequel repose la résistance, les branchements joignant les contacts électriques à la résistance et le motif de la résistance.

5.2.1 Substrat

Lors des simulations, l'utilisation de trois substrats différents a été analysée. Sur ceux-ci, repose une résistance identique faite d'aluminium, d'une épaisseur de 500 nm et d'une valeur équivalente de $2,4 \Omega$. La température maximale au centre de la résistance, dépendante de la tension appliquée aux bornes, est alors ressortie. La différence de température atteinte ne dépend que du matériau du substrat et de sa conduction thermique.

Comme le montre la figure 5.8, le substrat de silicium semble constituer le pire des trois choix. Avec un coefficient de conduction thermique de 120 W/m K , il dilue une très grande partie de la chaleur de la résistance, produite par effet Joule.

Le substrat de verre semble beaucoup plus efficace que celui de silicium. Sa constante de conduction thermique n'est que de $1,1 \text{ W/m K}$.

La feuille de Kapton (100HN), est le substrat qui conduit le moins la chaleur avec une constante de $0,12 \text{ W/m K}$. C'est d'ailleurs pour cette raison que la résistance atteint des températures beaucoup plus élevées, la chaleur y restant concentrée.

Température maximale au centre de la résistance selon le substrat

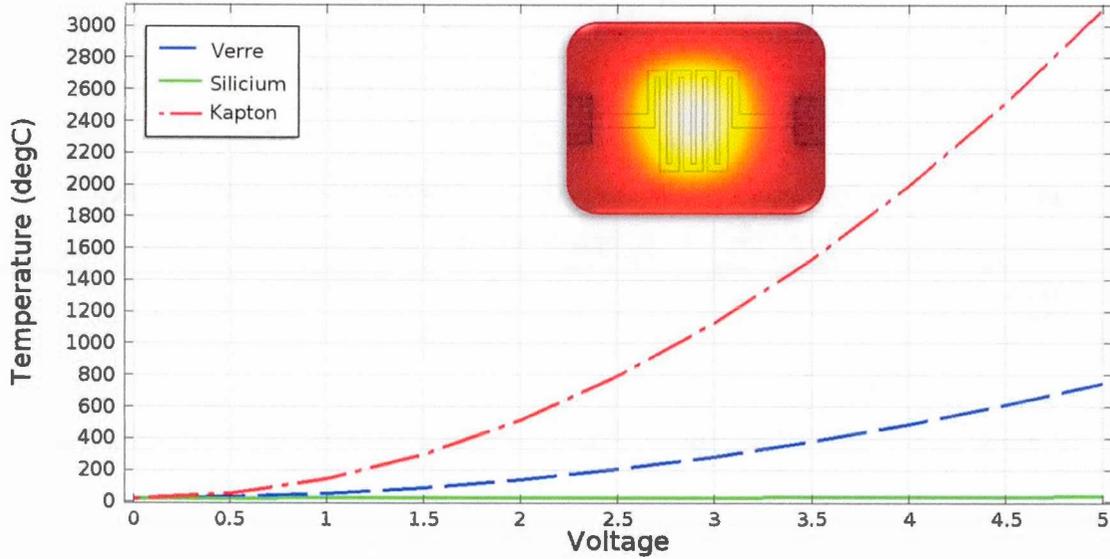


Figure 5.8 : Température maximale possible selon le substrat utilisé

Avec les résultats obtenus par simulation, il est clair qu'un substrat de Kapton est le choix qui s'impose parmi les trois options. La supériorité de son isolation thermique et électrique par rapport aux autres a été démontrée lors de ces simulations.

5.2.2 Branchements vers les résistances

Différents motifs de branchements ont aussi été analysés. Le but étant d'éviter le plus possible le transfert de chaleur dans les branchements aux abords de la résistance. Ceci aura comme effet de concentrer la chaleur au centre de la résistance, et donc de minimiser les effets de diaphonie entre les dispositifs. Ceci permet aussi d'obtenir une température d'allumage avec une puissance minimale, pour une même valeur de résistance. C'est un élément essentiel dû à la limitation de la puissance disponible sur un engin spatial.

Les simulations conduites avaient comme paramètres la même résistance d'aluminium de 500 nm d'épaisseur et une tension appliquée aux bornes fixées à 2,5 V. Le substrat est lui aussi toujours le même. Il faut cependant noter qu'en modifiant les motifs des branchements, la valeur de la résistance du dispositif en est modifiée. Ce qui, par le fait même, change la température maximale atteinte par le dispositif à une tension donnée.

En observant la figure 5.9a, il semble évident que l'effet de conduction de la chaleur est proéminent. À la figure 5.9c, une augmentation de la température se fait sentir jusqu'aux contacts électriques mais aussi aux périphéries des résistances voisines, se situant au-dessus et en-dessous de celle simulée.

Les figures 5.9b et 5.9d proposent une solution à ces effets pouvant être néfastes. En diminuant progressivement la largeur des lignes, la chaleur est beaucoup plus concentrée au centre de la résistance et par conséquent, la température y est beaucoup plus élevée. La perte de chaleur vers les branchements et en périphérie est donc réduite de cette manière. La figure 5.9d semble montrer les branchements limitant au maximum la conduction en dehors de la résistance. Par contre, cette dernière permet une température maximale plus faible que les autres pour une tension donnée. La meilleure configuration pour les interconnexions devrait donc être celle triangulaire (fig. 5.9b), car elle permet une température maximale élevée tout en minimisant la propagation de la chaleur aux connexions électriques.

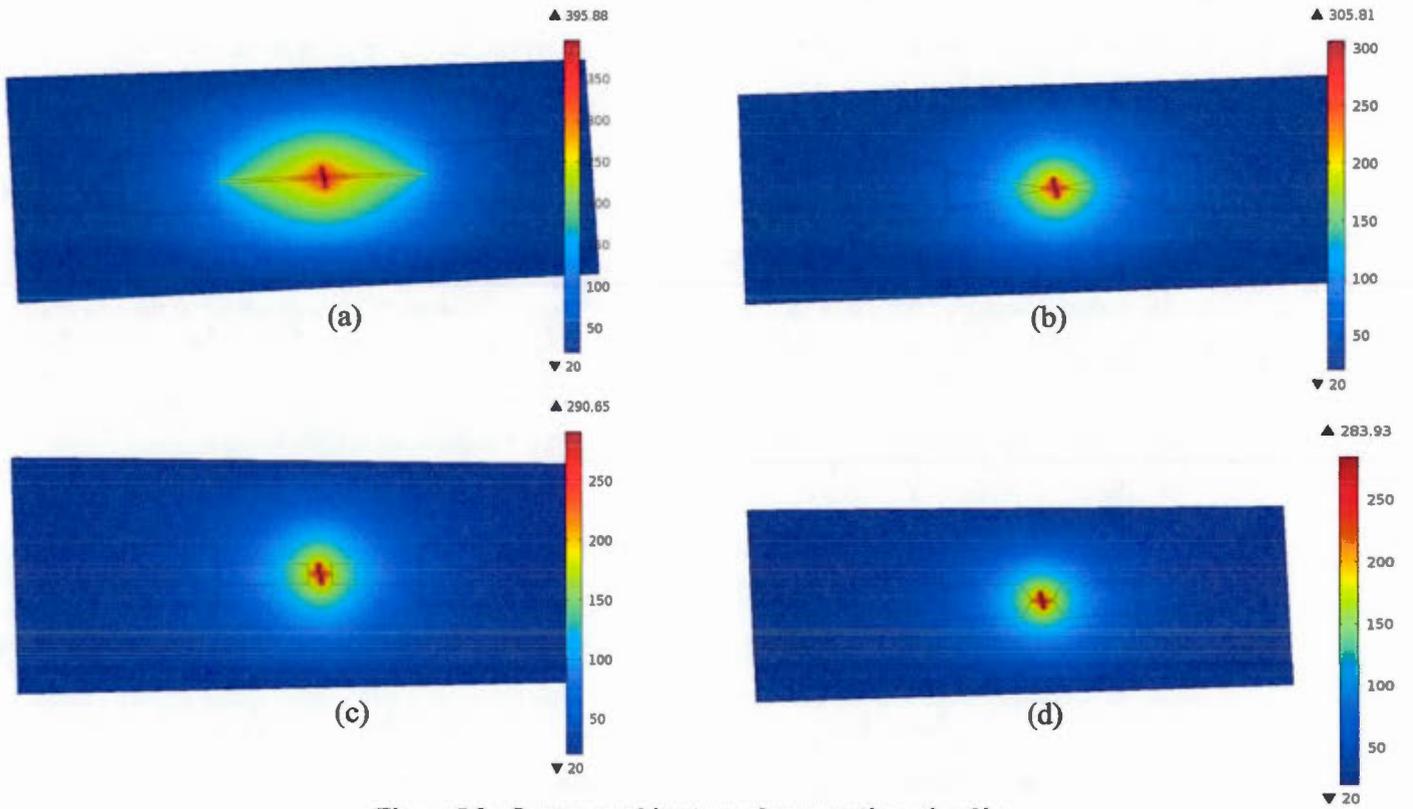


Figure 5.9 : Quatres architectures de connections simulées

(a) rectangulaires minces (b) triangulaires (c) rectangulaires épaisses (d) rectangulaires à pointe triangulaire

5.2.3 Forme des résistances

Le motif de la résistance qui pourrait être le plus efficace est celui qui, entre autres, possèdera la plus grande surface de contact. La résistance étant directement en contact avec l'amorce de nanothermite, une plus grande surface procurerait une certaine assurance de transfert de chaleur et donc d'allumage. Parallèlement, une répartition uniforme de la chaleur sur cette même résistance éviterait la formation de point chaud qui engendrerait une contraction du matériau menant à un bris du dispositif.

Finalement, une température maximale pour une même tension appliquée aux bornes est aussi fort souhaitable. Ceci pourrait garantir une puissance d'allumage minimale pour l'allumage du dispositif.

Les simulations des différents motifs de résistances ont été conduites avec une tension de 5 V sur des résistances d'aluminium de 500 nm d'épaisseur, sur substrat de verre. La distribution de chaleur et la température maximale atteinte ont été ressorties.

En se basant sur les images ressorties, il semble que seule la barre de la figure 5.10a présente une dispersion limitée de la chaleur. Tous les autres modèles de résistances s'équivalent quant à cette répartition de la température, limitant la hausse à la résistance. La surface de contact est cependant plus grande pour les motifs à six branches (fig. 5.10e et 5.10f) et celui du zigzag (fig. 5.10g), augmentant les chances d'un meilleur contact physique avec l'amorce de nanothermite.

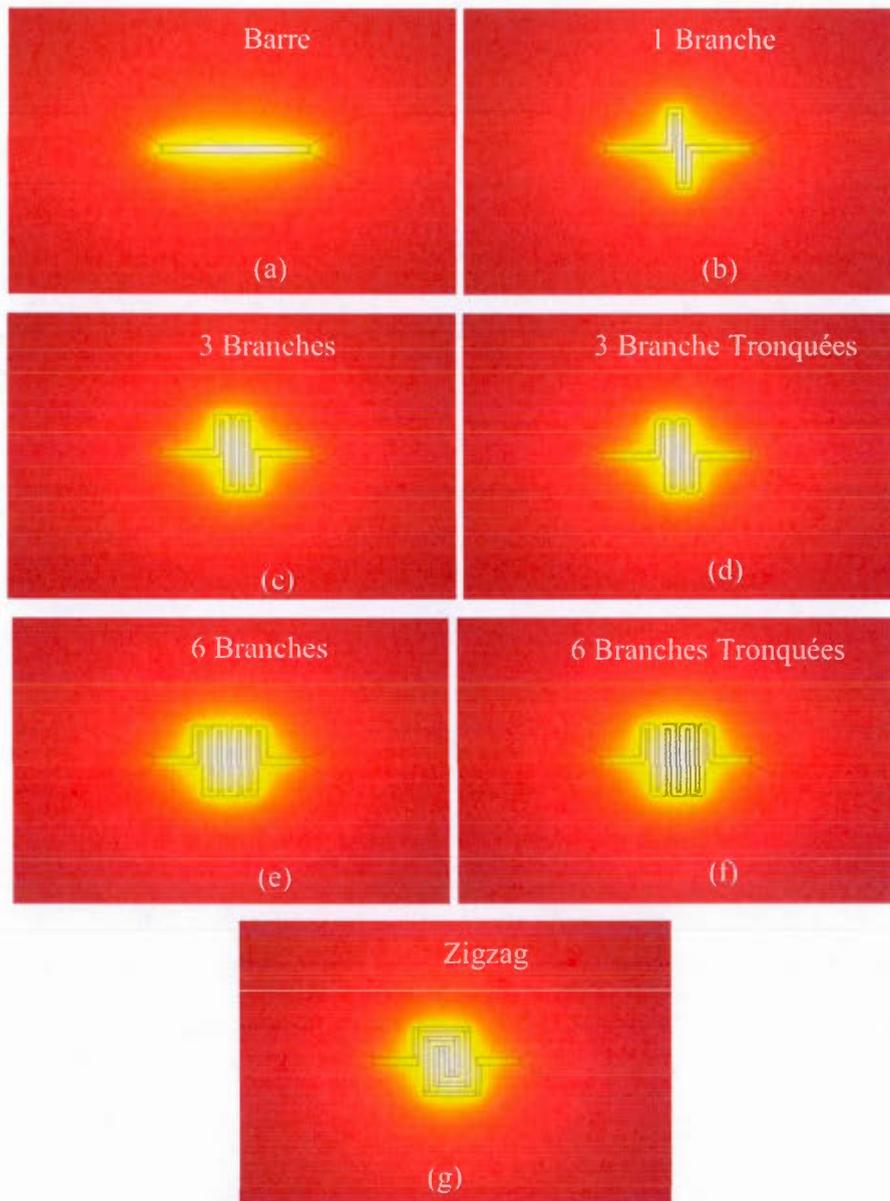


Figure 5.10 : Simulation des différents motifs de résistance

En observant cette fois les températures de surfaces atteintes, présentées dans le tableau 5.3, il est évident que l'effet des coins biseautés des résistances tronquées est minime. Le motif de barre permet d'obtenir une température très élevée, mais a une surface de contact très limitée. Plus le motif de la résistance est gros, plus la valeur de la résistance

augmente. Par conséquent, le courant y circulant, pour une même tension, est moindre. Cet effet est combiné à une convection de l'air qui est accrue due à une augmentation de la surface de contact. Cette convection a été incluse dans les simulations afin d'essayer de représenter le plus fidèlement possible les expérimentations. C'est donc ces deux effets qui expliquent la baisse notable de température entre les motifs exposés.

Tableau 5.3 : Simulation des températures de surface atteinte par résistance avec tension de 5 V

Motif de la résistance	Température de surface atteinte (°C)	Résistance équivalente à 25 °C (Ω)
Barre	1453.30	3.6
1 Branche	1035.30	6.1
3 Branches	729.77	8.7
3 Branches tronquées	729.33	8.7
6 Branches	464.23	12.6
6 Branches tronquées	464.86	12.7
Zigzag	480.34	13.4

5.3 Montage des tests

Les tests ont été faits directement sur les résistances de la couche d'allumage. Des gouttes des deux solutions de nanothermites ont été déposées sur chacune de ces résistances. Le but principal est de caractériser les résistances et leur efficacité à allumer les nanothermites. Par conséquent, la température d'allumage des nanothermites est une variable importante. Le courant circulant à travers la résistance et qui contribue à la faire chauffer est une valeur primordiale, tout comme la tension appliquée à ses bornes.

Le montage est alimenté par une alimentation directe pouvant fournir une tension maximale de 50 V. Une plage variant entre 1 V et 6 V est cependant nécessaire. Il comprend un multimètre Keithley 2700 échantillonnant la valeur du courant circulant

dans la résistance à chaque 11 ms. Une certaine difficulté survient en ce qui concerne la mesure de la température atteinte par les résistances. La résistance étant très petite, la température maximale est extrêmement localisée et élevée. L'utilisation d'un thermomètre laser ou d'un ensemble de thermocouples a alors été exclue. Des caméras thermiques ont plutôt été utilisées. Bien qu'il soit hasardeux de mesurer avec celles-ci une température précise dans la gamme de température recherchée, la dispersion thermique sur l'échantillon peut cependant être ressortie. La figure 5.11 montre le schéma électrique du système d'une manière basique.

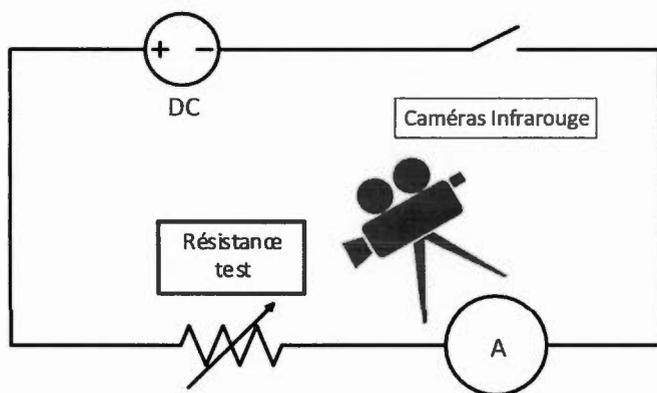


Figure 5.11 : Schéma du montage test

Les échantillons à tester sont déposés sur des morceaux de liège afin de limiter au maximum les pertes de chaleur vers le support. Les échantillons n'ayant pas explosé sont neutralisés avec une solution d'eau, de NaOH et d'éthanol. La figure 5.12 illustre les échantillons avec nanothermites ainsi qu'avec des nanothermites ayant explosé.

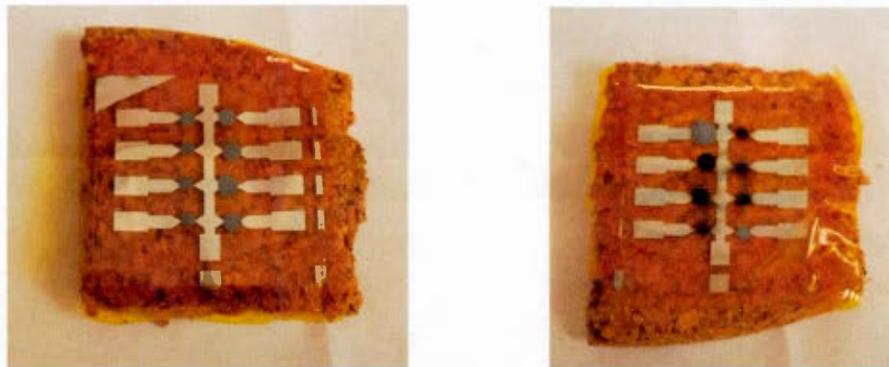


Figure 5.12 : Échantillon de Kapton avant (gauche) et après (droite) allumage des nanothermites (sur liège pour une meilleure isolation thermique)

La figure 5.13 montre quant à elle l'explosion d'une goutte de nanothermite sur un substrat de verre, après lui avoir appliqué une tension électrique.



Figure 5.13 : Explosion d'une goutte de nanothermite pendant l'allumage

5.3.1 Caméras thermiques

Deux caméras thermiques non refroidies ont été utilisées simultanément lors des essais. Chacune d'elle est optimisée pour détecter un certain spectre de longueur d'onde. Grâce à la Loi du déplacement de Wien, la formule 5.1 ci-dessous, il est possible de déduire par cette longueur d'onde, émise par un corps noir, la température de ce dernier.

$$\lambda_{max} = \frac{hc}{4,9651 kT} \quad (5.1)$$

Avec λ_{max} la longueur d'onde, h la constante de Planck, c la vitesse de la lumière, k la constante de Boltzmann et T la température du corps noir en Kelvin.

La première caméra était la SU640 de Sensor Unlimited. Elle est de type SWIR avec une bande spectrale de 1,4 à 3 μm pour des températures élevées. La seconde, la Atom 1024 de Sofradir EC est une LWIR d'une plage de 8 à 12 μm pour des températures plus au niveau de ceux du corps humain.

La Loi de déplacement de Wien (formule 5.1) permet de déduire la température émise par un corps noir. En pratique, il n'est cependant pas possible de déduire la température d'un objet en appliquant simplement cette formule. C'est pourquoi les échantillons testés ont été filmés avec des blocs références dont nous connaissions la température. Il y avait d'abord un bloc à température de la pièce (23 °C), ensuite un bloc métallique tenu constamment à une température précise de 50 °C, et finalement un autre bloc maintenu à 230 °C. Une fois les séries d'images prises simultanément à l'aide des deux caméras, et à une fréquence de 30 images secondes, et illustré à la figure 5.14, un post-traitement de celles-ci est fait avec Matlab.

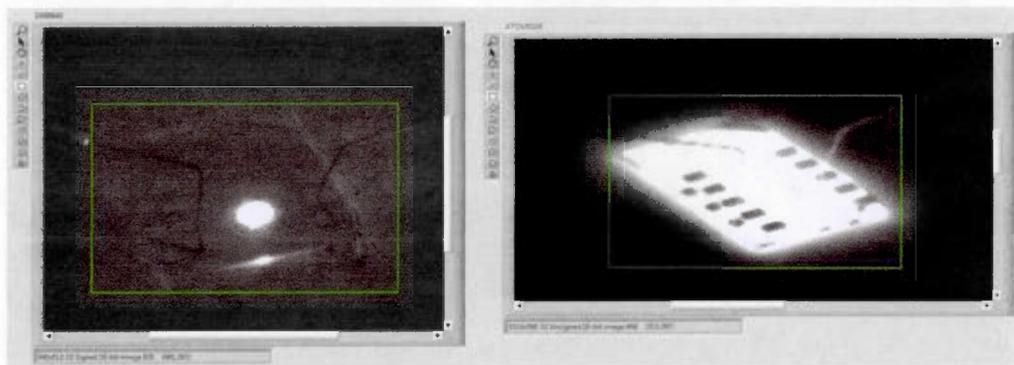


Figure 5.14 : Capture d'un test d'échantillon avec caméras thermiques SWIR (gauche) et LWIR (droite)

En se basant sur les blocs à température contrôlée comme repère, des valeurs de température peuvent être apposées sur des valeurs d'intensité de gris. Finalement, un filtre et une légende sont ajoutés aux images.

5.3.2 Nanothermites

Deux types de recettes de nanothermites ont été utilisés pour les tests. Elles ont été fabriquées par le département de matériaux énergétiques du centre de Recherche et Développement de la Défense Canada de Valcartier (RDDC Valcartier) afin d'avoir un allumage à une très basse puissance, tout en ayant une très bonne stabilité. Les deux recettes sont constituées de nanoparticules d'aluminium et d'oxyde de molybdène. Par contre, la composition du solvant diffère.

Dans la première, appelé Alexmo-S, le solvant est de l'isopropanol. Cette recette permet d'obtenir un mélange de nanothermites liquide. De plus, il sèche rapidement, l'isopropanol s'évaporant aisément à l'air libre.

La seconde recette, Alexmo-NC, incorpore un additif qui abaisse théoriquement la température d'allumage des nanothermites vers 200 °C. Cet additif est la nitrocellulose. Il est incorporé au solvant à une concentration de 3%. Ce solvant est remplacé par de

l'acétone. Au final, le mélange est beaucoup plus visqueux et nécessite un certain temps de séchage, de préférence au four à faible température.

Il a été vu dans ce chapitre les matériaux étudiés pour les différentes couches de la matrice de micropropulseurs. Les différentes dimensions choisies ont aussi été expliquées. Il a été énoncé les résultats des simulations thermiques de la couche d'allumage et en est ressorti des types de résistances, de connexions et un choix de matériaux optimal pour l'utilisation prévue. Une description du montage de tests a aussi été faite afin d'éclaircir la méthodologie utilisée menant aux résultats présentés au chapitre qui suit.

CHAPITRE VI

RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats obtenus sont subdivisés en différentes parties. Les deux premières montrent les résultats de fabrication des couches de LTCC des chambres et des tuyères. Ces mesures ont été prises principalement grâce à un microscope confocal laser (OLS4000 de Olympus). La troisième partie montre, quant à elle, les résultats des différents tests et mesures faites sur la couche d'allumage. D'abord, les différentes mesures prises lors des essais faits avec des nanothermites sont montrées. Ensuite, des mesures avec des images prises à l'aide de caméras infrarouges sont présentées. Ces dernières mesures seront comparées aux résultats de simulations préalablement faites afin de vérifier les concordances entre les deux.

Dû à certaines limitations temporelles, l'assemblage des différentes couches n'a pas pu être fait. Cette partie du projet devra donc être reportée à des travaux futurs.

6.1 Couche des chambres

Les premiers essais de perçage de la couche de LTCC afin de former les chambres ont présenté un problème sporadique, la présence d'une aspérité sur le pourtour de plusieurs chambres et illustré à l'image gauche de la figure 6.1. Après de nombreux essais, ce problème fût réglé en sablant doucement la surface après avoir percé les ouvertures. La répétabilité des chambres a alors pu être assurée, comme il est montré à l'image de droite de la figure 6.1.

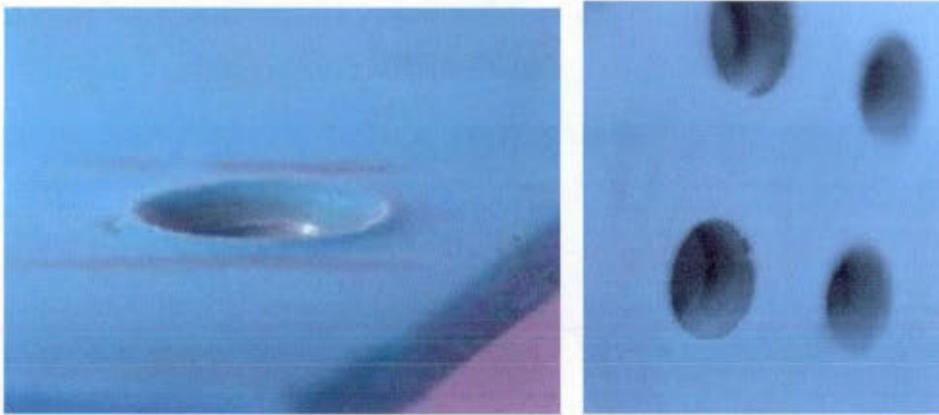


Figure 6.1 : Rebord d'une des chambres non recuites (gauche) et vue de biais (droite)

Les trous percés à l'aide d'une mèche de 1,7 mm de diamètre tiennent compte du rétrécissement théorique de 15% dû au recuit nécessaire. Après celui-ci, un diamètre d'environ 1,5 mm devrait être obtenu.

Lors des mesures prises à l'aide d'un microscope confocal, une mince courbure était présente sur l'échantillon. Malgré les pressions et les petites flexions faites, cette courbure persistait. La hauteur mesurée avant le recuit n'est donc pas nécessairement représentative, principalement attribuable à la prise de mesure avec un appareil optique. Les valeurs mesurées varient autour de 1730 μm alors qu'en réalité, nous aurions dû obtenir une épaisseur de 1130 μm , étant la somme des épaisseurs de couches laminées. La valeur mesurée en utilisant un instrument mécanique, tel un micromètre, aurait été dans ses alentours. La figure 6.2 montre la courbe des mesures prises pour une chambre avant recuit de l'échantillon.

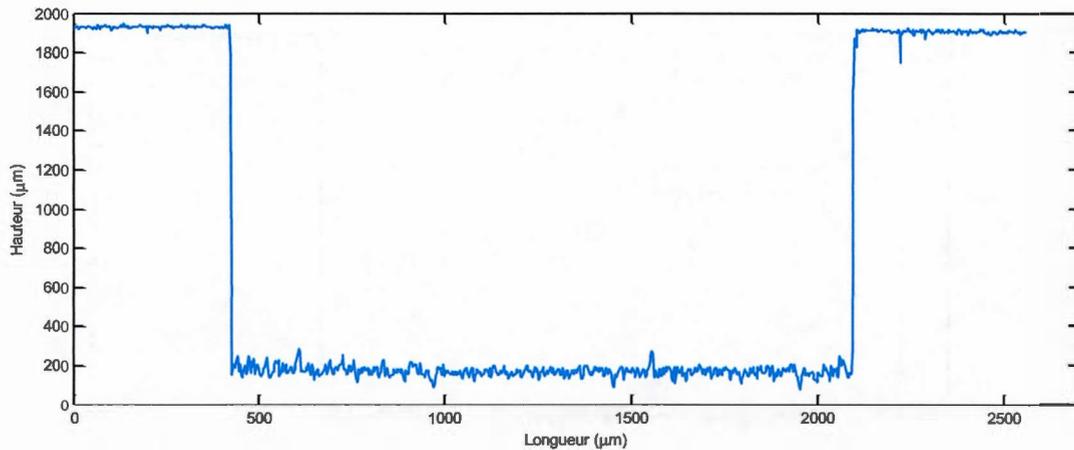


Figure 6.2 : Profil d'une chambre non recuite

Après le recuit de la couche des chambres, les mesures illustrées à la figure 6.3 témoignent effectivement d'un rétrécissement de la couche sur les trois axes. Celui-ci est du même ordre que ceux fournis par Dupont, à l'exception de l'épaisseur, probablement dû à la courbure présente dans l'échantillon non cuit. Cette courbure a cependant disparu une fois la cuisson effectuée. Les diamètres supérieur et inférieur mesurés sont respectivement de 1450 μm et de 1520 μm . Cette petite déviation montre que les murs des chambres ne sont pas totalement droits, mais restent tout de même acceptables. La hauteur des chambres varie quant à elle de 1010 μm à 1065 μm .

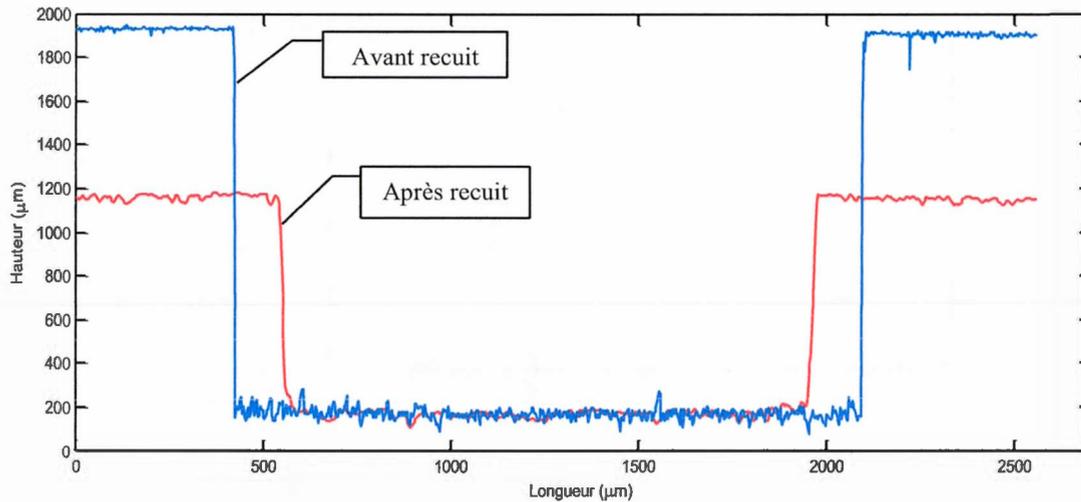


Figure 6.3 : Profil d'une chambre avant recuit (bleu) et après recuit (rouge)

Les diamètres d'ouvertures des chambres respectent presque parfaitement les valeurs désirées. La mesure d'épaisseur de la couche avant recuit n'est cependant pas représentative de l'ensemble des couches laminées et la courbure naturelle du matériau semble être l'élément faussant cette mesure. Cette courbure peut être due au processus de laminage, d'usinage, des conditions d'entreposage ou même de la manutention. Cependant, ce problème s'est résorbé lors de la cuisson finale, la couche reprenant la forme plane désirée. Le tableau 6.1 présente les différentes mesures prises au microscope confocal ainsi que la différence en pourcentage avec les valeurs théoriques visées.

Tableau 6.1 : Dimensions désirées et réelles des chambres

	Chambre non cuite		Chambre recuite		Rétrécissement réel
	Réelle	Différence avec dimensions désirées	Réelle	Différence avec dimensions désirées	
Diamètre d'ouverture (µm)	1700	0,3%	1490	0,7%	11,3%
Profondeur (µm)	1730	50%	1030	3%	40,6%

La figure 6.4 présente une photo d'une partie de la matrice des chambres une fois recuite. La couleur plus foncée témoigne d'un des effets de la cuisson.

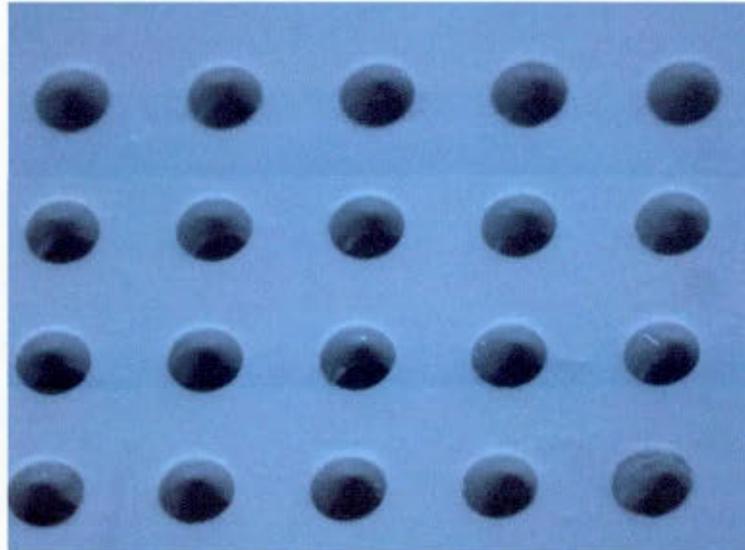


Figure 6.4 : Matrice de chambres recuite

6.2 Couche des tuyères

Le perçage des trous des tuyères s'est fait de la même manière que pour les chambres. Des mèches spéciales ont cependant été utilisées afin d'obtenir les demi-angles désirés pour chacune des deux sous-couches. Une difficulté supplémentaire cependant est la profondeur d'insertion de la mèche. Si celle-ci est introduite trop profondément, l'angle d'ouverture ne sera pas adéquat.

Lors des mesures prises, une courbure était encore présente dans les deux sous-couches des tuyères non recuites. Ceci peut, une fois de plus, fausser la profondeur réelle des échantillons non recuits, les mesures ayant, tout comme avec la couche des chambres été prises à l'aide d'un microscope optique.

6.2.1 Partie supérieure (Tuyère 12°)

Cette partie de la tuyère doit avoir après le recuit un demi-angle d'ouverture de 12°. Le recuit entraînant là aussi un rétrécissement, il a fallu prévoir des ouvertures plus grandes, en ayant tout de même ce demi-angle de 12°. La figure 6.5 montre une vue de biais de deux tuyères du côté du petit angle d'ouverture.

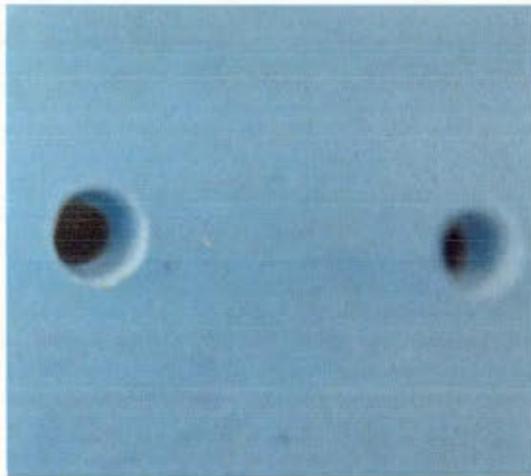


Figure 6.5 : Vue de biais de la sous-couche de la Tuyères 12° non recuits

En observant la figure 6.6, la courbure présente dans l'échantillon laisse à penser que l'angle donné avec la mèche ne débute qu'à la moitié de son épaisseur. C'est cependant une illusion, car l'échantillon est courbé. Il ne fait qu'un peu moins de 600 μm d'épaisseur lorsque mesuré à l'aide d'un micromètre manuel.

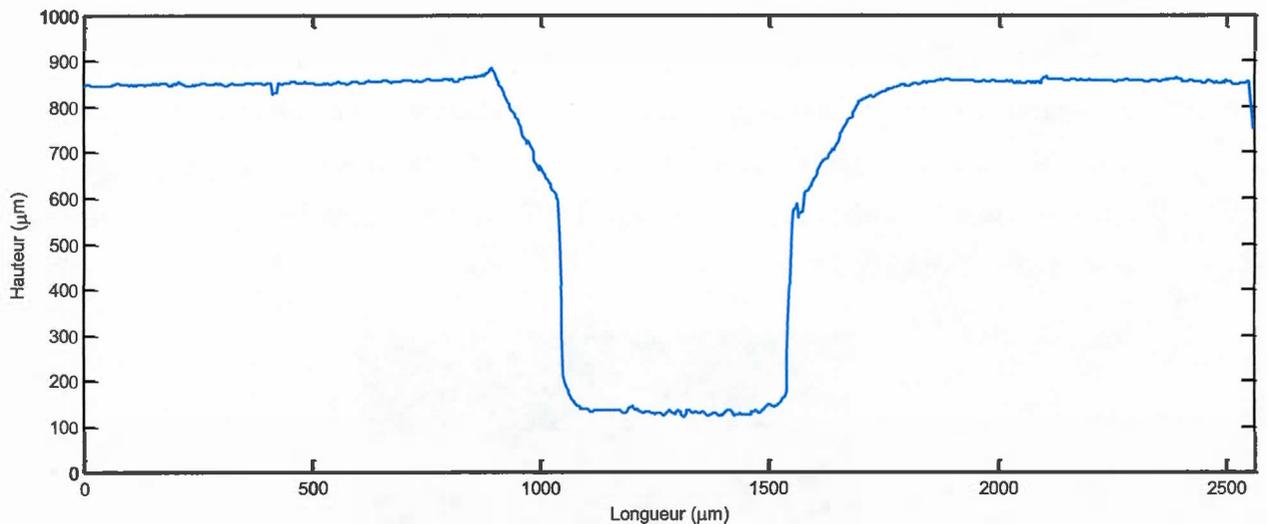


Figure 6.6 : Profil d'une tuyère de demi-angle de 12° non recuite

Le tableau 6.2 présente les résultats mesurés des diamètres d'ouverture externe et interne. Les dimensions désirées ainsi que la différence y sont aussi incluses. Il faut remarquer que le diamètre d'ouverture le plus grand (externe) est beaucoup plus élevé que voulu. Combiné à la dimension mesurée qui est presque identique à celle désirée, nous obtenons tout de même un demi-angle d'ouverture très proche de celui désiré.

Tableau 6.2 : Comparatifs des valeurs pour l'échantillon de la Tuyères 12° non recuits

	Tuyère 12° non cuite		
	Réelle	Désirée	Différence
Diamètre d'ouverture externe (µm)	840	730	15%
Diamètre d'ouverture interne (µm)	516	510	0%
Profondeur (µm)	725	558	30%
Demi-angle d'ouverture (°)	13°	12°	8%

6.2.2 Partie inférieure (Tuyère 45°)

Cette partie des tuyères permet la compression de gaz de combustion. Son demi-angle d'ouverture de 45° est donc important. Les mêmes effets du recuit sont présents, il est donc nécessaire d'avoir au départ le bon angle d'ouverture et tenir compte du rétrécissement du matériau lors du perçage. La figure 6.7 montre des tuyères du côté des grandes ouvertures.

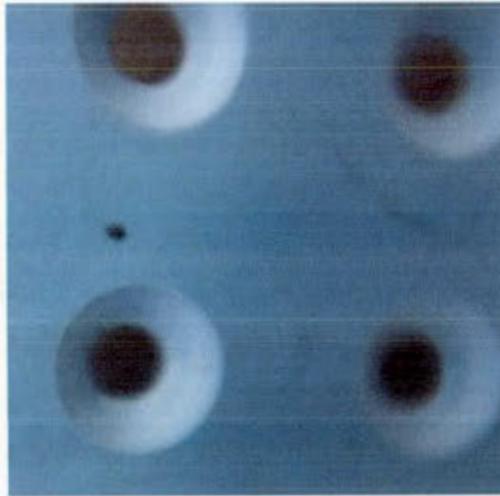


Figure 6.7 : Vue de biais de la couche de la Tuyères 45° non recuites

Tout comme la précédente couche, l'échantillon non recuit avait une courbure qui n'a pu être corrigée lors des mesures de dimensions. L'effet de profondeur est quelque peu biaisé dans la représentation graphique de la figure 6.8, qui devrait s'arrêter plutôt près de la valeur des 400 μm de hauteur.

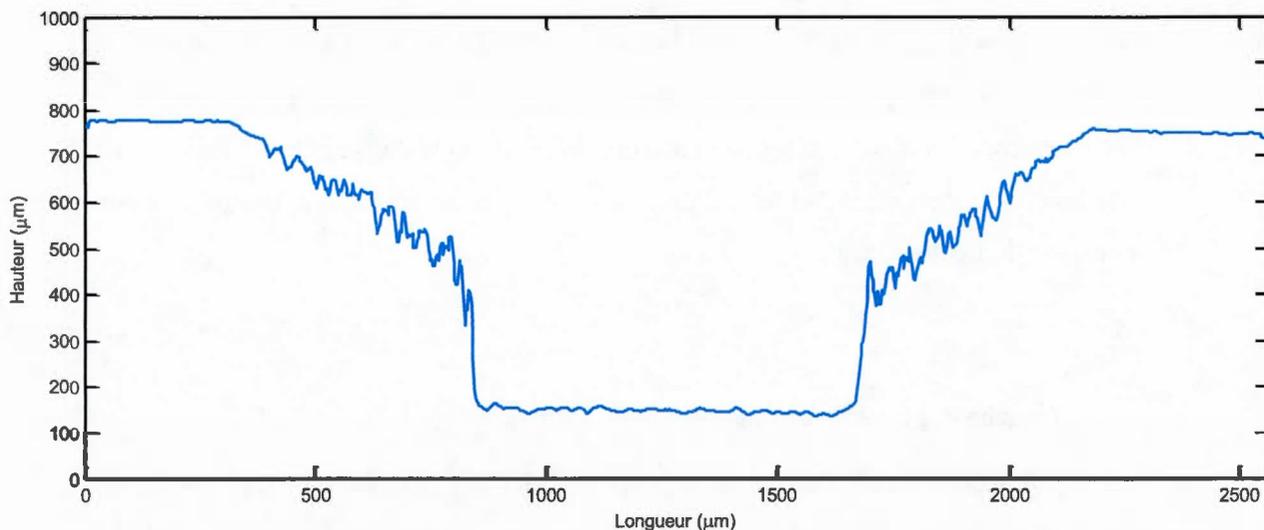


Figure 6.8 : Profil d'une tuyère de demi-angle de 45° non recuite

Il faut noter dans le tableau 6.3, qui présente les mesures prises après usinage, mais avant recuit, les diamètres d'ouverture, tant externe qu'interne, sont supérieurs à ce qui était voulu. C'est principalement le cas pour l'ouverture interne qui a un diamètre de près de 300 µm de plus. Ceci est dû à la mèche de forme conique qui a pénétré trop profondément dans l'échantillon.

Tableau 6.3 : Comparatifs des valeurs pour l'échantillon de la Tuyères 45° non recuite

	Tuyère 45° non cuite		
	Réelle	Désirée	Différence
Diamètre d'ouverture externe (µm)	1880	1690	11%
Diamètre d'ouverture interne (µm)	790	510	55%
Profondeur (µm)	630	558	13%
Demi-angle d'ouverture (°)	41°	46°	9%

Il est important de noter, comme il a été mentionné précédemment, que la mesure de demi-angle mesurée est probablement biaisée, étant dérivée elle-même de la mesure de profondeur. En extrapolant une profondeur égale à celle désirée, pour ainsi mettre de côté la courbure de l'échantillon, une mesure de demi-angle de près de 44° est atteinte. Il ne faut donc pas prendre en considération les valeurs de profondeur mesurées avant la cuisson de l'échantillon.

6.2.3 Couche des tuyères assemblée

Une fois les deux sous-couches de tuyères machinées et pressées l'une à l'autre, le recuit de la couche a été effectué. Les ouvertures des deux côtés du dispositif ont été mesurées après le recuit. La profondeur mesurée est celle de la couche finale, incluant les sous-couches Tuyère 12° et Tuyère 45° . La courbure qui était présente dans tous les échantillons avant le recuit est maintenant disparue. Il s'agit probablement du fait d'avoir mis un poids sur la surface lors du processus de cuisson qui a permis à la couche de LTCC de garder sa forme droite.

6.2.3.1 Côté du demi-angle de 12°

La figure 6.9 compare les profils d'une même tuyère avant et après la cuisson. Il est important de remarquer que l'angle d'ouverture s'est corrigé lors du rétrécissement dû à la cuisson. Le taux de rétrécissement n'est pas uniforme sur toute la couche, ce qui a contribué à cette correction.

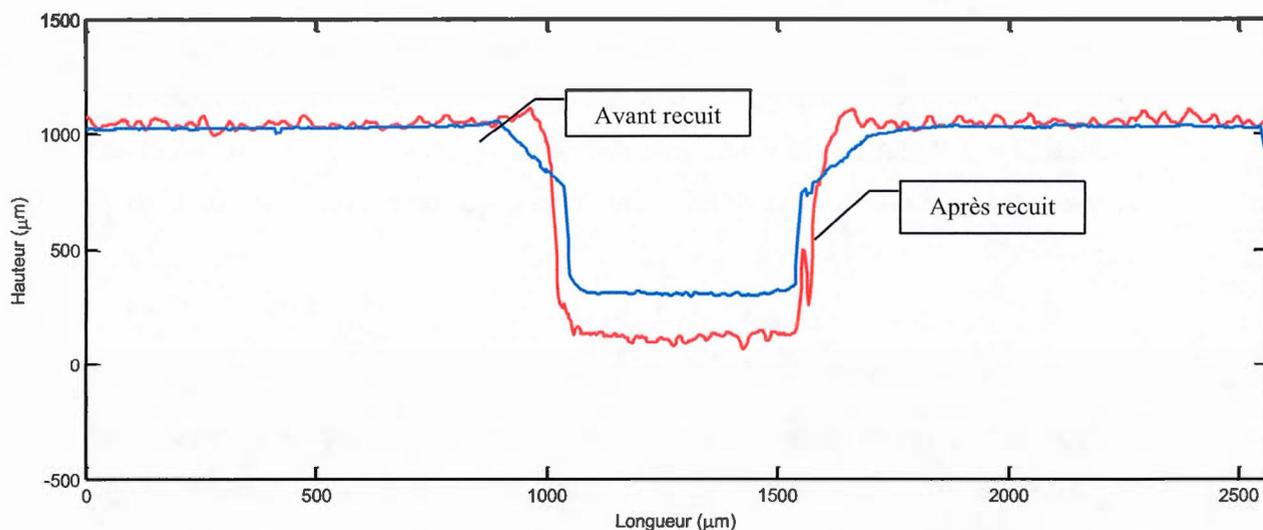


Figure 6.9 : Profil d'une tuyère à demi-angle de 12° avant recuit (bleu) et après recuit (rouge)

Le tableau 6.4 présente les mesures prises de la tuyère à demi-angle d'ouverture de 12°. La différence des dimensions avant et après la cuisson donne une bonne idée du taux de rétrécissement du matériau.

Tableau 6.4 : Dimensions réelles de la sous-couche Tuyères 12°

	Tuyère 12° non cuite		Tuyère 12° recuite		Rétrécissement réel
	Réelle	Différence avec dimensions désirées	Réelle	Différence avec dimensions désirées	
Diamètre d'ouverture externe (µm)	840	15%	688	5%	18%
Diamètre d'ouverture interne (µm)	516	0%	455	0%	12,8%
Profondeur (µm)	725	30%	910*		
Demi-angle d'ouverture (°)	13°	8%	14°	17%	

*Épaisseur combinée des sous-couches de Tuyère 12° et Tuyère 45°

La valeur du demi-angle d'ouverture semble être restée sensiblement la même après la cuisson, à un degré de différence. Cependant, comme l'échantillon non cuit avait une courbure, sa profondeur était biaisée lors de la mesure prise à l'aide d'un microscope confocal. Par conséquent, la valeur calculée de demi-angle avant cuisson n'est pas représentative, car elle découle directement de la valeur de la profondeur de la sous-couche.

6.2.3.2 Côté du demi-angle de 45°

La figure 6.10 présente les profils avant et après cuisson d'une même tuyère, du côté où l'ouverture est la plus grande. La plus grande profondeur de la courbe en rouge (après cuisson) est due au fait que la mesure a été prise une fois les sous-couches de tuyères jointes ensemble. Ceci n'était pas le cas lors de la prise des mesures avant le recuit de l'échantillon.

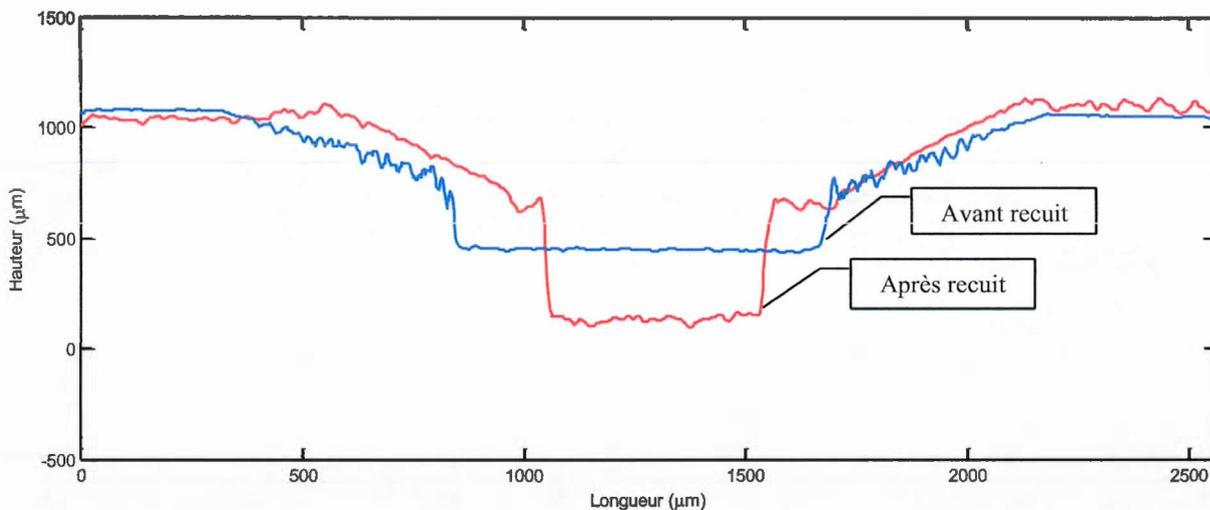


Figure 6.10 : Profil d'une tuyère de demi-angle de 45° avant recuit (bleu) et après recuit (rouge)

Le tableau 6.5 présente les mesures prises sur l'échantillon. Tout comme précédemment, la courbure présente dans l'échantillon non cuit lors de la mesure a pu

fausser quelque peu la valeur du demi-angle d'ouverture. Cependant, il est possible de constater qu'un taux de rétrécissement semblable est observable sur la partie Tuyère 45°. L'angle d'ouverture s'est corrigé pour atteindre la valeur de demi-angle désirée au départ de près de 45°.

Tableau 6.5 : Dimensions réelles de la sous-couche Tuyères 45°

	Tuyère 45° non cuite		Tuyère 45° recuite		Rétrécissement réel
	Réelle	Différence avec dimensions désirées	Réelle	Différence avec dimensions désirées	
Diamètre d'ouverture externe (μm)	1880	11%	1570	5%	16,5%
Diamètre d'ouverture interne (μm)	790	55%	700	56%	11,4%
Profondeur (μm)	630	13%	910*		
Demi-angle d'ouverture (°)	41°	9%	44°	2%	

*Épaisseur combinée des sous-couches de Tuyère 12° et Tuyère 45°

Le taux de rétrécissement est dans le même ordre que celui qui est fourni par Dupont. Il y a cependant une différence remarquable entre le rétrécissement des ouvertures externes de la couche et celles internes. En effet, le point de jonction des deux sections, qui se situe au centre de la couche, n'a rétréci que d'environ 12%. Les ouvertures externes quant à elles ont rétréci de 16,5% et 18% respectivement. Ceci est probablement dû à une différence de température, lors du recuit, entre le centre de l'échantillon et les bords de ce dernier. La température requise pour la cure de l'échantillon pourrait ne pas être atteinte au centre de la couche. La différence de température entraîne ainsi une contraction non uniforme dans le matériau. Cependant, ces mêmes effets ont contribué à corriger les erreurs de dimensions faites lors de l'usinage des sections. Il a donc été possible d'obtenir des dimensions très rapprochées de ce qui était désiré par cet effet non prévu.

L'épaisseur des sections jointes se rapproche aussi du 1 mm désiré avec $910 \mu\text{m}$. Il est cependant difficile de quantifier le taux de rétrécissement obtenu, car la courbure présente dans les échantillons non recuits biaise quelque peu les données.

La figure 6.11 montre une partie du silex retiré après le recuit de la couche des tuyères. Il est possible d'y voir les deux tuyères superposées ainsi que l'ouverture centrale qui a un diamètre trop élevé.



Figure 6.11 : Vue sur une des tuyères du Silex retiré de la couche après recuit

6.2.3.3 Alignement des deux couches

Lors de l'assemblage des deux couches de tuyères, l'alignement est un facteur indispensable. Lors des premiers essais de perçage, la sous-couche Tuyère 45° a été percée un peu trop profondément. Ceci a occasionné une ouverture trop grande du côté interne, côté joint à la sous-couche Tuyère 12° , supérieur de près de $250 \mu\text{m}$. Il est donc possible d'entrevoir grâce à cette erreur, aux figures 6.12 et 6.13, la section des tuyères à demi-angle d'ouverture de 12° et ainsi mesurer le décalage d'alignement entre les deux sections.



Figure 6.12 : Représentation 3D de la tuyère recuite vue de la Tuyère 45°

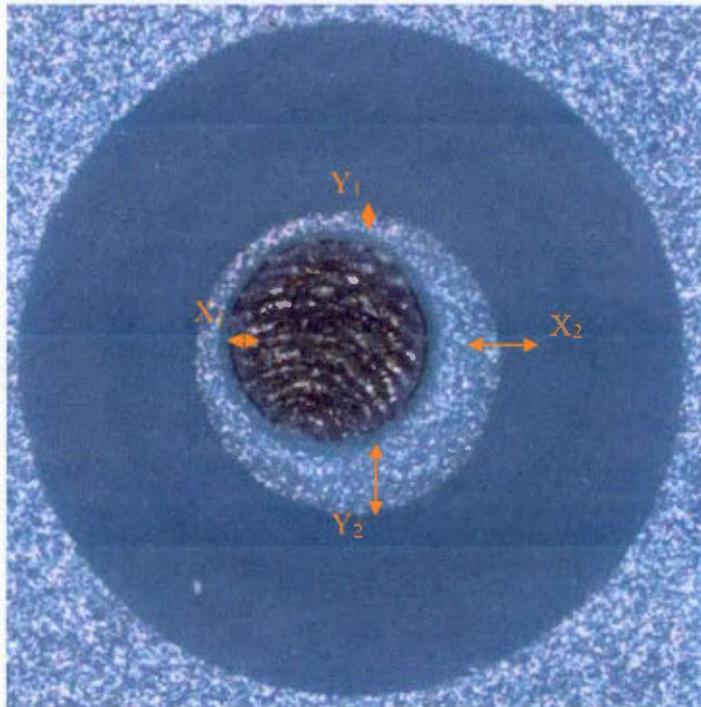


Figure 6.13 : Couche des tuyères (vue du décalage)

Le tableau 6.6 présente les mesures de décalage qui sont annotées à la figure 6.13.

Tableau 6.6 : Mesure du décalage entre les couches de tuyères

	Décalage (μm)
X_1	50
X_2	505
Y_1	108
Y_2	703

En se référant aux mesures prises, il est possible de déterminer que le décalage en X est de 225 μm vers la droite et en Y de 300 μm vers le haut. Il est primordial de s'aligner au micromètre près, car un petit décalage pourrait provoquer un stress entre les deux plaques qui entraînerait une séparation de celles-ci lors de l'allumage du combustible.

6.3 Couche allumage

Les tests effectués visaient à vérifier le meilleur substrat, interconnexion, motif de résistance et la meilleure recette de nanothermite afin d'obtenir un allumage de l'amorce à une puissance la plus faible possible.

Pour ce faire, une tension aux résistances a été appliquée et le courant échantillonné à chaque 11 ms. Un graphique typique, celui de la figure 6.14, a ensuite pu être établi, représentant l'évolution du courant dans le temps. De ce graphique, il a été possible de ressortir la puissance maximale appliquée lors de l'essai, en multipliant le courant maximum par la tension appliquée.

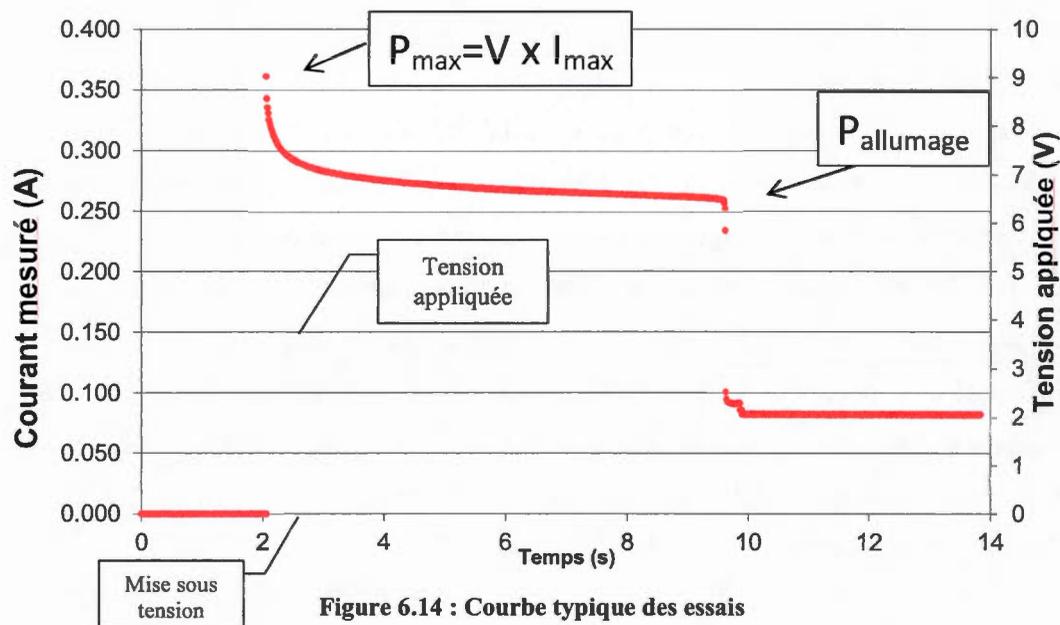


Figure 6.14 : Courbe typique des essais

Cependant, il a été remarqué que le courant diminue jusqu'à l'explosion des nanothermites ou du bris de la résistance. Ceci s'explique par l'augmentation de la résistivité de l'aluminium dû à la température du matériau. Par le fait même, la valeur de puissance maximale n'est pas réellement représentative de la puissance requise pour atteindre la température d'allumage de l'amorce. Par contre, la puissance mesurée à l'instant de l'explosion peut être considérée comme la puissance d'allumage. Cette puissance tient compte de l'augmentation de la résistivité de l'aluminium chauffé. C'est pourquoi cette valeur a été choisie pour comparer les différents essais entre eux. Il faut noter, à la fig. 6.14, la présence d'un courant résiduel après l'explosion. Ce courant s'explique par le fait que lors de nombreux essais, l'explosion de l'amorce de nanothermite ne détruisait pas complètement la résistance. Le courant continuait donc à circuler à travers le circuit de test jusqu'à l'extinction complète de la source d'alimentation. Cependant, dans la majorité des cas, les résistances étaient complètement détruites par l'explosion.

L'énergie distribuée à l'amorce serait aussi une valeur pertinente. Elle est représentée par la valeur de tension appliquée multipliée par l'aire sous la courbe du début à l'allumage. Cependant, la très grande variabilité du temps d'allumage entre les différents essais entraîne des valeurs d'incertitude élevées qui ne permettent pas de bien distinguer les valeurs d'énergie requise. Le mauvais contact occasionnel entre la goutte de nanothermite et la résistance chauffante, qui entraîne par le fait même un mauvais échange thermique pourrait être une des raisons qui explique cette variance. La difficulté de déposer des gouttes d'une dimension constante peut aussi être une raison, les plus petites ayant besoin de moins d'énergie, et donc explosent plus rapidement. C'est pour ces raisons que les données de temps d'allumage et d'énergie ont été laissées de côté pour l'analyse.

6.3.1 Substrat

Le premier substrat testé fut la gaufre de silicium. Les simulations ayant démontré que ce matériau est celui qui conduit le mieux la chaleur, il n'a pas été surprenant de voir à la caméra infrarouge, illustrée à la figure 6.15, que c'est la température de l'échantillon complet qui s'élevait. La puissance requise afin de faire élever la température à au moins 50 °C a atteint les 20 W.

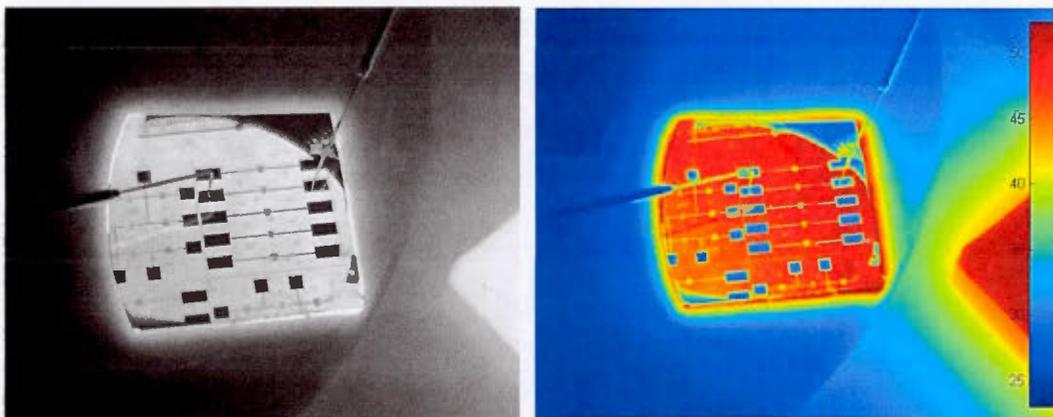


Figure 6.15 : Image infrarouge d'un échantillon sur silicium (gauche) et post-traitement de l'image (droite) alimenté à 15 V

Par la suite, des échantillons sur substrat de verre et de Kapton ont été testés. La figure 6.16 témoigne d'une plus grande dispersion de la chaleur sur le verre que sur le Kapton. Le test sur verre a été fait avec une puissance supérieure à celle effectuée sur Kapton afin de bien apercevoir la dissipation de la chaleur à la caméra infrarouge. Ceci laisse présager une perte d'énergie supérieure sur l'échantillon de verre.

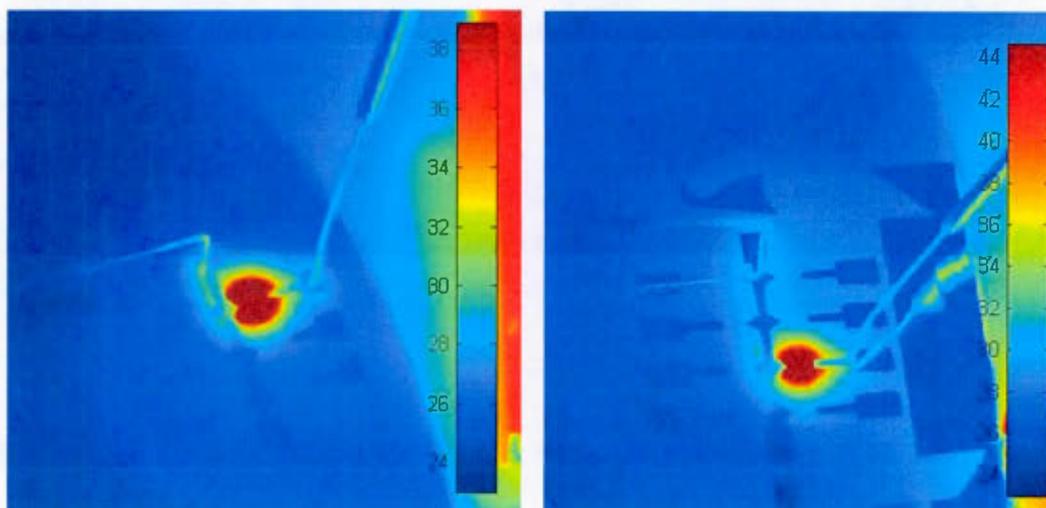


Figure 6.16 : Image IR filtrée avec substrat de verre à 5 V (gauche) et de Kapton (droite) à 2 V

On peut voir au tableau 6.7 que le taux de succès d'allumage des dispositifs est plus élevé sur le substrat de verre. Celui de Kapton étant flexible, il a tendance à se déformer

lors de la fabrication et des tests, entraînant un bris de la résistance ou de la ligne de connexion. Cependant, en diminuant au maximum la manipulation du substrat lors de la fabrication, il est facilement possible d'éviter ces bris et d'améliorer le taux de succès sur substrat de Kapton.

Tableau 6.7 : Taux de succès selon le substrat

Substrat	Taux de succès
Verre	78%
Kapton	62%

En compilant les essais effectués sur verre et sur Kapton, il est possible de comparer les deux substrats entre eux. Il est cependant important de garder la même recette, motif de résistance ainsi que les mêmes interconnexions.

La figure 6.17 montre que la puissance requise pour l'allumage des nanothermites sur les échantillons avec substrat de Kapton requiert beaucoup moins de puissance que ceux sur verre. Elle nécessite, en moyenne, 85% moins de puissance. Il faut aussi remarquer l'écart entre les données pour les essais sur substrat de verre alors que les valeurs de puissance sur Kapton sont très concentrées vers la moyenne. Un plus grand nombre d'essais ont été faits avec le substrat de verre, comme le démontre les nombres entre parenthèses qui représentent les essais réussis pour chaque classe d'échantillon. De plus, la grosseur des gouttes de nanothermites n'étaient pas constante. C'est probablement la combinaison de ces effets qui entraîne la grande variabilité des écarts.

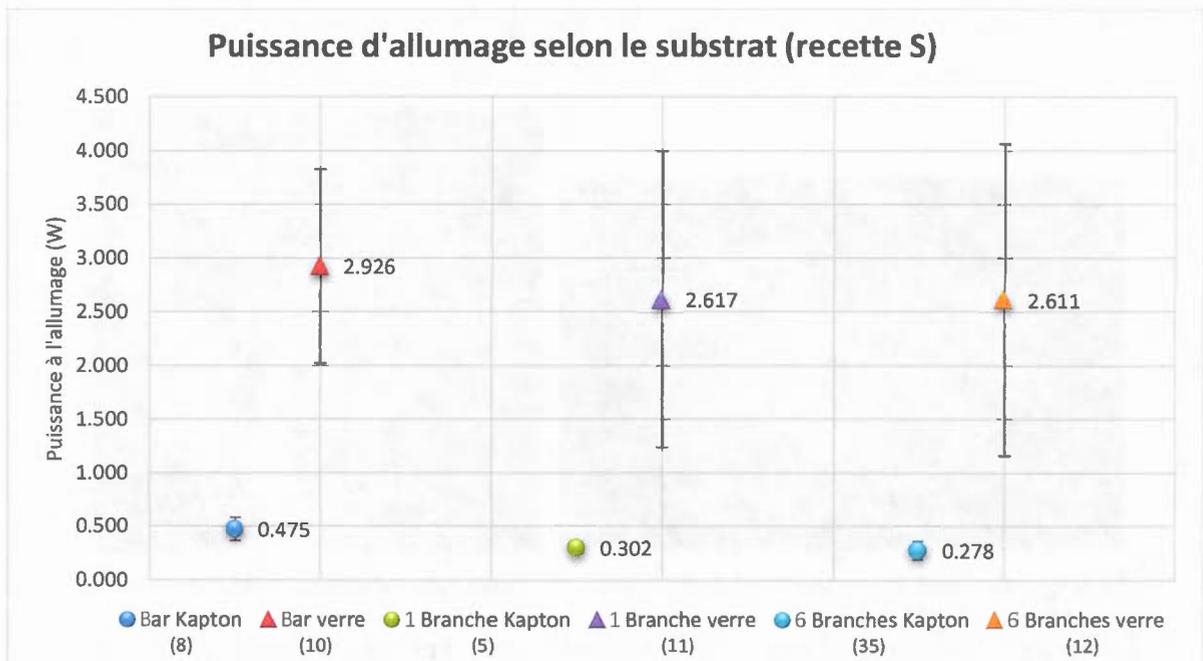


Figure 6.17 : Graphe comparatif des substrats de verre et Kapton

6.3.2 Branchements

Les taux de succès et les puissances requises à l'allumage ne présentent pas de différences marquantes entre les différents branchements. Cependant, les images infrarouges prises montrent l'effet qu'ont ces interconnexions, entre autres sur le risque de diaphonie entre les dispositifs. La diaphonie étant l'allumage d'un dispositif voisin à celui désiré. Il n'a cependant pas été possible de mesurer la température maximale atteinte sur les échantillons afin de les comparer aux valeurs obtenues lors de simulations. Les caméras thermiques utilisées n'ont pas permis des lectures à de si hautes températures. C'est pourquoi l'attention est plutôt portée sur la distribution de la chaleur à travers les connexions.

La première interconnexion, comportant des branches minces et longues et présentée à la figure 6.18, est celle ayant le plus grand potentiel de subir de la diaphonie sur les

dispositifs adjacents. Comme prévu par la simulation, la température s'est élevée tout au long des lignes d'interconnexions, se rendant jusqu'aux contacts.

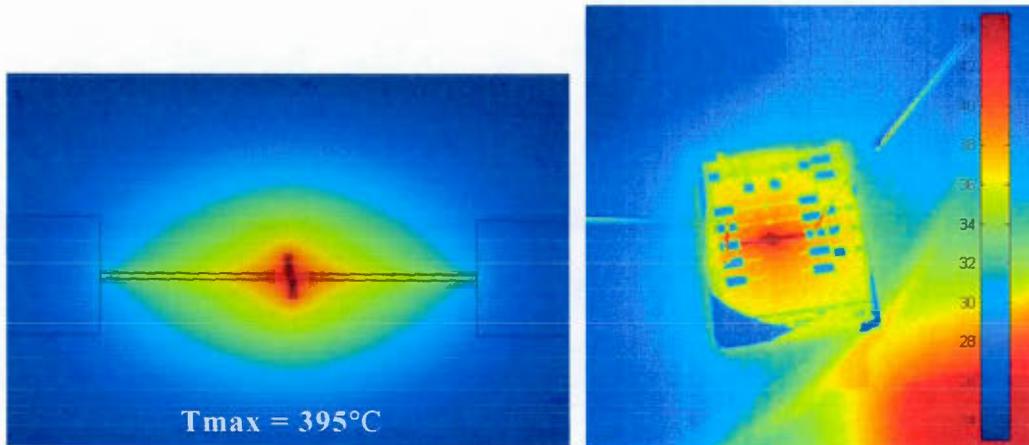


Figure 6.18 : Simulation (gauche) et image thermique (droite) des interconnexions minces à 3 V

Les interconnexions rectangulaires avec une pointe triangulaire de la figure 6.19 présentent une grande concentration de la chaleur au centre de la résistance. L'effet de diaphonie est donc beaucoup moins probable.

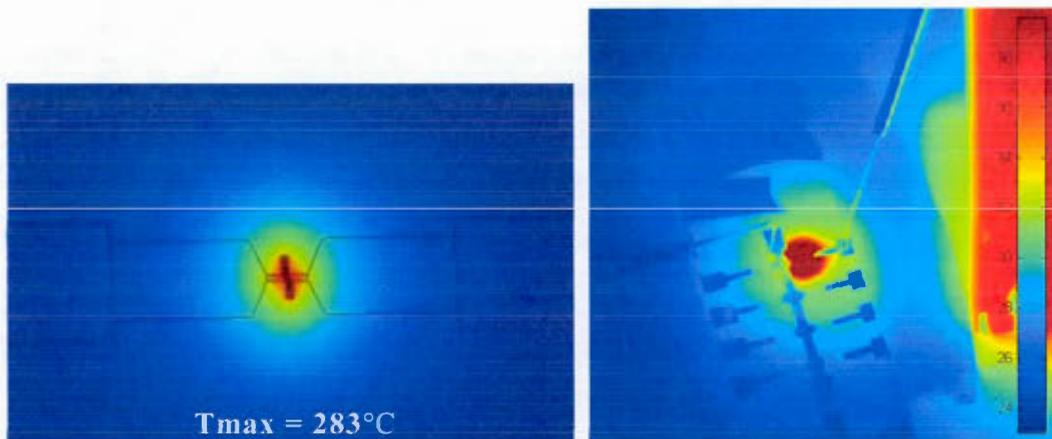


Figure 6.19 : Simulation (gauche) et image thermique (droite) des interconnexions à pointe triangulaire à 3 V

En ce qui concerne les interconnexions triangulaires de la figure 6.20, la chaleur est là aussi bien centré à la résistance. Cependant, pour la même tension appliquée que le

précédent exemple de branchements, les températures plus élevées semblent atteindre les contacts. Cet effet pourrait entraîner de la diaphonie.

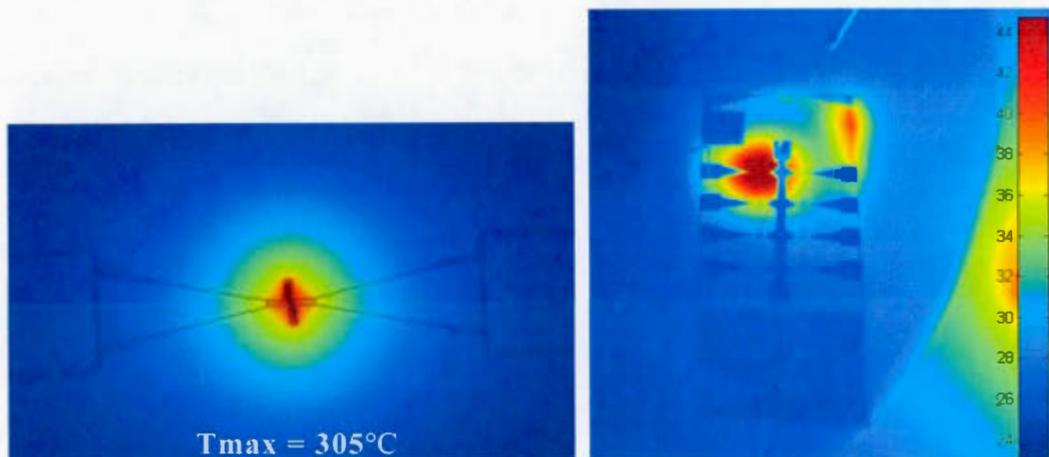


Figure 6.20 : Simulation (gauche) et image thermique (droite) des interconnexions triangulaires à 3 V

Il est à noter que les connexions rectangulaires larges ont aussi été testées, mais sur un substrat de silicium seulement. Les effets de ce substrat ont été montrés précédemment et il a alors été impossible de ressortir une donnée démontrant le seul effet de l'interconnexion.

6.3.3 Motifs de résistance

Les motifs de résistance sur lesquels les tests se sont concentrés sont ceux de la barre, d'une branche et de six branches. Ils ont été préférés aux autres, car ils présentent les plus grandes différences entre eux. Les taux de succès et de puissance d'allumage sont présentés en prenant soin de séparer les recettes de nanothermites utilisées afin d'éviter une variation des données qui n'est pas totalement reliée au motif de résistance.

En observant le tableau 6.8, il semble que le motif de barre possède le meilleur taux de succès avec les deux recettes. Ceux des branches montrent des taux de succès très comparables.

Tableau 6.8 : Taux de succès des motifs de résistance

Recette de nanothermite	Taux de succès	
	Avec nitrocellulose (NC)	Sans nitrocellulose (S)
Barre 	70%	100%
1 Branche 	40%	67%
6 Branches 	50%	63%

Pour ce qui est de la puissance d'allumage, la figure 6.21 nous montre que le motif de barre nécessite plus de watts que les autres motifs, peu importe la recette utilisée. Les motifs d'une et six branches semblent avoir besoin sensiblement de la même quantité de puissance pour l'allumage. Des explications probables sur les résultats obtenus seront abordées dans la section discussion.

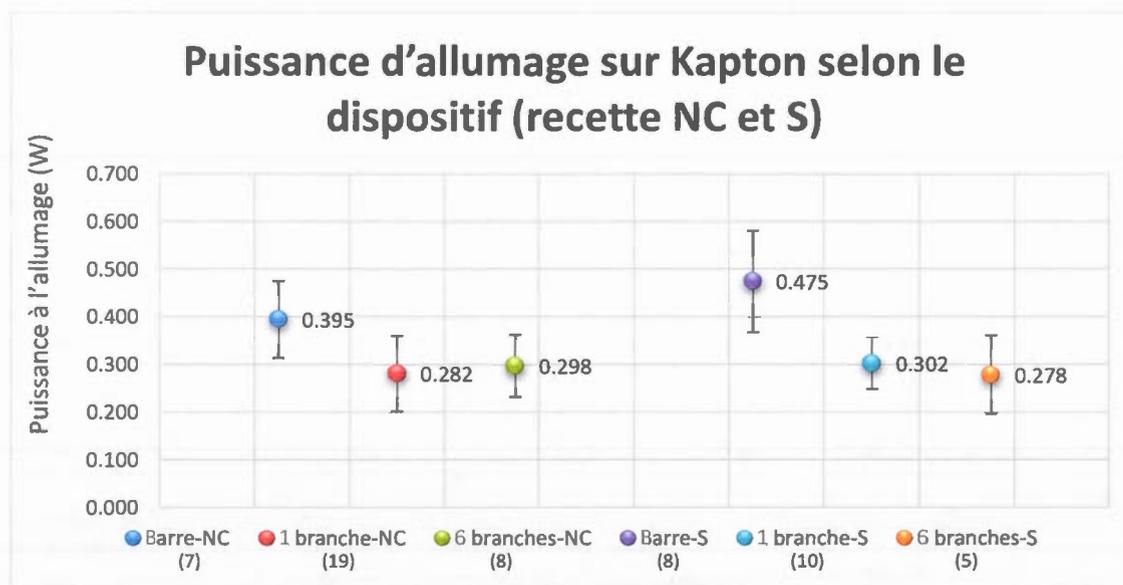


Figure 6.21 : Puissance d'allumage selon le motif de résistance

Les observations faites sur les résistances après avoir appliqué une tension ont permis de confirmer en partie les résultats de simulations précédemment faites. Comme en témoignent les images de la figure 6.22, il est évident que le point le plus chaud de la résistance testée concorde avec celui de la simulation. De plus, il est possible d'y entrevoir la répartition de la température en regardant la colle fondue ayant fixé l'échantillon de Kapton. Là aussi, la pratique semble confirmer ce qui avait été envisagé grâce aux simulations.

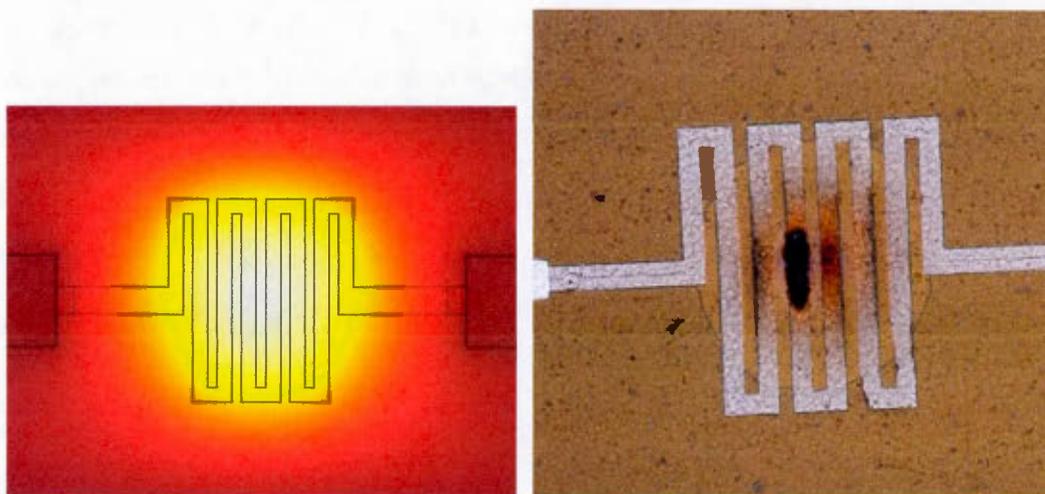


Figure 6.22 : Simulation et photo prise d'une résistance à 6 branches ayant chauffé

6.3.4 Recette de nanothermite

Les deux recettes de solution de nanothermites ont été testées autant sur un substrat de verre que sur celui de Kapton. Cependant, les résultats précédents ont démontré que le Kapton est un bien meilleur substrat, car il isole mieux thermiquement les allumeurs. C'est pourquoi les résultats comparant les performances des deux recettes qui suivent ne tiennent compte que du Kapton.

La recette de nitrocellulose, une fois déposée, nécessite un temps de séchage plus long que celui sans nitrocellulose. Certains échantillons ont séjourné une journée supplémentaire au four afin de vérifier les différences en terme de puissance d'allumage et du taux de succès.

Au vu des résultats obtenus dans le tableau 6.9, représentant le taux de succès des recettes de nanothermite, il semble que la recette sans nitrocellulose s'allume plus régulièrement que l'autre. Pour ce qui est du temps de séchage, la journée supplémentaire a semblé bénéfique. Une hausse de 15% du taux d'allumage est remarquée. La solution de nanothermites semble donc posséder encore un peu de solvant après une seule journée de séchage. Les raisons possibles du taux de succès plus élevé de la solution sans nitrocellulose seront apportées à la section discussion.

Tableau 6.9 : Taux de succès des recettes de nanothermite

Recette de nanothermite	Taux de succès
Sans nitrocellulose (Alexmo-S)	74%
Avec nitrocellulose (Alexmo-NC)	56%
Avec nitrocellulose et 1 jour de séchage (Alexmo-NC)	50%
Avec nitrocellulose et 2 jours de séchage (Alexmo-NC)	65%

En ce qui concerne la puissance d'allumage des différentes recettes, aux vues de la figure 6.23, elles semblent s'équivaloir. Les valeurs de puissance pour chaque motif de résistance, autant pour la recette sans nitrocellulose qu'avec celle en contenant, sont comprises dans les écarts les uns des autres avec un nombre d'essais réussis sensiblement équivalent entre les classes (nombres entre parenthèses). De plus, la journée supplémentaire de séchage ne semble pas avoir eu d'impact sur la puissance à l'allumage. Les nombres entre parathèses représentent les essais

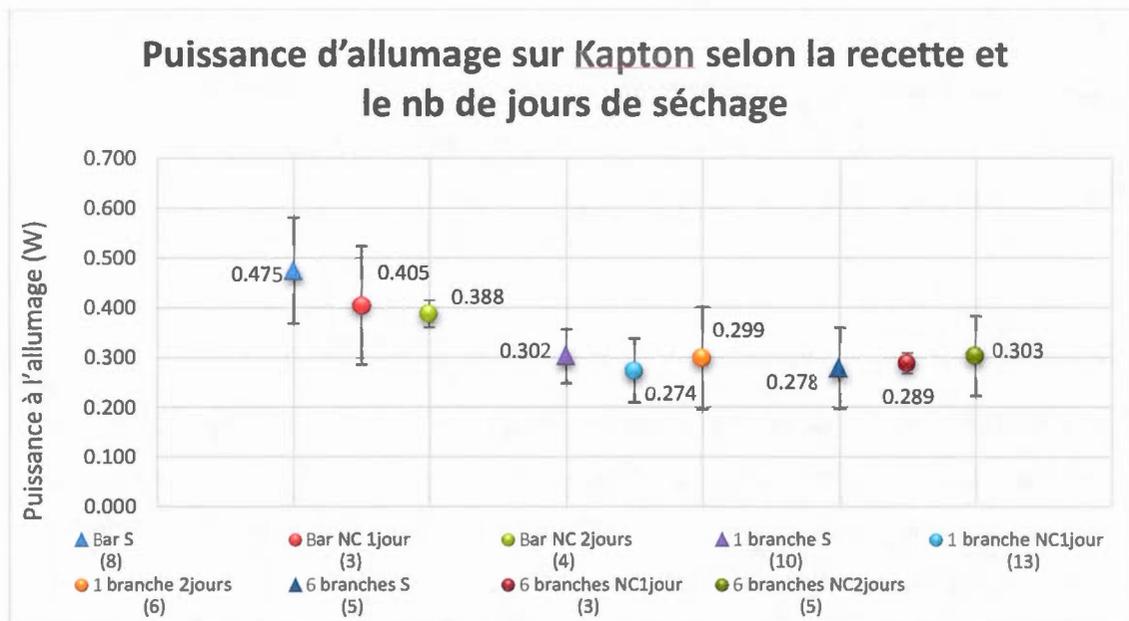


Figure 6.23 : Puissance d'allumage selon la recette de nanothermites

Il n'est donc pas possible de conclure, d'après ce graphique, qu'une recette de solution de nanothermites est meilleure que l'autre. En regardant cependant le taux de succès des différentes recettes au tableau 6.9, on pourrait conclure que celle sans nitrocellulose est la plus fiable. Mais la viscosité supérieure de la solution de nanothermites avec nitrocellulose vient engendrer un problème de contact thermique. L'énergie n'est donc pas transmise d'une manière optimale de la résistance aux nanothermites. Il en sera discuté dans la section qui suit.

6.4 Discussion

Les résultats démontrés précédemment ont conduit à plusieurs constatations. Elles seront abordées dans la section qui suit afin d'en ressortir des lignes directrices pour obtenir le meilleur dispositif possible.

6.4.1 Couche des chambres

Les résultats analysés de la couche des chambres nous ont permis de bien quantifier et comparer le taux de rétrécissement, à l'exception de l'épaisseur dont la mesure initiale n'était pas représentative. C'est le type de mesure prise qui est en cause. Cette dernière aurait dû être prise de manière mécanique au lieu d'utiliser un microscope optique. Les dimensions de l'échantillon et de ses ouvertures ont été calculées selon le taux de rétrécissement théorique. Ce taux semble être assez fiable, aux vues des premiers résultats de la couche des chambres. Il faut porter une attention particulière à la manutention et à l'entreposage de l'échantillon avant son recuit. Ceci permettrait peut-être de réduire la courbure de l'échantillon et ainsi de mieux évaluer la profondeur des échantillons, toujours avant recuit. En ce qui concerne les rebords qui sont apparus quelques fois, il faut s'assurer de percer lentement et proprement la couche de LTCC ainsi que de sabler faiblement la surface afin de retirer tout excédent. De cette manière, les trous seront assez nets.

6.4.2 Couches des tuyères

La première constatation à faire est la précision avec laquelle le perçage des ouvertures doit être fait. La profondeur à laquelle la mèche s'enfonce doit être bien réglée et constante. Dans le cas contraire, il est possible de se retrouver, comme ici, avec des orifices plus grand que désiré. Ceci entraîne par le fait même un demi-angle d'ouverture

différent des 12° ou 45° voulus. Ensuite, lors du recuit, le taux de rétrécissement n'a pas été aussi uniforme que prévu. Il semblerait que la chaleur n'ait pas été la même partout, ayant été plus élevée au niveau des surfaces qu'au centre. Cependant, les demi-angles d'ouvertures trop grands ont été corrigés grâce à cet effet, en réduisant un peu plus le diamètre des ouvertures de surface que celui du centre. Il faudra éventuellement s'assurer d'avoir les bonnes valeurs quant au taux de rétrécissement pour l'ensemble de la couche des tuyères.

L'alignement des deux sous-couches de tuyères pose aussi un problème. Un décalage de quelques micromètres et c'est tous les micropropulseurs de la matrice qui seront affectés. Un mauvais alignement peut, lors de l'allumage, endommager une des couches en exposant des parties qui ne doivent pas l'être, comme illustré à la figure 6.13. Une technique d'alignement plus efficace devra être envisagée, par exemple en utilisant un microscope.

6.4.3 Couche d'allumage

En se basant sur les résultats montrés, il est clair que le substrat de silicium est à éviter. Il est un bon conducteur thermique comparé au verre et au Kapton, ce qui en fait le pire des candidats. Le verre est un bon isolant, et de bons résultats préliminaires ont été obtenus avec ce substrat. Par contre, les essais fait sur ce substrat ont présentés une grande variabilité dans les résultats. La dimensions des gouttes de nanothermites déposées est probablement en cause. Le dépôt des gouttes s'est fait manuellement en utilisant une seringue. Celle-ci se bouchait régulièrement et le débit n'était pas constant. Avec la pratique, les gouttes déposées se sont de plus en plus uniformisées. C'est pourquoi la variation des résultats sur un substrat de Kapton est plus faible, ces tests ayant été fait après ceux sur verre. Cependant, le Kapton est le meilleur des trois, pour ce qui est de l'isolation thermique. La différence est notoire lorsqu'on compare les puissances d'allumage sur verre et sur Kapton. Ce dernier nécessite 85% moins de

puissance que le verre. La technique de fabrication est par contre un peu plus ardue. Le Kapton étant une mince feuille de polymère, il est très souple et capte très bien l'humidité. L'adhésion de l'aluminium est alors plus faible et entraîne par conséquent des dispositifs ne fonctionnant pas ou ayant des imperfections. Ceci se répercute d'ailleurs sur le taux de succès sur Kapton qui n'est que de 62%, comparativement à 78% pour les dispositifs sur verre. Ce pourcentage de succès sur Kapton peut cependant être facilement augmenté en améliorant le procédé de fabrication. La minimisation de la manipulation du substrat lors de la fabrication de la résistance ainsi que lors du dépôt de l'amorce de nanothermite est un bon exemple de moyen facile à implémenter qui permettrait d'augmenter le pourcentage de succès.

Il a été noté une très grande variabilité sur les résultats des essais faits sur substrat de verre. La dimension des gouttes de nanothermites déposées est probablement en cause, le dépôt des gouttes s'étant fait manuellement en utilisant une seringue. Celle-ci se bouchait régulièrement et le débit n'était pas constant. Avec la pratique, les gouttes déposées se sont de plus en plus uniformisées. C'est pourquoi la variation des résultats sur un substrat de Kapton est plus faible, ces tests ayant été faits après ceux sur verre. Une technique automatisée de dépôt des nanothermites permettrait une plus grande uniformité des gouttes et contribuerait à une plus faible variabilité des résultats de tests d'allumage.

Il a été vu, à la figure 6.18, que les interconnexions rectangulaires minces entraînent une plus grande dissipation de la chaleur. La température maximale atteinte sera alors plus faible que les autres pour une même puissance appliquée. En utilisant plutôt de larges interconnexions et en les diminuant progressivement vers la résistance, la chaleur se concentre vers cette dernière. Ceci a comme effet, toujours pour une même puissance fournie, d'obtenir une température maximale supérieure, tout en diminuant le risque de diaphonie entre les dispositifs. La différence entre la connexion triangulaire (fig. 6.20) et celle rectangulaire au bout en triangle (fig. 6.19), bien que minime, se

situe dans le risque de diaphonie accrue. En utilisant la seconde option, le risque est diminué, mais au détriment d'une température maximale atteinte plus faible. En vertu du critère de réduction de la puissance requise à l'allumage, il est préférable d'utiliser la topologie de connexion triangulaire. Par contre, si la diaphonie cause un réel problème lors des essais des micropropulseurs complets, les connexions rectangulaires à bout triangulaire restent une option.

En ce qui concerne les motifs des résistances, celui de la barre présente un taux de succès dépassant les autres, et ce, pour les deux recettes de nanothermites (tab. 6.8). Ceci élimine donc l'effet des différentes recettes sur ce résultat. L'explication pourrait provenir du fait que la résistance de la barre est moins sujette aux imperfections lors de la fabrication, car le motif couvre une plus petite surface. La présence d'une imperfection, comme une poussière entraîne sur une résistance un point chaud qui peut la briser. Une seconde explication pourrait provenir du mouvement du Kapton lorsque ce dernier chauffe. Les résistances à branches, s'étendant sur deux dimensions, sont plus sensibles que le motif à barre qui n'est en fait qu'une ligne d'aluminium. Lors des essais d'allumage, il a été remarqué que le Kapton se pliait lorsqu'une tension électrique était appliquée. Cette contraction se faisait exactement au point où la résistance chauffe, provoquant quelques fois des bris de connexion. La résistance en forme de barre étant unidimensionnelle, la contraction sur un seul côté a été observée. Pour les résistances en forme de branches, la contraction s'effectuait de deux côtés, perpendiculairement, entraînant plus souvent que sur le motif de barre des bris de connexion. Cet effet non désiré a sans contredit affecté le taux de succès des motifs.

La barre nécessite cependant une plus grande puissance d'allumage que les autres motifs (fig. 6.21). C'est probablement dû à la surface de contact qui est beaucoup plus grande avec des dispositifs à branches. Une surface de contact plus grande entraîne une plus grande conduction de la chaleur vers la goutte de nanothermites. Cette dernière augmente donc en température plus efficacement.

Finalement, pour ce qui est des deux recettes de nanothermites testées, celle sans nitrocellulose a le meilleur taux de succès (tab. 6.9). Les puissances d'allumage sont cependant semblables pour l'ensemble des recettes, si l'on considère les écarts autour de la moyenne (fig. 6.23). Les nanothermites contenant de la nitrocellulose devraient pourtant nécessiter moins de puissance. C'est ce qu'ont montré des tests d'allumages effectués à l'aide d'un laser focalisé par l'équipe de Petre *et al.* de RDDC Valcartier en 2014. La raison serait peut-être due à la viscosité du mélange et par le mauvais contact thermique que cela entraîne, lorsque déposé sur la résistance. En effet, la solution sans nitrocellulose (Alexmo-S) est très liquide. Lorsque déposée, la goutte s'écrase sur la résistance, comme une goutte d'eau sur une surface plane. Composé d'isopropanol qui s'évapore facilement à l'air libre, elle sèche très rapidement et ne laisse que les nanothermites. Par contre, la solution avec nitrocellulose (Alexmo-NC) est très visqueuse. Lorsque déposée, elle reste en forme conique. Si elle est déposée sur du Kapton et qu'il y a présence d'un petit relief, la solution ne remplira pas nécessairement cet espace. Le contact entre les nanothermites et la résistance ne sera pas idéal et ne favorisera pas le meilleur effet de conduction. Il faut donc s'assurer de la meilleure planarité de la surface sur laquelle est déposée la solution de nanothermites.

La solution de nanothermites avec nitrocellulose a comme solvant de l'acétone, d'où, en partie, son aspect un peu plus visqueux. Il nécessite un peu plus de temps de séchage. Les résultats ont montré que cela n'affecte pas la puissance requise à l'allumage, mais plutôt son taux de succès. Une hausse de 15% de ce taux est remarquée pour une seule journée de plus passée au four. Il est donc préférable de garder cette période à un minimum de deux jours.

CONCLUSION

L'objectif principal de cette recherche était de développer une matrice de micropropulseurs à combustible solide permettant une manœuvrabilité d'un microsatellite pour sa durée de vie. Le système devait être compact et léger, tout en étant capable de fournir des poussées suffisantes pour rediriger l'engin spatial. Des contraintes de coûts, de flexibilité et d'adaptabilité devaient aussi être tenues en compte dans le dispositif final.

Cependant, l'objectif principal n'a été que partiellement atteint. C'est notamment dû à un manque de temps et de disponibilité des ressources matérielles. L'assemblage complet du dispositif ainsi que les tests de poussées incluant le combustible principal n'ont donc pas été faits.

Avancées

Malgré tout, le projet a démontré la faisabilité de la mise en matrice sur deux dimensions des micropropulseurs en usinant le LTCC, un matériau peu cher. Les différentes couches constituant le dispositif ont été fabriquées. Les étages des chambres et des tuyères ont été faits à partir de LTCC, matériau possédant des caractéristiques thermiques et mécaniques très appréciables. Une matrice de 192 chambres et tuyères a été fabriquée en ayant les dimensions et les angles optimaux afin d'obtenir la plus grande poussée possible. Les résultats montrés sont d'ailleurs plus que satisfaisants.

La section d'allumage qui a été conçue a permis de réduire la puissance consommée pour le démarrage de la combustion. L'introduction d'un substrat de Kapton, sur lequel

repose la résistance chauffante, a permis d'améliorer l'isolation thermique et a été un des facteurs importants à la baisse de puissance nécessaire à l'allumage.

L'utilisation d'une amorce de nanothermites y a aussi été un apport. En incorporant cette solution, la température d'allumage, et par conséquent l'énergie requise, est diminuée de beaucoup. Cette technique d'allumage des nanothermites par effet Joule est novatrice. Elle a soulevé plusieurs problèmes, mais aussi des solutions et des pistes de résolutions.

Les différentes simulations effectuées ont permis de définir le substrat idéal à utiliser pour minimiser la puissance d'allumage. Elles ont aussi servi à définir les meilleurs et les moins bons motifs de résistances et de connexions, assurant l'optimisation du dispositif et diminuant du même coup les risques de diaphonie.

Travaux futurs

Jusqu'à maintenant, il a été démontré qu'une réduction de la puissance d'allumage est possible en utilisant un substrat flexible de Kapton et une amorce de nanothermites. Les nanothermites dégagent une température atteignant près d'un millier de degrés Celsius. Il faudrait cependant s'assurer que cette température n'est pas trop localisée et que le combustible principal puisse s'allumer.

L'utilisation des nanothermites et du substrat flexible a amené un problème de contact entre les deux qui n'était pas optimal. Afin de pallier ce problème, il serait possible de creuser de petites cavités dans le Kapton et sous les résistances, afin d'y verser les gouttes d'amorces. De cette manière, le contact entre les deux serait optimisé et par le fait même il y aurait une meilleure conduction.

Trouver la recette de nanothermites requérant la plus faible puissance d'allumage est aussi l'une des recherches à parfaire. L'incorporation de nitrocellulose à la solution

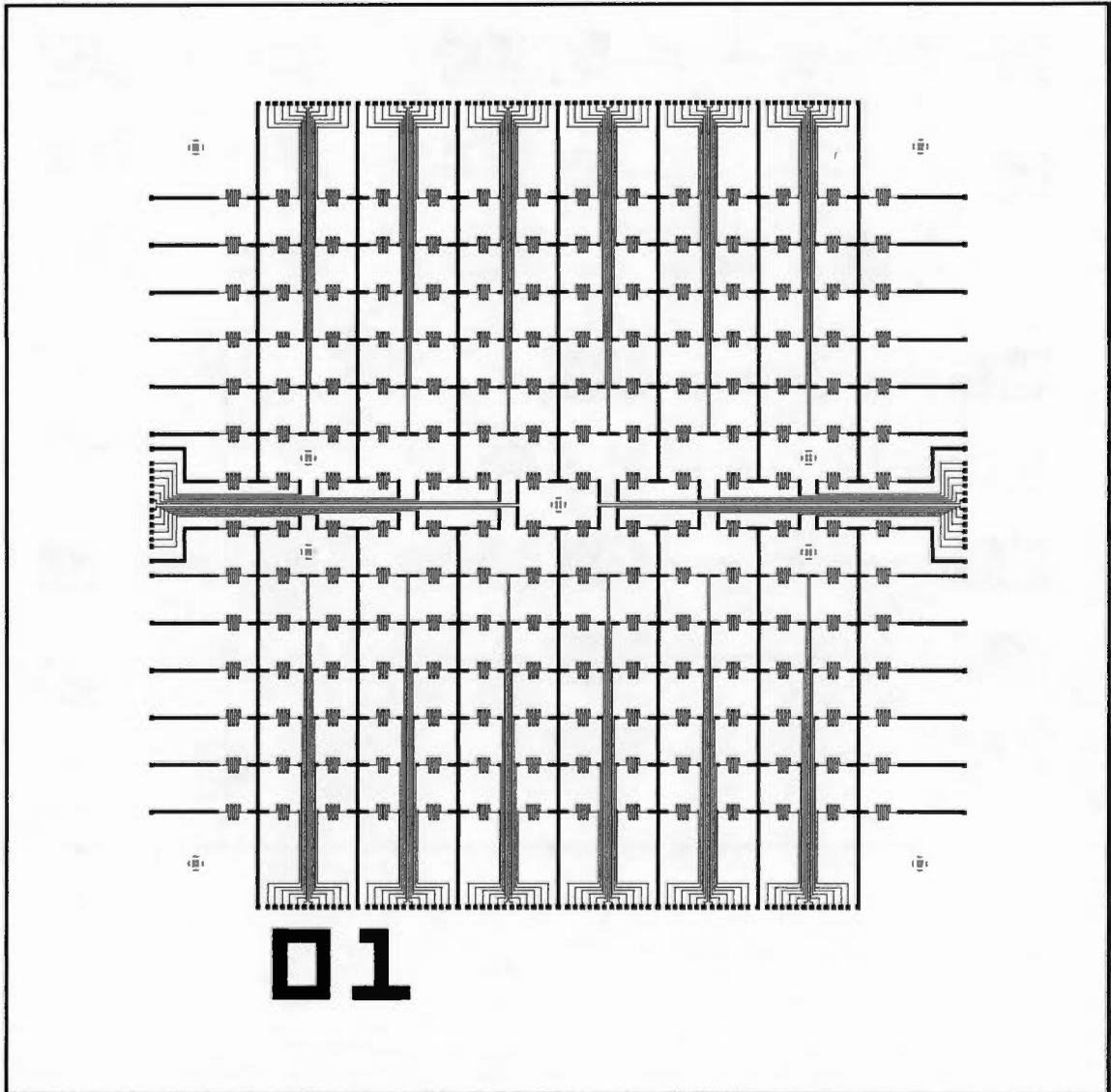
avait pour but de réduire la température d'allumage. De tests d'allumage au laser ont été faits parallèlement par d'autres personnes et ont prouvé que s'était le cas. Cependant, avec le mauvais contact que nous avons sur nos dispositifs, ce fait n'a pas pu être établi avec nos résistances. Malgré tout, il faudrait explorer davantage la recette avec nitrocellulose, la qualifiant selon son taux qui avait été établi arbitrairement à 3%.

D'autre part, une tâche à compléter serait en outre d'effectuer l'assemblage complet du dispositif. Différents problèmes nous ont obligés à laisser de côté cet aspect qui est cependant primordial. La technique d'assemblage et le choix de la colle seront à déterminer dans de futurs travaux. Le remplissage des chambres avec le combustible sera aussi un défi, car il faudra éviter la formation de bulle d'air.

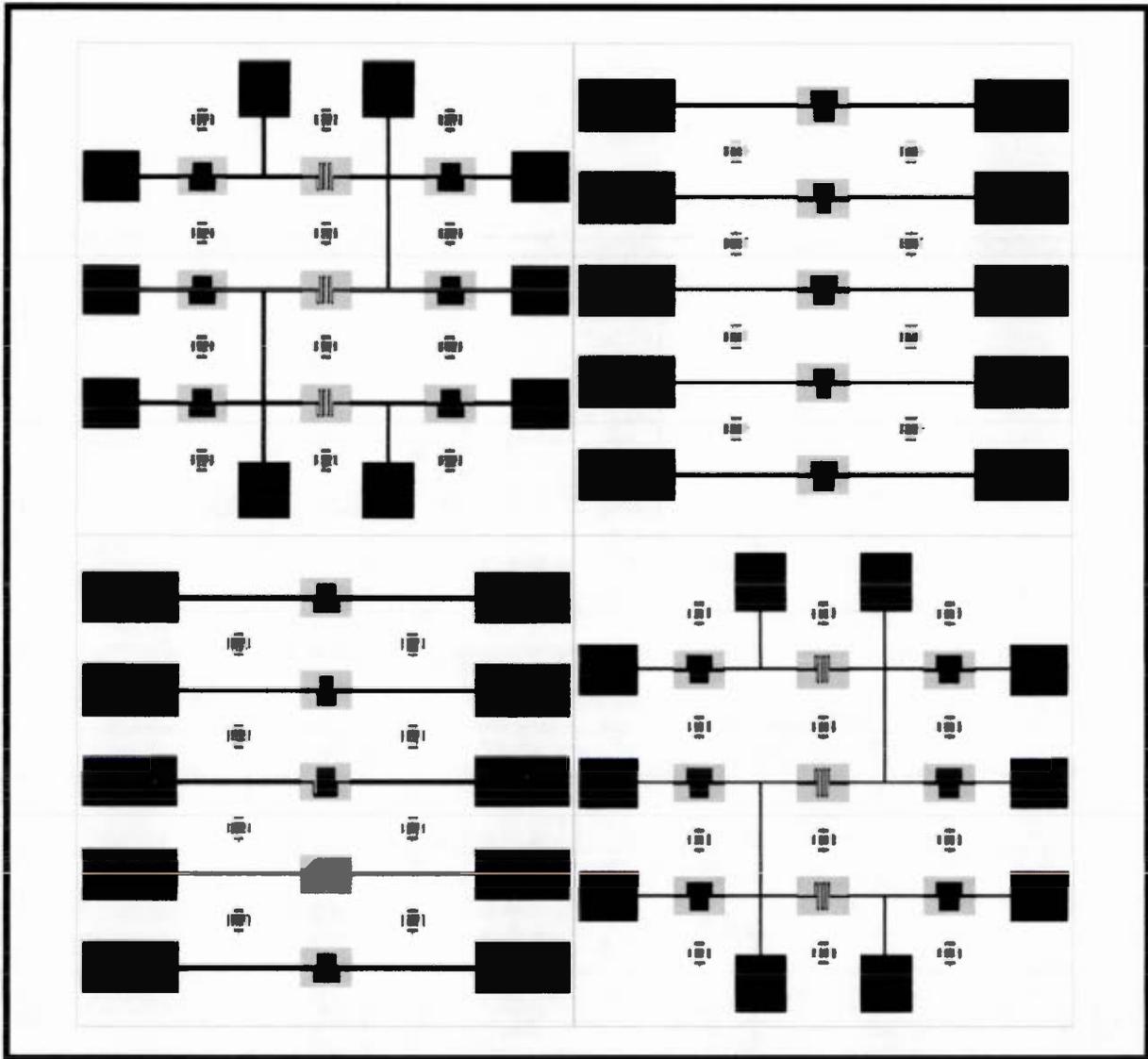
Finalement, une fois le dispositif assemblé, des tests de poussées devront être conduits. Il devra en être ressorti la force de celle-ci ainsi que sa durée. Une fois ces données recueillies, des ajustements de dimensions ou d'architectures pourront être effectués sur toutes les parties du micropropulseur.

ANNEXE A

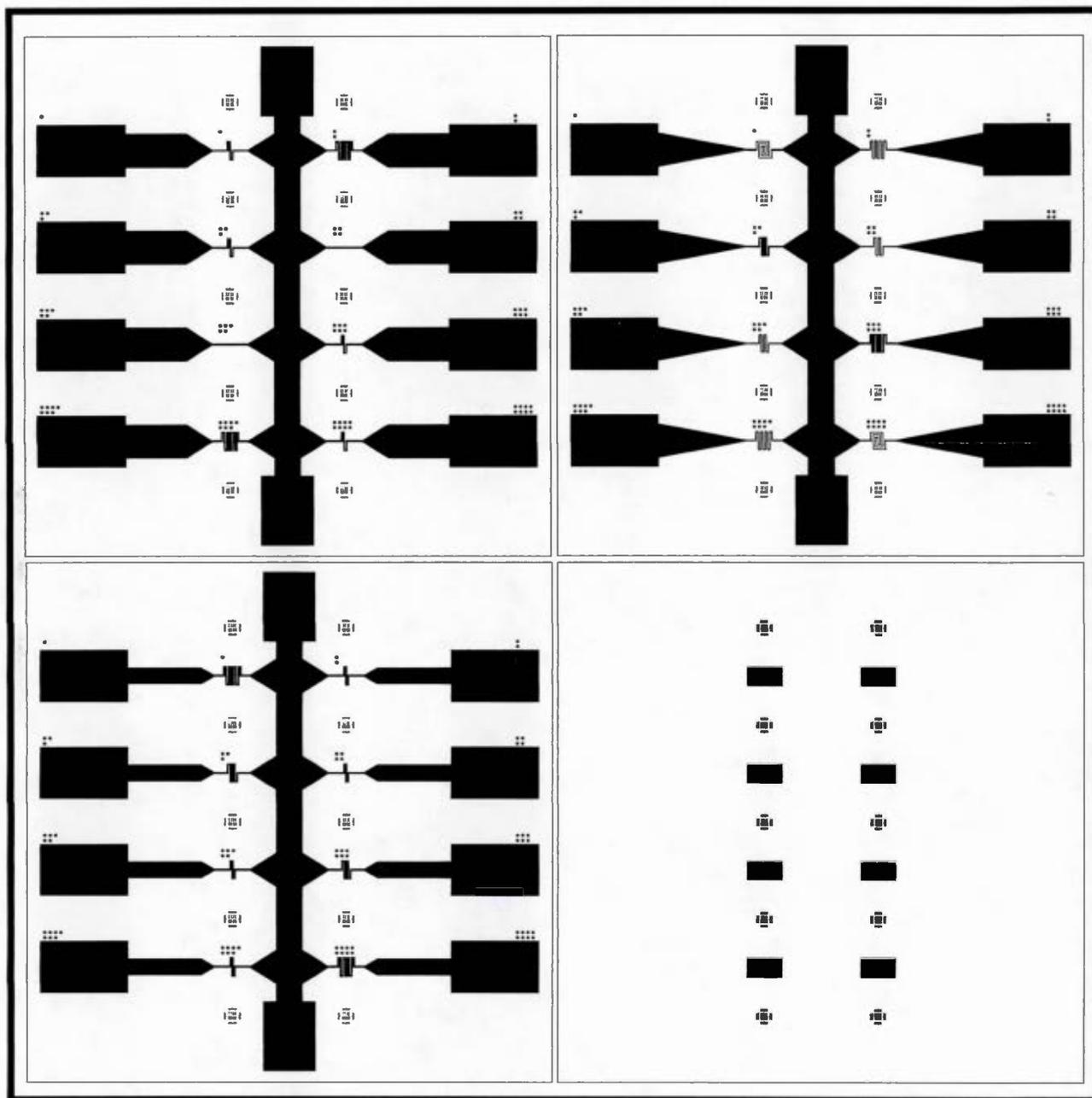
MASQUES PHOTOLITHOGRAPHIQUES



Version 1 (Décembre 2012)



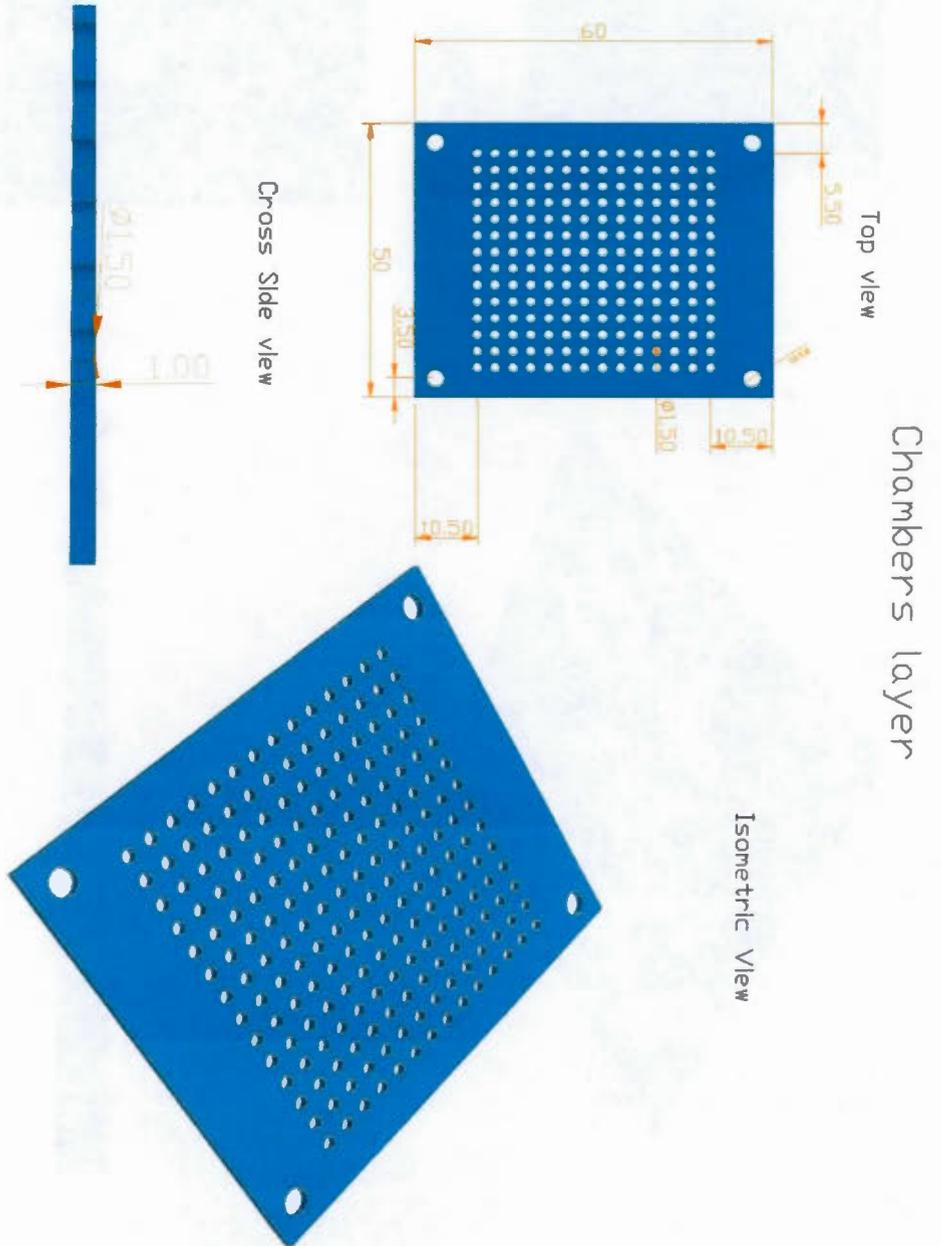
Version 2 (Juin 2013)



Version 3 (Juin 2014)

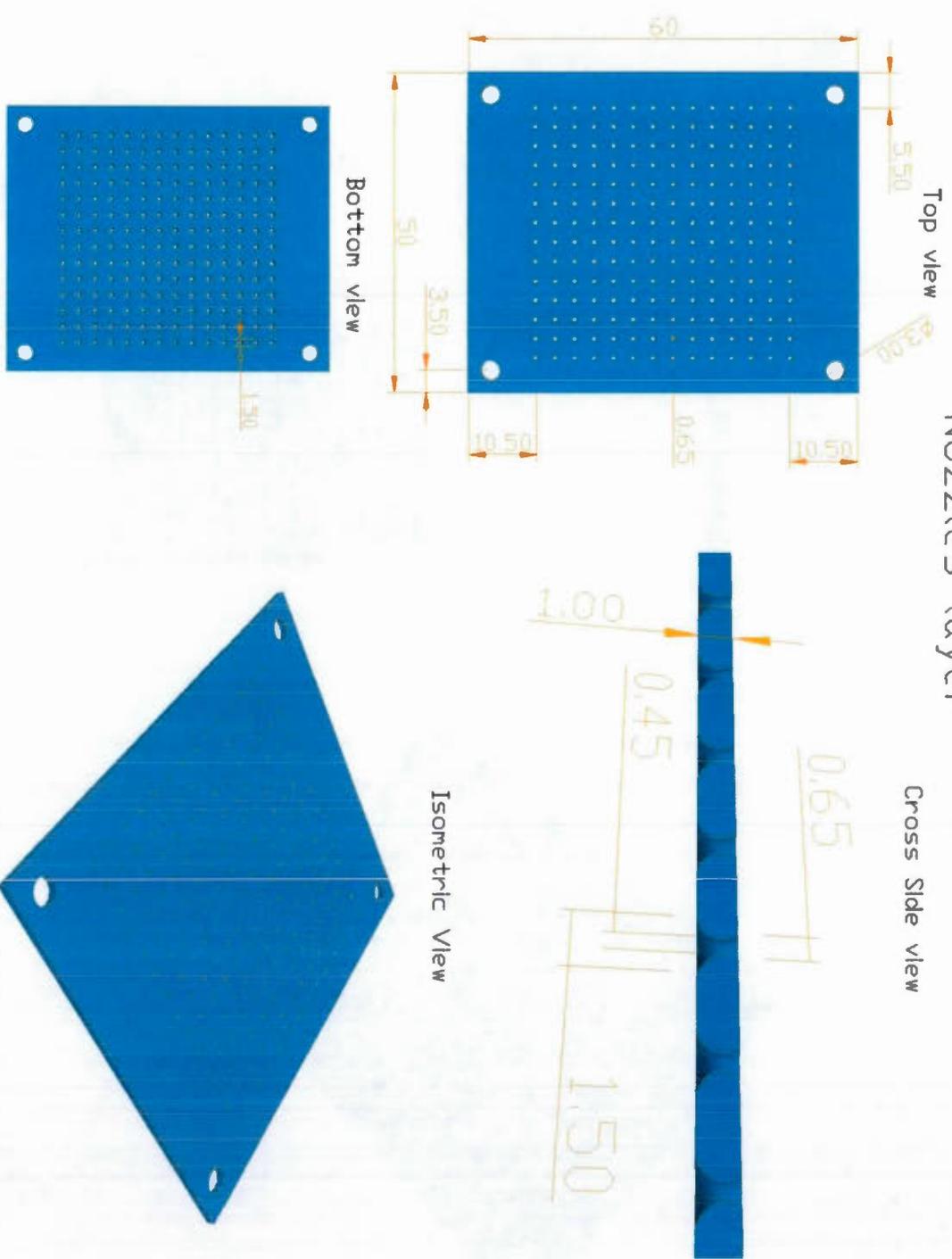
ANNEXE B

DESSINS TECHNIQUES DES CHAMBRES ET DES TUYÈRES



All dimensions are in millimeters

Nozzles layer



All dimensions are in millimeters

BIBLIOGRAPHIE

- Bayt, R.L., Ayon, A. et Breuer, K. (1997). A performance evaluation of MEMS-based micronozzles. *AIAA paper*(97-3169).
- Buchen, E.D., Dominic (2014, 30 September 2014). *2014 Nano / Microsatellite Market Assessment*. Atlanta, GA : SpaceWorks Enterprises, Inc. Récupéré de <http://www.sei.aero/eng/papers/uploads/archive/IAC-14.E6.1.3.pdf>
- Cheah, K.H. et Chin, J.K. (2011). Design and fabrication of micronozzles. *IIUM Engineering Journal*, 12(1), 51-62.
- Granier, J.J. et Pantoya, M.L. (2004). Laser ignition of nanocomposite thermites. *Combustion and Flame*, 138(4), 373-383. Récupéré de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010218004001373>
- Holand, W. et Beall, G.H. (2012). *Glass ceramic technology*. : John Wiley & Sons.
- Larangot, B., Conedera, V., Dubreuil, P., Do Conto, T. et Rossi, C. (2002). *Solid Propellant MicroThruster: an alternative propulsion device for nanosatellite*. Aerospace Energetic Equipment Conference (Avignon, France)
- Lee, J., Kim, K. et Kwon, S. (2010). Design, fabrication, and testing of MEMS solid propellant thruster array chip on glass wafer. *Sensors and Actuators A: Physical*, 157(1), 126-134.
- Lewis, D.H., Janson, S.W., Cohen, R.B. et Antonsson, E.K. (2000). Digital micropropulsion. *Sensors and Actuators A: Physical*, 80(2), 143-154.
- London, A., Ayon, A., Epstein, A., Spearing, S., Harrison, T., Peles, Y. et Kerrebrock, J. (2001). Microfabrication of a high pressure bipropellant rocket engine. *Sensors and Actuators A: Physical*, 92(1), 351-357.

Mueller, J., Hofer, R. et Ziemer, J. (2010). *Survey of propulsion technologies applicable to cubesats*. Pasadena, CA: National Aeronautics and Space Administration Récupéré de <http://hdl.handle.net/2014/41627>.

Mueller, J., Marrese, C., Wang, J. et Polk, J. (2000). Design and fabrication of a micro-ion engine. *AIAA Paper*, 3264, 16-19.

Petre, C.F., Chamberland, D., Ringuette, T., Ringuette, S., Paradis, S. et Stowe, R. (2014). Low-Power Laser Ignition Of Aluminum/Metal Oxide Nanothermites. *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*, 13(6).

Phipps, C. et Luke, J. (2002). Diode laser-driven microthrusters: a new departure for micropropulsion. *AIAA journal*, 40(2), 310-318.

Pignatelli, D. (2013). *CubeSat Design Specifications Rev. 13* : San Luis Obispo: California Polytechnic State University.

Platt, D. (2002). A monopropellant milli-Newton thruster system for attitude control of nanosatellites.

Rossi, C., Briand, D., Dumonteuil, M., Camps, T., Pham, P.Q. et De Rooij, N.F. (2006). Matrix of 10× 10 addressed solid propellant microthrusters: Review of the technologies. *Sensors and Actuators A: Physical*, 126(1), 241-252.

Rossi, C., Orioux, S., Larangot, B., Do Conto, T. et Esteve, D. (2002). Design, fabrication and modeling of solid propellant microrocket-application to micropropulsion. *Sensors and Actuators A: Physical*, 99(1), 125-133.

Rossi, C., Zhang, K., Esteve, D., Alphonse, P., Tailhades, P. et Vahlas, C. (2007). Nanoenergetic materials for MEMS: a review. *Microelectromechanical Systems, Journal of*, 16(4), 919-931.

- Roy, S., Majhi, T., Sinha, S., Sarkar, C.K., Saha, H. (2010). *Electro thermal analysis and fabrication of low cost microheater using a nickel alloy for low temperature MEMS based gas sensor application*. Industrial Electronics, Control & Robotics (IECR), 2010 International Conference on. : IEEE.
- Sathiyathan, K. (2011). *Solid Propellant Microthruster Design, Fabrication, and Testing for Nanosatellites*. York University, Canada. Master.
- Tanaka, S., Hosokawa, R., Tokudome, S.-i., Hori, K., Saito, H., Watanabe, M. et Esashi, M. (2003). MEMS-based solid propellant rocket array thruster. *Japan Society of Aeronautical Space Sciences Transactions*, 46, 47-51.
- Yen, N.H. et Wang, L.Y. (2012). Reactive metals in explosives. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 37(2), 143-155.
- Zhang, K.L., Chou, S.K. et Ang, S.S. (2004). Development of a solid propellant microthruster with chamber and nozzle etched on a wafer surface. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 14(6), 785-792.
- Zhang, K., Chou, S. et Ang, S.S. (2005). Development of a low-temperature co-fired ceramic solid propellant microthruster. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 15(5), 944.
- Zhang, K.L., Chou, S.K. et Ang, S.S. (2007). Fabrication, modeling and testing of a thin film Au/Ti microheater. *International Journal of Thermal Sciences*, 46(6), 580-588.