



Conception et intégration d'un micro-initiateur sécurisé sur silicium à base de micro-interrupteurs pyrotechniques

Pierre Pennarun

► To cite this version:

Pierre Pennarun. Conception et intégration d'un micro-initiateur sécurisé sur silicium à base de micro-interrupteurs pyrotechniques. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. INSA de Toulouse, 2006. Français. NNT: . tel-00126318

HAL Id: tel-00126318

<https://theses.hal.science/tel-00126318>

Submitted on 24 Jan 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Préparée au
Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS

En vue de l'obtention du
*Doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de
Toulouse*

Spécialité : *Conception des Circuits Microélectroniques et Microsystèmes*

Par
Pierre PENNARUN

Conception et intégration d'un micro-initiateur sécurisé
sur silicium à base de micro-interrupteurs pyrotechniques

Soutenue le 23 Octobre 2006 devant le jury :

Président	J.Y. FOURNIOLS
-----------	----------------

Directeurs de thèses	C. ROSSI D. ESTEVE
----------------------	-----------------------

Rapporteurs	P. PERDU L. BUCHAILLOT
-------------	---------------------------

Examineur	X. GRISON
-----------	-----------

Avant-propos

Ce mémoire présente mes travaux de recherche effectués au Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS au sein du groupe Microsystèmes et Intégration des Systèmes (MIS). Je remercie Mr Malik Ghallab, directeur du LAAS pendant les trois années qu'a duré ma thèse, ainsi que les directeurs successifs du groupe MIS, Anne-Marie Gue et Jean-Yves Fourniols pour m'avoir accueilli.

Je tiens d'ailleurs à remercier ce dernier pour avoir accepté d'être le président de mon jury de thèse et de s'être acquitté de cette tâche dans la bonne humeur. Mes remerciements vont aussi à tous les autres membres du Jury, qu'ils soient rapporteurs ou bien examinateurs : Mr Philippe Perdu, chercheur au CNES de Toulouse, Mr Lionel Buchaillot, Professeur à l'IEMN de Lille, ainsi que Mr Xavier Grison, ingénieur à la DGA (Délégation Générale de l'Armement) organisme qui a financé ces travaux de thèse. Merci à tous pour vos remarques pertinentes sur mes travaux ainsi que vos conseils sur mon prochain défi : la recherche d'emploi...

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à mes deux directeurs de thèse. D'une part, Carole Rossi, chargée de recherche au LAAS et responsable des activités de micropyrotechnie, pour son aide tout au long de ma thèse et sa disponibilité. Merci aussi à Daniel Estève qui a toujours était de bon conseil, générateur inépuisable d'idées (parfois un peu trop) et qui lors de nos discussions m'a poussé à toujours regarder plus loin... J'ai dû parfois cravacher pour arriver à les suivre dans leurs réflexions scientifiques mais le résultat a été payant, et pour cela je les en remercie.

Ces travaux n'auraient pu être menés à bien sans le concours du personnel TEAM dans son ensemble. Durant mes travaux en salle blanche, j'ai été amené à côtoyer certains d'entre eux plus que d'autres : V. Conédéra, M. Benoit, L. Mazenq, D. Bourrier, M. Dilhan, L. Salvagnac, S. Pinaud, P. Dubreuil, L. Bouscayrol, B. Rousset, P. F. Calmon, J-B Doucet, H. Granier, D. Colin, T. Do Conto, F. Carcenac, F. Rossel. Merci à vous pour vos compétences tout d'abord, la décontraction avec laquelle vous les exercez, ainsi que pour votre disponibilité devant mes nombreuses questions.

Je tiens à remercier Francis Bourrière et Clément Kaiser, de la société Novatec. Grâce à leur connaissance des solutions d'assemblage en électronique, ils ont été d'un grand secours et, dans ce sens, ont participé pleinement à la réussite de mon projet.

Durant ces trois années passées au LAAS, presque quatre en comptant mon stage de DEA, j'ai pu rencontrer des personnes, permanents, doctorants ou bien encore stagiaires. Je tiens à les remercier pour leur sympathie et leur soutien :

D. Guihal, E. Besson, M. Dumonteuil, A. Chaalane, P. Abgrall, R. Maurice, C. Escriba, S. Bonhomme, S. Charlot, H. Camon, A. Estève, A. Boukabache, G. Landa, J. Sudor, C. Vieu, T. Leichle, H. Lalo, T. Alava, C. Bordas, J.L. Fock Sui Too, A. Benazzi, R. De Maglie, J. Legal, C. Caramel, E. Havard, D. Peyrou, J. Launay, M. Saadaoui, W. Caid, H. Hachkar, A. Naoulou...

J'ai sûrement dû en oublier et je m'en excuse. Pour ceux qui en souffrent, je laisse donc un peu de place pour que vous complétiez vous-même...

-
-
-

Je tiens aussi à saluer les gens qui se sont succédés dans mon bureau, ma seconde maison lors de ces derniers mois de thèse: Gustavo, Juan-Carlos, Jorge, Hernan, Benoit, Hélène.

Merci aussi à mes voisins de pallier, du bureau 9B, permanents et squatteurs en tout genre et avec qui j'ai passé de très bons moments pas toujours très studieux mais toujours enrichissants : Cyril, Fabrice, Guillaume, Gabzzz, Habib, Mathieu, Polo, Floriane, Fabienne, Florence...Je pense continuer à prendre ma carte de membre bien après être parti.

Il y a une vie après le labo, et je remercie donc tous les «extérieurs» qui m'ont permis, au travers d'activités diverses, de déconnecter. Tout d'abord, les basketteurs et basketteuses de Cornebarrieu, une grande famille toujours prête à faire une troisième mi-temps. Un salut aussi à mes anciens camarades de l'INSA Toulouse qui ont fait, comme moi, le choix bizarre de faire une thèse : les futurs docteurs Nico, Vince, Manu, Pif, et Mathieu(bon courage à vous tous pour la dernière ligne droite) ainsi que les docteurs cuvée 2006, Florent et Ben. Pour ce dernier : bonne chance pour Barcelone ! Après 10 ans d'étude ensemble, il était temps que tu ne traînes plus dans mes pattes ! Je n'oublie pas non plus Nono qui lui est resté dans le droit chemin.

Un grand merci à mes amis de toujours qui, je l'espère, au travers de ce manuscrit vont enfin comprendre ce que j'ai fait durant ces trois ans : Fa, Marie-Jeanne, Ju, Flop, Gaby, Sim, Simon, Julie, Laurent auxquels j'ajouterai Aurélie et Peiman, les derniers arrivés. Pour votre information, non l'image d'introduction du chapitre 4 n'est pas une vue aérienne du stade de France...

Je ne saurais finir ce manuscrit sans remercier ma famille, et en particulier mes parents pour leur soutien inconditionnel, leurs conseils, ainsi que ma sœur Sophie, mon beau frère Jorge et Gabriel, le petit nouveau.

J'ai aussi une pensée affectueuse pour ceux qui ne sont plus là et à qui je dédie ce travail.

Table des matières

NOMENCLATURE	5
INTRODUCTION GENERALE	7
CHAPITRE 1: LES MICRO-AMORCES PYROTECHNIQUES : ETAT DE L'ART ET PROBLEMATIQUE	11
1. Introduction	12
2. Domaine d'application de la pyrotechnie	12
3. Etat de l'art des systèmes d'amorçage traditionnels	14
3.1. L'amorce pyrotechnique	14
3.2. Les constituants d'une amorce à usage militaire	15
3.2.1 Les initiateurs (détonateur et inflammateur)	16
3.2.2 Systèmes sécuritaires de l'amorce.....	16
3.2.3 Le module énergétique.....	18
3.2.4 La commande	18
3.2.5 Les capteurs	18
3.2.6 La charge pyrotechnique secondaire.....	19
3.3. Les différents types d'initiateurs à commande électrique	19
3.3.1 Les initiateurs faible énergie.....	20
3.3.2 Les initiateurs haute énergie	22
3.3.3 Les autres solutions développées	25
3.4. Les différentes solutions de sécurisation des initiateurs	26
3.4.1 Sécurité électrique	26
3.4.2 Sécurité mécanique : interruption de chaîne pyrotechnique.....	28
3.5. Résumé des solutions d'initiation et leur niveau de sécurité associé.....	28
3.6. Notre problématique.....	29
4. Conclusion.....	30
CHAPITRE 2: CONCEPTION D'UN MICRO-INITIATEUR PYROTECHNIQUE SECURISE SUR SILICIUM, PYROSECURE.....	33
1. Introduction	34
2. Présentation de l'architecture proposée.....	34
2.1. Spécifications générales du micro-initiateur	34
2.2. Détails des fonctions assurées par le micro-initiateur sécurisé	36
2.2.1 Fonction initiation	36
2.2.2 La mise en veille sécurisée	36
2.2.3 Fonction armement.....	37
2.2.4 Fonction désarmement	38
2.2.5 Fonction stérilisation.....	38
2.3. Architecture logique du microsystème d'initiation sécurisé	39
2.4. Nos choix technologiques.....	40

3. Conception de l'initiateur pyrotechnique sécurisé ou PYROSECURE.....	41
3.1. L'initiateur sur membrane diélectrique.....	41
3.2. Conception des interrupteurs.....	44
3.2.1 Etat de l'art des interrupteurs mécaniques existants.....	45
3.2.2 Notre proposition d'interrupteurs pyrotechniques.....	49
4. Conclusion.....	56

CHAPITRE 3: INTEGRATION DU MICRO-INITIATEUR SECURISE PYROSECURE SUR SILICIUM59

1. Introduction	60
2. Description du démonstrateur du micro-initiateur sécurisé PYROSECURE.....	61
2.1. Dimensionnement de l'initiateur pyrotechnique.....	61
2.1.1 L'élément résistif.....	61
2.1.2 Le matériau énergétique.....	63
2.2. Dimensionnement de l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique.....	63
2.3. Dimensionnement de l'interrupteur OFF-ON.....	67
2.4. Dimensionnement de PYROSECURE.....	74
3. Le procédé de fabrication du démonstrateur PYROSECURE.....	75
3.1. Les étapes micro technologiques.....	76
3.2. Les étapes d'assemblage.....	81
3.2.1 Le dépôt de la bille Sn/Pb.....	81
3.2.2 Le remplissage des cavités avec PAG/PA.....	82
4. Vérification dimensionnelle et évaluation des conséquences.....	85
4.1. Evaluation de l'épaisseur réelle des couches déposées.....	86
4.2. Effets des dispersions sur le rendement de fabrication et prédiction des défaillances.....	88
4.2.1 Epaisseur des couches de la membrane $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$	88
4.2.2 Valeur des résistances en polysilicium.....	89
4.2.3 Protection électrique de la couche d'oxyde.....	89
4.2.4 Epaisseur des pistes en cuivre.....	90
5. Bilan de fabrication et perspectives d'amélioration des procédés de fabrication	90
6. Conclusion.....	91

CHAPITRE 4: VALIDATION EXPERIMENTALE DES CONCEPTS PYROSECURE93

1. Introduction	94
2. Caractérisation de l'initiateur pyrotechnique	94
2.1. Description de l'expérimentation.....	95
2.2. Résultats obtenus et analyse.....	96
3. Caractérisation des interrupteurs ON-OFF pyrotechniques.....	97
3.1. Description des échantillons de test.....	98
3.2. Caractérisation de l'état initial ON.....	98
3.3. Performances de commutation de l'interrupteur.....	99
3.3.1 Description de l'expérimentation.....	99
3.3.2 Résultats et analyse.....	101
3.4. Caractérisation de l'état final OFF.....	101

4. Caractérisation de l'interrupteur OFF-ON	102
4.1. Description des échantillons tests.....	103
4.2. Caractérisation de l'état initial : état OFF.....	103
4.3. Performances de commutation de l'interrupteur	104
4.3.1 Description de l'expérimentation	104
4.3.2 Résultats et analyse	104
4.4. Caractérisation de l'état final ON.....	105
4.4.1 Vérification du contact formé entre Cu et Sn/Pb	106
4.4.2 Evaluation de la résistance de contact engendrée par la brasure.....	108
4.4.3 Tenue en courant	110
5. Vérification fonctionnelle du démonstrateur PYROSECURE	111
6. Conclusion.....	114
 CONCLUSION GENERALE.....	 117
 ANNEXES	 123
 ANNEXE 1 : ETUDE DE L'INTERRUPTEUR ON-OFF THERMIQUE, SOLUTION ALTERNATIVE A L'INTERRUPTEUR ON-OFF PYROTECHNIQUE.....	 125
 ANNEXE 2 : MASQUES UTILISES POUR LA REALISATION DU PROCEDE DE FABRICATION DU DEMONSTRATEUR PYROSECURE	 137
 ANNEXE 3 : SEQUENCES DE PHOTOS ILLUSTRANT LE FONCTIONNEMENT DES INTERRUPTEURS DEVELOPPES.....	 139
 ANNEXE 4 : PUBLICATIONS.....	 145
 BIBLIOGRAPHIE.....	 147

Nomenclature

DRIE	Deep Reactive Ion Etching
DSMF	Dispositif Sécurisé de Mise à Feu
DRAM	Dommage des Rayonnements sur les Armes et Munitions
EDI	Eau DésIonisée
ESD	ElectroStatic Discharge
EBW	Exploding Bridge Wire
EFI	Exploding Foil Initiator
IMU	Inertial Measurement Unit
LAAS	Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes
LPCVD	Low Pressure Chemical Vapor Deposition
MEMS	Micro ElectroMechanical System
MEB	Microscope Electronique à Balayage
MURAT	MUniton à Risque ATtenué
PETN	Pentaerythritoltetranitrate
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition
PAG/PA	PolyAzoture de Glycidyle / Perchlorate d'Ammonium
RIE	Reactive Ion Etching
RoHS	Reduction of Hazardous Substance
SCB	Semi-Conductor Bridge
STANAG	STANdard AGreement

Introduction générale

Les technologies microsysteme offrent la possibilité de réaliser des structures à faible coût de façon reproductible tout en ouvrant la voie d'une intégration conséquente et hétérogène. Nées à la fin des années 1980, ces technologies sont la suite logique des progrès réalisés en microélectronique silicium : les opérations traditionnelles d'oxydation, de diffusion, de dépôt de couches minces sont complétées par des opérations nouvelles de micro-usinage en volume et en surface du silicium. On peut donc, de manière compatible avec les circuits microélectronique limités aux opérations de traitement, réaliser des formes géométriques diverses pour obtenir des structure suspendues et mobiles: membranes, cavités, poutres. Ces structures vont pouvoir interagir avec l'environnement direct du système : recueillir une information dans les applications capteurs ou bien développer différents types d'actionnement. Ces modes d'actionnement ne sont pas forcément ceux utilisés à l'échelle macroscopique. Ils sont généralement destinés à des applications nouvelles et nécessitent le développement de nouveaux concepts. Répondant à ce besoin, en 1995, un concept innovant de micro-actionneur sur silicium utilisant l'énergie d'un matériau pyrotechnique a été proposé par le LAAS-CNRS pour une application médicale (administration de médicament) [1,2]. Les possibilités nouvelles offertes par ce type d'actionnement ont tout de suite paru intéressantes et de nombreuses autres applications ont été étudiées : microsource d'énergie [3], micropropulsion pour le maintien à poste de micro/nano satellites ou bien de microdrones [4,5], actionnement de fluide dans des canalisations pour la micro-fluidique [6]...La micropyrotechnie a créé un véritable engouement au niveau mondial que ce soit aux Etats-Unis avec l'université de Berkeley [7], Georgia Tech [8] et le Sandia National Laboratory [9], en Asie [10,11] ou bien encore en Europe avec l'IMT Neuchâtel [12]. Ces thématiques ont fondamentalement en facteur commun l'objectif de comprendre et maîtriser les mécanismes d'initiation à faible échelle. Cette maîtrise est effective à l'échelle millimétrique et les technologies microsystemes se présentent dorénavant comme une alternative intéressante aux technologies conventionnelles, par exemple, celles utilisés dans l'armement pour la réalisation d'initiateurs pyrotechnique. Cet intérêt pour utiliser les technologies microsystemes n'est pas simplement motivé par le fait de réduire les dimensions des systèmes d'initiation mais par la possibilité d'intégrer dans un volume réduit de l'intelligence dans un but le plus souvent sécuritaire. Une application potentielle d'initiation sans fil pour les armes de loisir a été ainsi

étudiée [13] qui permettrait de limiter l'usage de l'arme au seul propriétaire. Pour les systèmes d'arme militaire de type obus et missile, la sécurisation électronique est complétée d'une barrière mécanique mobile venant arrêter l'onde de choc en cas d'initiation parasite. Plusieurs recherches visant à adapter ces solutions aux microsystèmes ont été effectuées dans différents laboratoires [14,15] mais pose le problème de l'intégration micronique avec la réalisation de mouvement millimétrique. Notons aussi que la réduction d'échelle s'accompagne d'un niveau de déclenchement plus faible pour les micro-initiateurs, ce qui les rend plus sensibles à un déclenchement accidentel. Il convient donc de sécuriser la commande d'amorçage par une protection électrique innovante adaptée à la sensibilité des initiateurs à base de microsystèmes.

Notre travail s'inscrit donc dans cette démarche de sécurisation des systèmes d'initiation sur silicium. Il répond à des besoins exprimés par les applications militaires : l'initiateur doit être capable de dissiper 1W lorsqu'il est traversé par un courant de 1A sans s'initier et de résister à des décharges électrostatiques de l'ordre de 25kV [16]. Le niveau d'exigence requis par les applications militaires, permettra au système développé de répondre à toutes les autres spécifications propres aux applications civiles.

Nous voulons, au terme de ce travail, proposer un principe générique, miniaturisé, autonome, efficace et de faible coût pour pouvoir être introduit systématiquement.

Face à ces exigences générales, seule la voie de l'implémentation sur silicium, nous paraît pouvoir y répondre. L'ambition est de réussir l'intégration complète de l'initiateur, de son électronique de commande, de son système sécuritaire associé et éventuellement de certains capteurs ou interfaces (énergie, communication, calcul...) utiles aux exigences d'autonomie et d'automatisation de mise en oeuvre. Dans cette perspective, les travaux antérieurs aux miens, effectués au LAAS [1-6], ont permis la réalisation d'un initiateur sur membrane à effet Joule, qui peut servir de base à la construction de microsystèmes pyrotechniques plus complexes. Dans le cadre de cette thèse, à partir d'un initiateur sur membrane, on cherchera à définir une filière spécifique à la conception d'initiateurs sécurisés.

Nous nous proposons de concevoir et réaliser une intégration d'initiateurs sur membrane et d'interrupteurs ON-OFF et OFF-ON assurant une architecture de système répondant conceptuellement aux spécifications sécuritaires. Notre démarche impose de concevoir ces interrupteurs en recherchant des concepts et une technologie compatible avec la technologie de nos initiateurs à effet Joule sur membrane. Elle relève à la fois d'une démarche de conception descendante (spécification, modélisation logique) et d'une conception montante

(définition d'interrupteurs compatibles avec la technologie des initiateurs) ce qui complique un peu la présentation des résultats.

Cette thèse vise donc la conception d'un microsysteme totalement intégré d'initiation sécurisé. Notre objectif inclue un travail de validation de la faisabilité par la réalisation d'un démonstrateur.

Ce manuscrit de thèse s'organise en 4 chapitres qui présentent une synthèse des travaux qui ont été effectués, de notre positionnement par rapport à la problématique générale jusqu'aux premiers tests du démonstrateur réalisé.

*
* *

Dans le premier chapitre, nous effectuerons un tour d'horizon des différentes applications de la pyrotechnie en s'intéressant plus particulièrement aux applications militaires. Nous verrons que ces amorces sont des systèmes complets autonomes intégrant à la fois la fonction principale qui est l'initiation de matériau pyrotechnique, une commande, des capteurs mais aussi des systèmes de protection. L'initiation est bien sûr la fonction principale mais la sécurisation du système complet est primordiale. Les différents types d'initiateurs existants ainsi que les solutions sécuritaires qui existent actuellement seront donc développées plus amplement. Nous verrons en quoi la miniaturisation de ces systèmes pose un problème sécuritaire en terme de sensibilité de l'initiation: les normes militaires imposent de pouvoir passer 1A/1W pendant 5min [16] sans déclencher l'initiation. Nous introduirons enfin notre problématique de thèse qui est de concevoir et d'intégrer une architecture microsysteme de protection électrique autour de l'initiateur miniature.

Le chapitre 2 sera consacré à la conception de cette architecture de protection. Nous verrons que celle-ci consiste en un réseau d'interrupteurs qui, suivant leurs états, configurent le micro-initiateur dans différents états sécurisés. Les fonctions réalisées dans ces différentes configurations sont l'armement, le désarmement ainsi que la stérilisation, l'initiateur étant initialement sécurisé par un court circuit entre ses contacts. Après s'être positionné à l'échelle du système, nous présenterons les concepts des composants que nous nous proposons d'intégrer dans l'initiateur sécurisé: un micro-initiateur pyrotechnique basé sur les travaux de l'équipe micropyrotechnie du LAAS et des interrupteurs monocoups à actionnement pyrotechnique permettant de sectionner deux pistes ou bien de les connecter. Lors de la conception de ces interrupteurs, nous avons privilégié une filière pyrotechnique car d'une part les interrupteurs existants actuellement ne s'adaptaient pas aux contraintes de la réalisation

mais aussi pour être compatible et tirer profit de notre expérience dans les systèmes pyrotechniques.

Le chapitre 3 sera consacré à la réalisation du micro-initiateur sécurisé que nous appellerons PYROSECURE. Le chapitre sera divisé en deux parties : dimensionnement et fabrication. Concernant le dimensionnement nous étudierons chaque composant de manière individuelle et des résultats de simulations effectués pour les interrupteurs ON-OFF et OFF-ON intégrés au système seront donnés. La géométrie du démonstrateur PYROSECURE sera ensuite présentée. Nous verrons que l'intégration au sein d'un même substrat des différents composants est facilité par le choix d'une solution de système « tout pyrotechnique intégré » comprenant un initiateur mais aussi des interrupteurs assurant les fonctions logiques, basés sur des structures pyrotechniques. Le procédé de fabrication sera ensuite exposé. Il est basé sur des technologies classiques de microtechnologie et est réalisé avec seulement 4 masques, ce qui en fait un procédé peu coûteux et facile à maîtriser. La réalisation est sujette à des dispersions qui seront évaluées en vue de voir leurs influences sur le bon fonctionnement du système. Le démonstrateur réalisé durant cette thèse n'est bien sûr qu'une première réalisation visant surtout à valider la faisabilité conceptuelle et technologique. Des améliorations sont évidemment à apporter et nous en donnerons quelques pistes en fin de chapitre.

Le chapitre 4 sera consacré à la caractérisation du démonstrateur de micro-initiateur sécurisé : performances de l'initiation et évaluation du niveau de sécurité. Nous verrons que le niveau de sécurité du système peut être évalué par la connaissance des performances des interrupteurs. Une étude de leurs capacités d'interruption et de conduction du courant ainsi que de leurs caractéristiques d'actionnement sera donc effectuée. Nous verrons que les résultats sont conformes à nos attentes notamment au niveau de la qualité du contact ou de l'interruption, qui sont des paramètres fondamentaux dans l'architecture qui a été définie. Nous vérifierons que l'ensemble des fonctions du micro-initiateur sécurisé PYROSECURE qui ont été définies peuvent être réalisées. Lors de ces caractérisations nous nous sommes intéressés aux caractéristiques électriques mais comme nous le verrons à la fin du chapitre, il convient de pousser plus loin nos investigations notamment en ce qui concerne le vieillissement du système.

Chapitre 1

Les micro-amorces pyrotechniques : état de l'art et problématique



1. Introduction

L'objectif général de ce chapitre est d'introduire la problématique qui a motivé notre travail de recherche, à savoir la conception et la réalisation d'un micro-initiateur sécurisé. Pour ce faire, nous commencerons par présenter ce qu'est la pyrotechnie ainsi que ses domaines d'application. Traditionnellement associée aux applications militaires (armement) ainsi que spatiales (propulsion), nous verrons que la pyrotechnie se retrouve de plus en plus dans des applications liées à notre vie quotidienne. Dans toutes ces applications c'est l'énergie issue de la décomposition d'un matériau énergétique qui est utilisée. L'allumage de ce type de matériau se fait par l'intermédiaire d'un module appelé initiateur.

Dans les systèmes d'arme, l'initiateur est intégré avec d'autres fonctions pour constituer une amorce : fonction d'allumage, fonction de commande, capteur, ou bien encore fonctions sécuritaires... Nous considérerons plus particulièrement les solutions d'initiation existantes ainsi que les contraintes de sécurité de ce type de système, qui sont le cœur même de mon travail de thèse.

Nous verrons que les systèmes d'initiation tendent à se miniaturiser, mais que la miniaturisation et les contraintes énergétiques qu'elle engendre ne sont pas à priori compatibles avec les exigences sécuritaires. Cette problématique sera le point de départ des travaux de recherche effectués pendant ma thèse et visant à réaliser un micro-initiateur pyrotechnique alliant miniaturisation et sécurité.

Ainsi dans ce premier chapitre, après une présentation de la pyrotechnie et ses applications militaires, nous détaillerons le fonctionnement d'amorce pyrotechnique, nous exposerons la problématique liée à la miniaturisation et la sécurisation de micro-amorce dans le cadre d'applications militaires.

2. Domaine d'application de la pyrotechnie

Historiquement, la première utilisation de la pyrotechnie a été militaire : cartouches, obus, missiles....On utilise l'énergie pour produire une onde choc ou pour propulser. D'autres applications de propulsion sont illustrées dans le domaine spatial quand il s'agit de mettre en orbite des satellites ou réaliser des commandes en attitude...La disponibilité d'une grande énergie dans un petit volume est aussi très attractive pour des applications embarquées « monocoup » où la réduction de masse est une priorité : systèmes d'éjections des avions de chasse, systèmes de déploiement de panneaux solaires pour les satellites.

D'autres applications concernent les travaux publics (destruction de bâtiment, réalisation de tunnel...), forages divers, cartouches de chasse ainsi que feux d'artifice.

D'intéressantes recherches sont aussi en cours dans le génie biologique et médical pour l'administration de médicament [1]. Ces recherches confirment une tendance récente qui tend à intégrer la pyrotechnie dans notre vie quotidienne. Les applications les plus développées se situent dans la sécurité automobile : système d'airbag et prétensionneur de ceinture. Plus récemment, un système exclusif de capot explosif protégeant les piétons lors d'un choc frontal a été présenté par la marque automobile Jaguar au World Traffic Safety Symposium (WTSS) [2]. Ces systèmes pyrotechniques sont associés à des systèmes multi capteurs (température, accéléromètre, force) qui permettent de détecter l'instant de la collision et déclencher l'allumage. On tire alors profit de la grande réactivité des matériaux énergétiques : dans le cadre de l'airbag, le matériau choisi doit générer en quelques millisecondes un volume de gaz permettant de gonfler un coussin de plusieurs dizaines de litres.

L'intégration est permise grâce la miniaturisation de ces systèmes pyrotechniques. Elle a pour but de réduire à la fois la masse, le coût, les énergies de fonctionnement et d'améliorer la sécurité. Ces objectifs sont récurrents à tous les secteurs d'application: militaire, spatial, civil. De plus en plus, la sécurité est devenue un élément clé avec la miniaturisation : un déclenchement accidentel d'un système pyrotechnique, quelque soit sa taille, peut avoir des conséquences catastrophiques que l'on connaît bien. C'est d'autant plus vrai pour les systèmes d'amorçage d'équipement militaires, type obus, missile, ou bien propulseur, qui intègrent, en plus de l'amorce pyrotechnique, une charge secondaire qui est soit un explosif secondaire dans les missiles ou obus, soit un propergol dans les propulseurs. Pour les domaines d'application militaire, les systèmes d'amorçage pyrotechniques sont donc souvent associés à des fonctions de protection soit électriques, soit mécaniques. On parle alors de Dispositif Sécurisé de Mise à Feu (DSMF).

Dans ce contexte, les technologies MEMS peuvent, par leur capacité à miniaturiser et à intégrer sur un même support des fonctions électroniques sensibles et de calcul à côté de la fonction d'allumage pyrotechnique, ouvrir des perspectives extrêmement prometteuses pour les systèmes de mise à feu pyrotechniques sécurisées. Notre travail se situe dans cette perspective. Il s'insère dans le prolongement des travaux du LAAS en micropyrotechnie, qui après en avoir été l'instigateur, a participé activement au développement d'un grand nombre de concepts de pyroMEMS pour l'actionnement, la propulsion, l'amorçage... [3]

L'idée d'utiliser la décomposition de matériaux énergétiques pour réaliser des actionnements dans les microsystèmes a été initiée en 1995, par les travaux de thèse de Carole Rossi [4,5], pour répondre à une problématique d'actionnement de fluide pour l'injection de médicament. Depuis, des domaines d'applications divers ont été explorés par le LAAS ainsi que par d'autres équipes internationales, que ce soit en micro-propulsion [6-9], en actionnement de fluides [10], ou en réalisation de micro sources d'énergie [11-13].

La problématique de sécurisation des systèmes de mise à feu est un thème qui a été déjà abordé par le LAAS pour les applications civiles notamment (arme de chasse) [14][15]. L'objectif était de remplacer les percuteurs classiques par un système intégrant, dans moins de 1cm³, un initiateur de type fil chaud sur silicium avec une électronique de commande (protection par code, identification de l'utilisateur...) et un module de transfert d'énergie électrique sans contact.

3. Etat de l'art des systèmes d'amorçage traditionnels

Dans cette thèse, nous nous focalisons sur la sécurisation des systèmes de mise à feu ou d'amorçage militaire. Nous allons donc tout d'abord faire un état de l'art des systèmes d'amorçages actuellement utilisés pour les armes.

3.1. L'amorce pyrotechnique

On définit par amorce, le système qui, à partir d'une commande d'un opérateur ou bien sous l'effet d'événements extérieurs, va permettre de transmettre au matériau énergétique une énergie électrique ou mécanique pour l'initier. Par souci d'intégration et pour donner plus de souplesse à la commande, l'amorçage est la plupart du temps commandé électriquement. Mais des amorçages par percussion sont aussi possibles. De nos jours cette solution ne se retrouve que dans les munitions de petit calibre, intégrant seulement la fonction d'allumage du matériau pyrotechnique. Dans les systèmes de plus grandes dimensions et plus complexes (missile, propulseur...), l'amorce comprend, outre la fonction d'initiation du matériau énergétique, plusieurs fonctions ou modules permettant d'assurer l'autonomie énergétique, le traitement logique, la commande, la sécurité. Pour des raisons d'interactions entre toutes ces fonctions, il est évident qu'une commande électrique s'impose.

3.2. Les constituants d'une amorce à usage militaire

Pour bien comprendre la problématique de la thèse, il convient de bien appréhender la structure d'une amorce. Il existe de nombreuses amorces ayant chacune leurs géométries et tailles en fonction du système dans lequel elles sont embarquées. La Figure 1 donne plusieurs exemples d'amorce à usage militaire.



Figure 1. Exemples d'amorces (tirée d'une présentation de l'amorce FRAPPE par M. Perrin (TDA) au NDIA 49th Fuze conference).

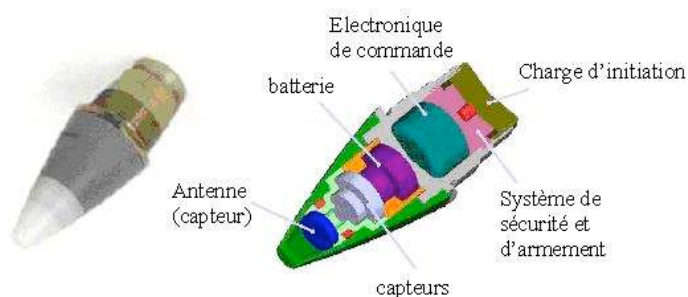


Figure 2. Photo et schéma d'une amorce : les principaux éléments d'une amorce sont positionnés (figure réalisée à partir d'une présentation de l'amorce FRAPPE par M. Perrin (TDA) au NDIA 49th Fuze conference).

La Figure 2 comportant une photo ainsi qu'un schéma de l'organisation des différents éléments de l'amorce va servir de support à la description qui va suivre. Cette structure est générale et donc susceptible d'être modifiée en fonction des besoins propres à chaque système.

3.2.1 Les initiateurs (détonateur et inflammateur)

L'initiateur assure la fonction principale du système à savoir l'allumage du matériau énergétique placé au contact de l'amorce ou à distance proche du matériau primaire.

Les matériaux primaires sont des matériaux pyrotechniques très sensibles. Leur sensibilité à diverses sollicitations fait qu'ils sont souvent utilisés en début de chaîne pyrotechnique, dans les initiateurs notamment. Comme déjà mentionné, l'initiation de la charge primaire de l'initiateur peut se faire de manière mécanique ou alors par commande électrique. Dans le cas d'une initiation mécanique, un percuteur vient fournir l'énergie nécessaire à l'initiation du matériau primaire. Sa mise en mouvement peut résulter de l'impact sur la cible de la munition (obus, roquette...). Ces initiateurs rustiques sont de plus en plus abandonnés au profit de systèmes électriques compatibles avec l'intégration de capteurs et de circuit électronique de commande.

Il faut noter que le terme détonateur est utilisé pour l'allumage de charges explosives et inflammateur dans le cas de charges propulsives. Pour des raisons de simplicité, seul le terme initiateur qui englobe les deux sera conservé dans la suite de la présentation.

3.2.2 Systèmes sécuritaires de l'amorce

De nombreux documents de normalisation militaire traitent de la sécurité des systèmes d'armes et plus spécifiquement, dans notre cas, des amorces. Le STANAG 4187 [16] expose les différents critères à prendre en compte lors de la conception d'une amorce. On peut les résumer en trois points :

- il faut que l'initiateur puisse supporter 1A/1W pendant 5 minutes sans initier la charge pyrotechnique
- Il faut aussi s'assurer que les phénomènes naturels de type décharges électrostatiques ou ondes électromagnétiques ne puisse pas entraîner l'initiation du matériau pyrotechnique de l'initiateur.
- Il est aussi préconisé de mettre en place des systèmes écrans qui protègent la charge pyrotechnique secondaire d'une initiation intempestive de la charge pyrotechnique de l'initiateur.

Les deux premiers éléments de sécurité sont inclus dans l'architecture de l'initiateur. Le troisième point fait l'objet d'un module particulier placé entre l'initiateur associé à sa composition pyrotechnique et la charge utile à laquelle l'amorce est fixée. En règle générale, il s'agit d'un système mécanique qui vient interrompre la chaîne pyrotechnique.

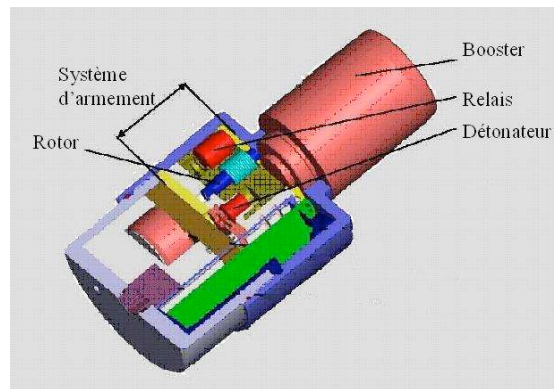


Figure 3. Schématisation d'un système de sécurisation par décalage de chaîne pyrotechnique : lors de l'armement le relais va pivoter autour du rotor pour s'aligner avec le détonateur et le booster (figure réalisée à partir d'une présentation de J. Wagner (JungHans Feinwerktechnik) au NDIA 49th Fuze conference).

Ce module sécuritaire doit assurer les fonctions d'armement et de désarmement de l'amorce. L'armement met l'amorce dans une configuration de fonctionnement tandis que le désarmement la remet dans une position sécurisée. L'armement consiste à aligner la chaîne pyrotechnique dans le cas d'une protection mécanique (cf Figure 3). Il est le plus souvent réalisé par événement extérieur propre aux conditions d'utilisation comme par exemple les forces d'accélération linéaires et angulaires qui apparaissent lors du lancement de la munition (obus, missile)(cf Figure 4).

Mais l'armement peut être aussi réalisé par un actionneur commandable intégré. Pour avoir un niveau de sécurité suffisant, l'actionneur est bloqué par un ou plusieurs loquets à commandes indépendantes.

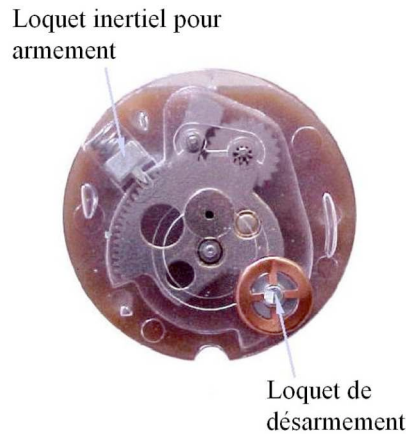


Figure 4. Mécanisme d'un système d'armement : le mécanisme est bloqué par un loquet inertiel, déplacé sous l'effet des forces d'accélération (figure issue d'une présentation de A. Buckley (Mauser Oerlikon) au NDIA 47th Fuze conference).

3.2.3 Le module énergétique

Pour être autonome énergétiquement, l'amorce intègre une batterie. Des accumulateurs sont aussi intégrés. Chargés avant l'initiation, ils permettent de fournir l'impulsion d'énergie nécessaire à l'initiation du matériau énergétique.

3.2.4 La commande

L'ensemble des données collectées sont transmises à un système de commande qui décide du déclenchement de divers mode de fonctionnement de l'amorce : blocage du fonctionnement lors d'une alerte, déclenchement de l'amorçage lorsque la cible est en vue et à la bonne distance...

3.2.5 Les capteurs

Avec l'avancée des technologies, des capteurs ont pu être intégrés aux amorces. Certains ont une fonction de renseignement sur l'état du système et s'assurent que les conditions de fonctionnement ou bien même de stockage de l'amorce sont adéquats. On trouve dans cette catégorie des capteurs de température, humidité, pression...

D'autres capteurs type accéléromètre ou bien gyroscope servent au guidage du système. En général ils sont intégrés au sein d'un même module appelé IMU (Inertial Measurement Unit). Il existe aussi des capteurs connectés à l'élément pyrotechnique permettent le suivi de la cible : capteurs infrarouge, système de radar.

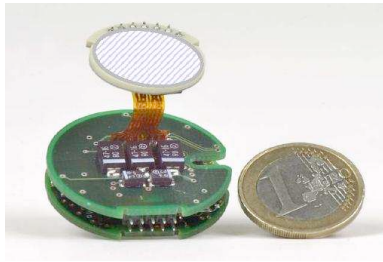


Figure 5. Exemple de capteurs intégrés dans une amorce : l'image représente un dispositif d'antenne radar que l'on peut retrouver dans le schéma descriptif de l'amorce (image issue de la présentation de l'amorce FRAPPE par M. Perrin (TDA) au NDIA 49th Fuze conference).

3.2.6 La charge pyrotechnique secondaire

Le rôle d'une amorce est de venir réaliser l'allumage d'une charge pyrotechnique secondaire. Cette charge peut être soit propulsive (propulseur) soit explosive (obus). On parlera dans ce dernier cas de charge explosive secondaire. Les explosifs secondaires sont utilisés pour des ondes de choc de grande amplitude. Les charges propulsives ne vont pas détoner mais brûler en dégageant une grande quantité de gaz. Elles sont particulièrement adaptées aux applications de propulsion. L'allumage de la charge pyrotechnique secondaire qu'elle soit propulsive ou explosive est réalisé en général par la décomposition de la charge primaire contenue dans l'initiateur.

L'utilisation de charges pyrotechniques intermédiaires (relais, booster....) est parfois nécessaire au vu de la faible sensibilité des charges secondaires à initier par l'amorce. Cette faible sensibilité aux diverses sollicitations extérieures est un atout en terme de sécurité. On parle de charge MURAT (Munition à Risques Atténués). L'intérêt est de s'assurer que l'initiation de la charge pyrotechnique secondaire à allumer au contact de l'amorce n'intervienne que lors du fonctionnement de l'initiateur.

3.3. Les différents types d'initiateurs à commande électrique

Dans ce paragraphe, nous traitons la partie initiateur : nous détaillons les différents modes d'initiation trouvés dans la littérature car c'est la partie qui fait l'objet de mon travail de thèse. Nous évaluerons, pour chacun d'entre eux, le niveau de sécurité par rapport aux normes 1A/1W/5min, leur capacité à tenir les décharges électrostatiques et à être miniaturisés.

Nous limitons cette présentation aux initiateurs à commande électrique car ils sont compatibles avec une électronique de commande. Plusieurs mécanismes d'initiation sont possibles, catégorisés suivant 2 critères principaux :

- type d'énergie initiale apportée au matériau pyrotechnique de l'initiateur (mécanique, thermique)

- type du matériau pyrotechnique (explosif ou autre)

On peut aussi les caractériser en fonction du niveau d'énergie d'initiation, critère que nous avons choisi de suivre.

3.3.1 Les initiateurs faible énergie

a. Initiateur à fil chaud

La solution d'initiation la plus simple à mettre en œuvre consiste à placer la charge primaire au contact d'un élément chauffant. C'est en général un fil conducteur (ou film déposé sur un substrat) parcouru par un courant électrique. Par effet Joule, le fil s'échauffe transmettant cette énergie thermique à la charge pyrotechnique. Cette solution technologique a été utilisée pour la première fois en 1822 par le Dr Robert Hare et perdure encore de nos jours [17].

L'initiateur à fil chaud nécessite quelques dizaines de mJ pour initier la composition primaire. Les temps d'initiation obtenus sont de l'ordre de la milliseconde. Bien sûr les performances précises de ce type d'initiateur dépendent de la composition pyrotechnique à initier mais aussi de la géométrie de l'élément chauffant. L'avantage majeur de l'initiateur à fil chaud est la simplicité de sa mise en œuvre. Cependant les faibles énergies d'initiation requises, font que la sécurisation de ces systèmes est un problème majeur.

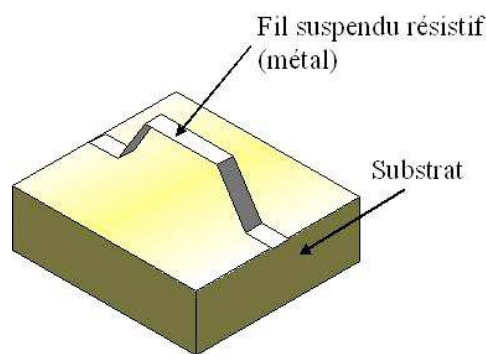


Figure 6. Composition d'un initiateur de type « fil chaud » (la charge pyrotechnique n'est pas représentée). L'élément résistif est suspendu au dessus du substrat.

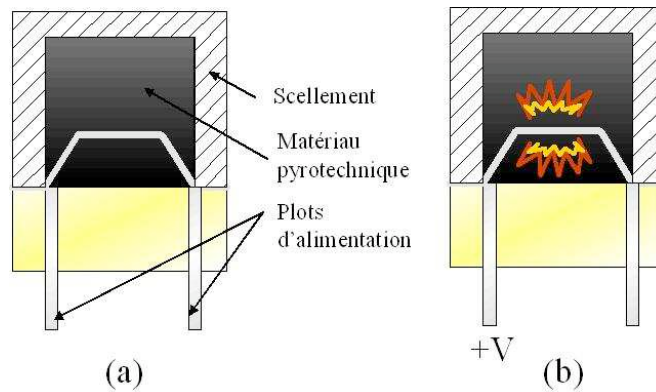


Figure 7. Principe de fonctionnement d'un initiateur « fil chaud » : le fil résistif est entouré par le matériau pyrotechnique (a) et lors de l'alimentation, son échauffement va provoquer l'initiation du matériau pyrotechnique (b).

b. Initiateur de type « Semi-Conductor Bridge » (SCB)

L'initiateur de type SCB est un concept plus récent développé au Sandia Laboratory [18] en 1987. Il consiste en un film semi-conducteur fortement dopé déposé sur un substrat isolant (quartz) ou sur membrane. Une décharge électrique dans le film semi-conducteur fortement dopé le vaporise. Le plasma créé entre les deux contacts initie le matériau pyrotechnique au contact. Tous les types de matériaux pyrotechniques peuvent être initiés : propergols, primaires et secondaires bien que seuls les SCB à explosifs sont commercialisés.

Les performances de ce type d'initiateur sont fortement liées à sa géométrie : les courants d'initiation peuvent atteindre plusieurs ampères en fonction de la géométrie limitant plus ou moins les pertes thermiques. Leurs dimensions réduites leur permettent toutefois de s'échauffer rapidement et d'avoir des temps d'initiation de seulement quelques dizaines de μs , ce qui permet d'obtenir des énergies de fonctionnement très réduites (quelques mJ).

Les avantages du SCB sont les temps et les énergies d'initiation très faibles. De plus, le système est simple et totalement intégrable en technologies MEMS ce qui ouvre la porte à la miniaturisation et les niveaux de courant sont plus élevés que ceux des initiateurs à fil chaud ce qui les rendent moins sensibles aux perturbations extérieures. La faible énergie d'initiation ne constitue pas dans ce sens un handicap comme dans les initiateurs à fil chaud. En effet, le dépôt du pont semi-conducteur directement sur le substrat favorise les pertes thermiques et permet d'augmenter le niveau de courant maximal admissible sans risquer d'initiation intempestive [19].

Cependant les initiateurs de type SCB souffrent des fortes tensions nécessaires à la délivrance d'un pic d'énergie pour l'initiation qui rend l'architecture du circuit de commande complexe

et volumineuse. Ainsi, bien qu'issu des technologies microsysteme, l'électronique environnante fait que la miniaturisation du système complet est difficile.

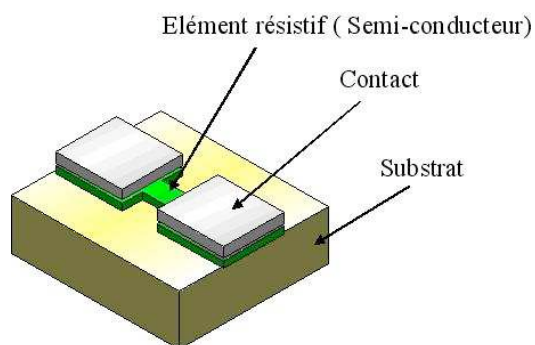


Figure 8. Composition d'un initiateur de type SCB (la charge pyrotechnique n'est pas représentée). L'élément résistif est la zone semi-conductrice déposée sur le substrat

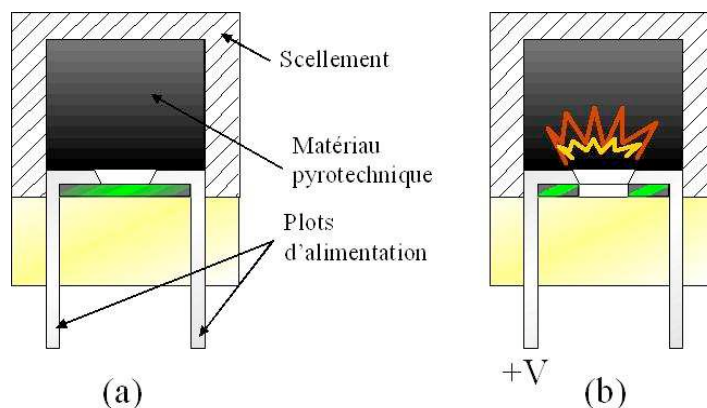


Figure 9. Principe de fonctionnement d'un initiateur SCB : le matériau est placé sur l'élément résistif (a). Lors de l'alimentation, l'élément résistif se vaporise, créant un plasma, chauffé par le passage du courant et qui vient initier le matériau pyrotechnique (b).

3.3.2 Les initiateurs haute énergie

Les technologies d'initiation qui sont présentées dans la section qui suit visent à réduire les problèmes d'initiation intempestifs en exigeant des seuils de déclenchement électriques élevés.

a. Initiateur à fil explosif ou EBW (Exploding Bridge Wire)

La géométrie d'un EBW est très proche de celle des détonateurs à fil chaud comme le montre la Figure 10. La différence intervient principalement au niveau de l'apport de l'énergie. Dans le cas d'un EBW un très fort courant est appliqué pendant un temps très bref (approximativement 1000A/μs), ce qui vaporise le fil ou le film conducteur. La vaporisation

apparaît sous la forme d'un dégagement d'énergie thermique associée à une onde de choc ce qui initie la charge pyrotechnique de l'initiateur. Les temps d'initiation sont de l'ordre de la microseconde avec des énergies consommées généralement de l'ordre de 2J. Ces initiateurs ont été développés dans les années 40 pour le développement d'arme nucléaires [20].

Ils ont un double avantage : outre les hauts niveaux de courants qui les préservent des déclenchements parasites (électromagnétique, électrostatique), la forte énergie issue de la vaporisation du fil conducteur permet d'initier directement des charges secondaires beaucoup plus stables que les charges primaires, ce qui va aussi dans le sens de la sécurité. Cependant les forts courants et les fortes puissances requises pour l'initiation (plus de 200A et 200kW) ne sont pas compatibles avec la miniaturisation et l'intégration : problème d'architecture, problème d'alimentation (en terme de source et de transfert vers l'initiateur), capacités importantes...

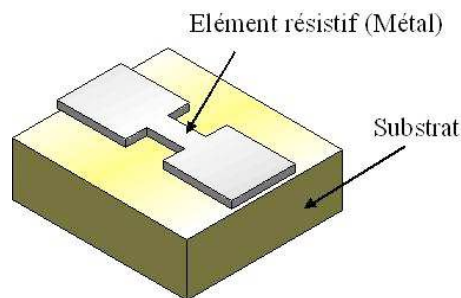


Figure 10. Composition d'un initiateur de type « fil explosif » (EBW) (la charge pyrotechnique n'est pas représentée). L'élément résistif est la zone en métal plus étroite déposée, dans l'illustration, directement sur le substrat.

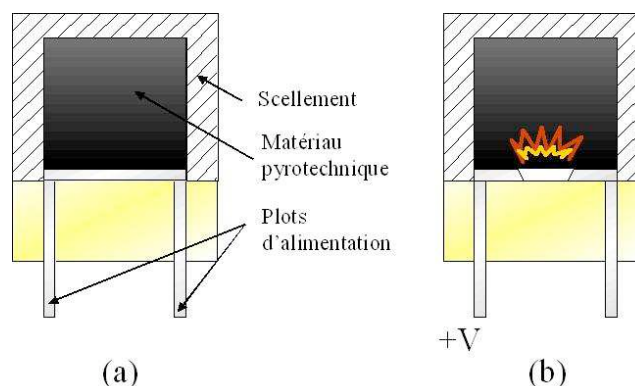


Figure 11. Principe de fonctionnement d'un initiateur « fil explosif » : le matériau est placé sur l'élément résistif (a). Lors de l'alimentation, l'élément résistif se vaporise en créant une onde de choc qui vient initier le matériau pyrotechnique (b).

b. Initiateurs de type Slapper ou EFI (Exploding Foil Initiator)

C'est une variante américaine du « fil explosif ». Il est le résultat de recherches initiées en 1976 par le Lawrence Livermore Laboratory [21] et tend à s'imposer aujourd'hui dans les équipements militaires.

L'onde de choc créée par la vaporisation du fil n'est plus utilisée pour initier la charge pyrotechnique mais pour projeter un disque diélectrique (mylar, kapton) à travers un trou au fond duquel se trouve la charge à initier. C'est l'impact de ce disque appelé slapper ou flyer qui fournit l'énergie nécessaire à l'initiation d'une charge primaire ou bien, comme pour le fil explosif, secondaire.

Le transfert d'énergie se fait sur toute la surface du disque qui a un diamètre de l'ordre du millimètre contrairement aux détonateurs de type EBW dans lequel il est beaucoup plus ponctuel. Or, une initiation de qualité nécessite d'amener un volume minimum d'explosif à la température et à la pression à laquelle l'initiation se fait. L'augmentation de la surface d'échange va permettre d'atteindre plus facilement ces conditions et ceci, pour des énergies plus faibles. Ce choix d'initiation par impact permet d'initier des charges pyrotechniques encore moins sensibles que celles initiées par le fil explosif. Notons qu'il n'y a aucun contact physique entre les parties conductrices et la charge à initier, ce qui renforce la sécurité.

Toutefois comme pour l'initiateur à fil explosif, les forts courants d'initiation nécessitent une architecture particulière qui fait obstacle à la miniaturisation. Sa structure est aussi plus complexe qu'un simple initiateur à fil chaud.

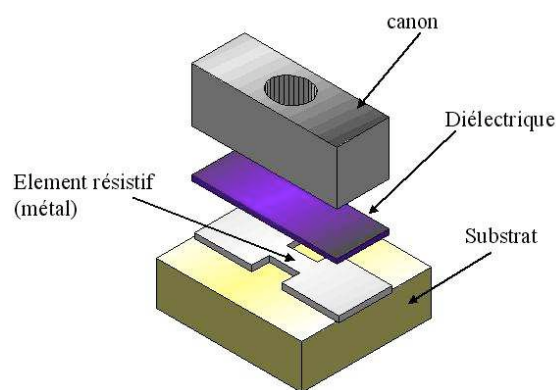


Figure 12. Composition d'un initiateur de type slapper (la charge pyrotechnique n'est pas représentée). L'élément résistif est la zone en métal plus étroite déposée directement sur le substrat.

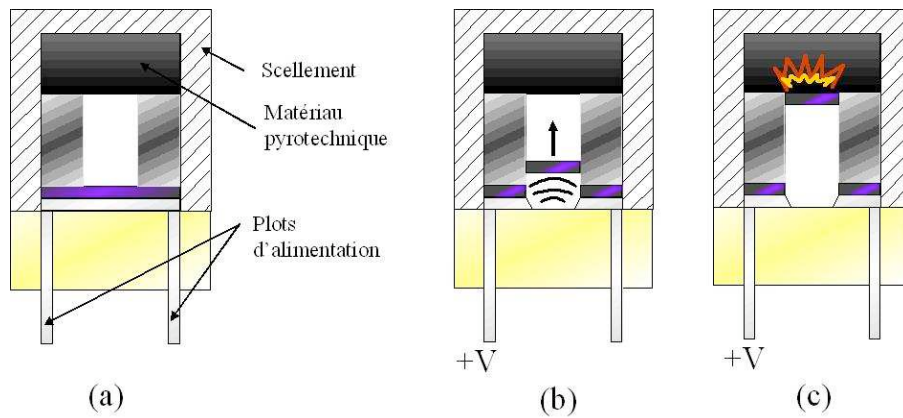


Figure 13. Principe de fonctionnement d'un initiateur slapper : l'élément résistif et le matériau sont séparé par un diélectrique (mylar, kapton...) ainsi qu'une canon (a). Lors de l'alimentation, l'élément résistif se vaporise en créant une onde de choc qui vient découper le diélectrique suivant la géométrie du canon (b). Ce morceau de diélectrique (flyer) est accéléré dans le canon et vient percuter le matériau pyrotechnique qui s'initie (c).

3.3.3 Les autres solutions développées

D'autres solutions d'initiation plus marginales existent :

- L'amorçage opto-pyrotechnique par laser a fortement bénéficié du développement des technologies diode laser. Dans ce type d'initiateur le faisceau laser est guidé par fibre optique jusqu'à la charge pyrotechnique pour provoquer son échauffement jusqu'à sa température d'initiation. Les principaux avantages d'une initiation optique est le non contact entre la source émettrice de chaleur et le matériau pyrotechnique permettant alors de décaler la fibre optique pour éviter toute initiation, ou bien encore leur insensibilité aux phénomènes d'induction électromagnétiques et électrostatiques (ESD). La principale application des systèmes optiques est l'allumage des moteurs de roquettes.
- Une autre solution consiste à utiliser un matériau pyrotechnique et à provoquer directement son échauffement par passage d'un courant. L'énergie d'initiation est faible (de l'ordre du μJ) ce qui en fait un système fortement sensible à tous les phénomènes parasites. De plus la résistance du matériau pyrotechnique varie grandement en fonction des conditions de préparation (densité, homogénéité...) ce qui influe sur ses performances. Cette solution n'est donc pas recommandée par les documents de normalisation militaire.
- On peut aussi remplacer les fils métalliques des systèmes à fil chaud par un fil conducteur en carbone (graphite). C'est un système fiable mais ayant des niveaux de déclenchement très bas ($0.1\mu\text{J}$) adaptés aux systèmes ayant une alimentation de faible

puissance. Cette sensibilité n'est pas un gage de sécurité et les documents de normalisation militaire ne conseillent pas son utilisation.

- La charge pyrotechnique peut être initiée en créant un arc électrique entre deux contacts séparés. Bien que ce soit la première forme existante de détonateur électro-explosif, nous n'avons pas retrouvé trace d'applications récentes utilisant ce type de système.

3.4. Les différentes solutions de sécurisation des initiateurs

Comme il l'a été évoqué tout au long de ce chapitre la sécurité des systèmes d'armement est avec leurs performances, un point essentiel à prendre en compte. Nous avons vu lors de la description des éléments constituant d'une amorce qu'un module spécifique était dédié à la sécurité. Toutefois chaque initiateur doit aussi de manière individuelle répondre à des exigences sécuritaires de protection électrique.

3.4.1 Sécurité électrique

La commande électrique des initiateurs les rend potentiellement sensibles aux agressions électriques de type électrostatique, coup de foudre, impulsion électromagnétique, rayonnement émis par des émetteurs radio ou radar appelé aussi effet DRAM¹. Différents critères sont mis en place pour s'assurer que les initiateurs ne présentent aucun danger.

Les initiateurs doivent notamment pouvoir supporter au moins 1A/1W pendant 5 min sans entraîner l'initiation du matériau pyrotechnique. Il convient aussi de vérifier la tenue du système aux décharges électriques de type corps humain (25kV) [16]. Ces tests sont particulièrement contraignants pour les initiateurs faible énergie, qui s'échauffent très rapidement.

Deux solutions technologiques sont suivies :

- La première consiste à placer l'élément chauffant dans un environnement dissipateur thermique. Pour les initiateurs à fil chaud où le matériau pyrotechnique entoure complètement le fil, les pertes thermiques seront favorisées en utilisant des supports de fil fortement conducteur thermique ou bien en augmentant le diamètre des fils. On peut aussi utiliser une charge primaire conductrice thermique pour évacuer la chaleur. Dans le cas du SCB, c'est le substrat sur lequel est déposé l'élément chauffant qui sert de dissipateur thermique. Lors de la conception on peut dans ce cas favoriser les pertes thermiques en augmentant les surfaces en contact.

¹ DRAM : Dommages des Rayonnements sur les Armes et Munitions.

- La seconde consiste à réduire l'échauffement potentiellement créé par un courant parasite en minimisant la résistance électrique des éléments chauffants. Un compromis entre sécurité et performance (faible courant d'initiation et donc forte résistance) a été trouvé autour de 1ohm [22]. Un ohm permet en effet de dégager 1W lorsque l'élément chauffant est traversé par un courant de 1A et donc de satisfaire au minimum requis par la norme.

La conception de l'initiateur est donc faite dans un souci de sécurisation qui se traduit par une augmentation du seuil de déclenchement. Toutefois, ces précautions ne sont pas toujours considérées comme suffisantes et nécessitent parfois l'ajout de protections électriques complémentaires. Elles prennent la forme de circuits placés en parallèle de l'initiateur. La solution la plus simple consiste à relier les deux contacts de l'initiateur par un fil conducteur reliant ses deux contacts. Cette solution est particulièrement utilisée lors du stockage. Le court circuit peut être retiré manuellement avant lancement, mais dans ce cas le système se retrouve susceptible d'être déclenché avant son opération. Des solutions ont donc été proposées, pour retirer ce court circuit peu de temps avant l'amorçage, sous l'effet par exemple d'événements extérieurs : pression de l'eau dans le cas d'amorce sous-marine [23], ou bien encore force d'inertie apparaissant lors de l'impact ou du lancement [24]. Il est aussi possible d'avoir un court circuit commandable [25], à condition que la commande soit elle-même suffisamment sécurisée.

Une autre solution consiste à avoir un circuit parallèle consistant en une diode Zener, dont le seuil de déclenchement sera choisi égal au seuil de déclenchement de l'initiateur [26,27]. Ainsi pour des décharges électrostatiques supérieures au seuil de déclenchement de l'initiateur, et risquant donc de déclencher l'amorçage, la diode est passante et évacue le courant parasite vers la masse. Par contre pour des perturbations inférieures ou égales au seuil de fonctionnement de la diode, celle-ci est bloquée et le courant traverse l'initiateur. Ce type de solution suppose que toutes les perturbations de niveau inférieur au seuil de déclenchement de l'initiateur sont sans effet. Or généralement les initiateurs pyrotechniques sont caractérisés par deux seuils : un seuil non-feu, en dessous duquel l'initiation est impossible et un seuil de mise à feu au-dessus duquel l'initiation est réalisée de manière très fiable. Entre ces deux seuils le fonctionnement est beaucoup plus aléatoire, ce qui constitue une limitation pour la sécurisation par diode zener

3.4.2 Sécurité mécanique : interruption de chaîne pyrotechnique

L'interruption de chaîne pyrotechnique est obligatoire dès que des charges primaires [16] sont utilisées, c'est-à-dire pour tous les initiateurs faible énergie. Comme décrit précédemment cette interruption consiste en une ou plusieurs barrières isolant la charge primaire du reste de la chaîne, pour mettre le système complet dans un état sécurisé.

L'actionnement peut être commandé électriquement ou bien sous l'effet d'événements extérieurs liés au fonctionnement normal de l'amorce, comme les forces d'accélération lors du lancement de la charge ou dans le cas d'un système intégrant un module de propulsion (missile, roquette) les gaz de propulsion.

La position sécurisée des amorces peut être verrouillée par plusieurs loquets à actionnement indépendant, assurant alors qu'un phénomène qui en déverrouille accidentellement un, n'ait pas d'influence sur les autres.

3.5. Résumé des solutions d'initiation et leur niveau de sécurité associé

Nous venons de présenter les principales solutions d'initiation, classées en deux catégories : initiateurs à faible et à haut seuil de déclenchement. Nous avons vu que l'initiation par fil chaud est la plus simple à mettre en œuvre et permet d'initier des charges pyrotechniques avec des énergies réduites. Toutefois ce type de système requiert une attention particulière en ce qui concerne sa sécurisation, en particulier en intégrant divers éléments de protection. Au contraire les initiateurs forte énergie nécessitent de forts courants qui permettent d'initier directement une charge secondaire, ce qui les rend intrinsèquement plus sécurisés. Ils induisent néanmoins des contraintes supplémentaires en terme contrôle de l'alimentation.

Les initiateurs de type SCB sont des initiateurs à faible énergie. Ils ont toutefois des caractéristiques communes avec les initiateurs haute énergie : architecture d'alimentation contraignante, niveau de courant donc de sécurité élevé.

Le Tableau 1 résume les avantages et les inconvénients des initiateurs présentés dans le paragraphe 3.3.

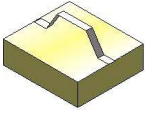
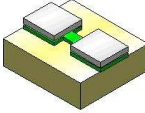
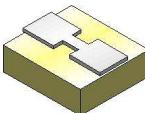
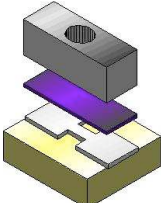
Type d'initiateur	Catégorie	Schéma	Avantages	Inconvénients
Fil chaud	Faible énergie		- Energie d'initiation faible - Facilité de mise en œuvre - Compatibles MEMS	- Sensibilité (protection électrique et mécanique nécessaire) - Initiation de matériau primaire seulement
SCB	Faible énergie		- Energie d'initiation faible - Réalisation en technologie MEMS - Courant de non-feu assez élevé	- Tensions de commande élevées nécessitant une architecture d'alimentation complexe limitant l'intégration
Fil explosif	Haute énergie		- Peu sensible - Initiation directe de secondaire	- Energie d'initiation élevée - Hautes tensions et courants nécessitant une architecture d'alimentation spécifique
Slapper	Haute énergie		- Peu sensible - Initiation directe de secondaire - Initiation par impact	- Energie d'initiation élevée - Hautes tensions et courants nécessitant une architecture d'alimentation spécifique - Structure complexe

Tableau 1. Résumé des performances des solutions d'initiation classique.

3.6. Notre problématique

Dans cet état de l'art, on perçoit aisément la difficulté qui se pose au concepteur d'amorce :

- d'un côté la tendance à la miniaturisation et la pénétration croissante des technologies et composants MEMS (capteur, SCB, électronique...) dans les systèmes d'amorçage fixent des objectifs d'intégration de plus en plus poussés et des contraintes d'énergie de plus en plus minimale. Typiquement un système sur puce ne peut dissiper que quelques W/cm^3 .
- D'un autre côté, les exigences de sécurité des systèmes d'amorçage pyrotechniques restent très élevées et sont difficilement atteintes avec des systèmes miniaturisés à faible énergie qui fonctionnent dans des environnements électromagnétiques de plus en plus agressifs.

La problématique qui s'est donc posée à nous au début de la thèse est la conception et la réalisation d'un micro initiateur sécurisé qui réponde au critère non feu 1A/1W pendant

5min et qui soit compatible avec les contraintes liées aux technologies microsystemes : faible consommation, intégrable avec de l'électronique, miniaturisable.

Cette problématique s'est posée aussi à d'autres équipes. La solution adoptée par les américains qui semble s'imposer est d'augmenter les niveaux d'initiation (énergie, courant) en initiant des secondaires (slapper) ce qui conduit à des systèmes difficilement miniaturisables et non compatibles avec les contraintes microsystemes du fait des contraintes sur l'alimentation. D'autres équipes, américaines et anglaises [28,29], proposent des systèmes de désalignement de chaîne pyrotechnique en technologie microsysteme. Elles sont basées sur le déplacement dans le plan d'une plaque écran qui est difficilement réalisable à échelle réduite du fait des phénomènes de collage intervenant et nécessitant des actionneurs puissants et encombrants. Ces solutions ne nous paraissent pas répondre pleinement aux contraintes militaires.

Nous proposons donc une architecture innovante basée sur l'intégration d'interrupteurs autour d'un initiateur qui répond aux contraintes liées à la miniaturisation (faible énergie d'initiation, fabrication compatible avec l'électronique) tout en garantissant un niveau de sécurité conforme à la norme 1A/1W/5min [16]. Cette architecture est une première étape vers la réalisation d'une micro-amorce complète intégrant outre l'initiateur et ses protections électriques, qui sont ma contribution, les autres constituants d'une amorce classique: système de protection mécanique, commande, capteur, source d'énergie.

4. Conclusion

Après avoir brièvement présenté les domaines d'application de la pyrotechnie, nous avons décrit les systèmes d'amorçages de charges pyrotechniques. Dans les systèmes d'armement, l'amorce est un système complexe intégrant, outre la fonction initiation, des fonctions de commande, de capteur, de gestion de l'énergie ainsi que de sécurité. La sécurité est primordiale dans les systèmes d'amorçage et peut être traitée par des protections mécaniques et des protections électriques. La protection électrique est pensée au stade de la conception des initiateurs, en favorisant les pertes thermiques, pour définir volontairement des seuils de déclenchement élevés pas toujours compatibles avec la miniaturisation. Les différentes solutions d'initiation à commande électrique ont été présentées dans ce chapitre :

- Les initiateurs à faible énergie sont compatibles avec les contraintes de miniaturisation mais sont sensibles aux perturbations ce qui implique l'utilisation d'une protection mécanique de désalignement de chaîne.

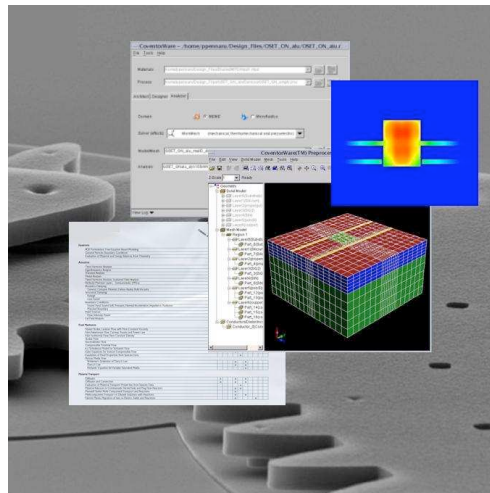
- Les initiateurs à haute énergie (slapper notamment) sont sécurisés par conception mais les contraintes d'alimentation sont un frein à la miniaturisation du système d'amorçage complet.

Ces approches ne nous paraissent pas correspondre aux besoins actuels de miniaturisation et de réduction des coûts. Nous nous proposons donc de réaliser un système d'initiation original miniaturisé qui assure un niveau de sécurité optimal contre les perturbations de type électrique et ce jusqu'au déclenchement de l'initiateur.

Dans le chapitre 2, nous présenterons l'architecture de ce micro-initiateur sécurisé ainsi que les spécifications auxquelles le système devra se soumettre. La conception du micro-initiateur et des éléments le sécurisant sera détaillée.

Chapitre 2

Conception d'un micro-initiateur pyrotechnique sécurisé sur silicium, PYROSECURE



1. Introduction

Nous avons vu dans le chapitre 1, que les systèmes d'amorçage militaires ont des exigences sécuritaires qui ne sont pas toujours compatibles avec les contraintes liées à la miniaturisation. Nous avons mené une réflexion en vue de répondre à cette problématique et une solution de principe a été proposée qui permettrait d'assurer à l'initiateur miniaturisé un niveau de sécurité identique à celui des initiateurs conventionnels. L'objectif du second chapitre sera donc de décrire cette architecture autant du point de vue de ses fonctionnalités que du point de vue des composants qui y sont intégrés.

Dans un premier temps, nous expliciterons les spécifications auxquelles le système doit répondre et en particulier les fonctions à assurer. Nous verrons ainsi que le système dans son ensemble peut être assimilé à un réseau d'interrupteurs intégrés autour de l'initiateur, les interrupteurs assurant les reconfigurations du système dans les différents niveaux sécurisés. L'expertise du LAAS en terme de microtechnologies et notamment sa maîtrise des phénomènes d'initiation à l'échelle millimétrique ainsi que la capacité d'intégration que les microtechnologies offrent, nous ont conduit à choisir cette filière.

La suite du chapitre sera consacrée à l'exposé des concepts retenus pour l'initiateur et pour les interrupteurs. Par souci de compatibilité avec l'initiateur pyrotechnique, nous avons cherché à développer des interrupteurs pouvant tirer profit de l'utilisation de matériau pyrotechnique pour :

- sectionner une piste pour réaliser une commutation ON-OFF,
- connecter deux pistes pour réaliser une commutation OFF-ON.

Nous verrons que les concepts exposés présentent des avantages certains par rapport aux micro-interrupteurs connus et que le caractère monocoup inhérent aux systèmes à base de matériau pyrotechnique ne constitue pas une limitation dans le cadre de cette application.

2. Présentation de l'architecture proposée

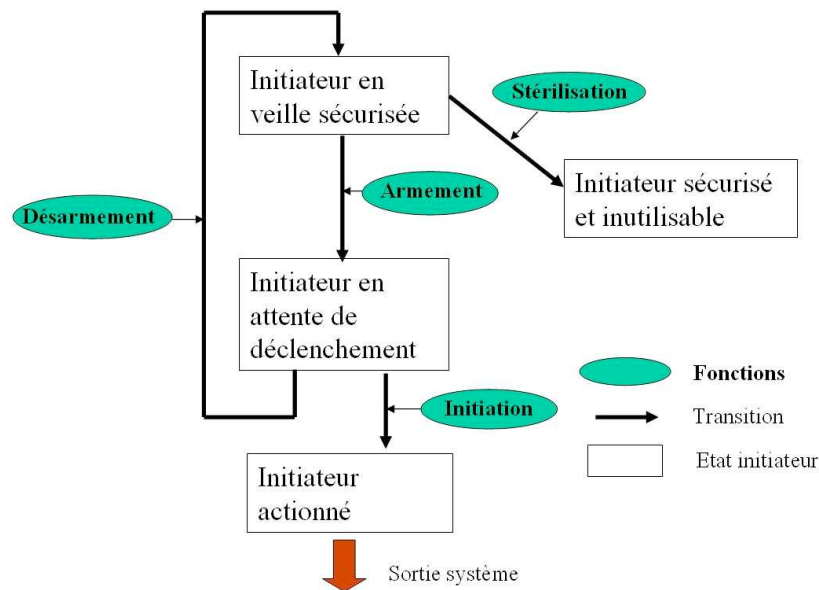
2.1. Spécifications générales du micro-initiateur

L'objectif du projet est de concevoir un micro-initiateur sur silicium à faible niveau de déclenchement tirant pleinement profit des technologies microsystèmes et de leur capacité à miniaturiser et à intégrer des éléments de protection électronique pour

assurer un niveau de sécurité équivalent ou supérieur à celui des initiateurs classiques décrits dans le chapitre précédent.

Les spécifications du micro-initiateur sécurisé que nous avons à concevoir sont présentées sur la Figure 14. Il comprend quatre fonctions :

- l'initiation,
- l'armement,
- le désarmement,
- la stérilisation.



Le micro-initiateur à concevoir devra inclure l'ensemble de ces fonctions dans un volume minimal fixé à moins de 1cm³. L'application impose d'avoir un système fiable au sens qu'il puisse fonctionner après plusieurs années de stockage.

Le système de protection sécuritaire du micro-initiateur est l'élément clef de nos spécifications. Il doit répondre aux critères de la norme STANAG 4187 [1], en particulier :

- insensibilité à 1A/1W/5min,
- résistance aux décharges électriques de type « corps humain » (+/- 25kV).

Soumis à ces agressions, l'initiateur ne doit, en aucun cas, être déclenché et les performances de l'initiateur ne doivent pas être dégradées.

Enfin, le système doit être résistant aux environnements militaires : contraintes subies lors du lancement de la munition (vibration, accélération linéaire, angulaire...), chocs subis lors de la manipulation, gamme de température étendue...

Dans le cadre de cette thèse, nous cherchons à concevoir et réaliser un premier démonstrateur avec pour objectif de valider nos choix technologiques et architecturaux. Les spécifications constituent un guide pour fixer nos choix de conception à partir de quoi nous devons nous assurer du bon fonctionnement de l'ensemble des fonctions ainsi que du niveau de sécurisation effectif. Nous ne visons pas la validation de la tenue aux agressions électromagnétiques qui seront l'objet de l'étape de développement suivante.

2.2. Détails des fonctions assurées par le micro-initiateur sécurisé

2.2.1 Fonction initiation

C'est la fonction principale du microsystème. Son rôle est d'allumer, par une commande électrique, une charge pyrotechnique de type primaire ou bien propergol. Nous retenons l'idée d'une **initiation par effet joule** grâce à une résistance électrique placée au contact de l'initiateur (cf Figure 15). Ce choix nous est dicté par la simplicité du concept et sa facilité d'intégration sur silicium.

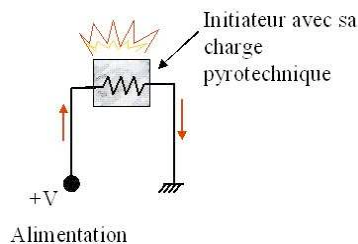


Figure 15. Schéma de principe d'un initiateur : le passage du courant dans l'élément chauffant entraîne la combustion du matériau pyrotechnique au contact.

2.2.2 La mise en veille sécurisée

Avant armement, l'initiateur doit être maintenu en mode de veille sécurisée. Dans notre approche, cette exigence est assurée par le maintien d'un **court circuit électrique franc placé entre les deux contacts de l'initiateur** (cf Figure 16). Aussi, en position de veille, aucun événement extérieur (de nature électromagnétique, humaine ou autre) ne peut initier la mise à feu par la résistance. Pour réellement parler de veille sécurisée, il faut que ce court circuit soit maintenu en position sans apport d'énergie extérieure. En effet en cas de panne électrique, il faut être sûr que le système restera sécurisé.

Notre proposition est donc de réaliser un court-circuit commandable, intégré autour de l'initiateur, qui puisse être déverrouillé en un temps court avant l'actionnement de l'amorce.

L'aspect commandable est primordial car il offre une flexibilité de mise en oeuvre:

- Répondant à la prise en compte d'événements extérieurs par l'intermédiaire de capteurs, ce qui peut être assimilé à un actionnement automatique,
- Par décision directe de l'opérateur,
- Par programmation.

L'aspect commandable du court-circuit autorise une plus grande liberté que les courts-circuits classiques à commande manuelle retirés avant le lancement ou déclenchés par événement extérieur lors du lancement, par exemple l'accélération. Le temps de réponse en ce sens n'est pas une contrainte car le système présenté permet d'armer le système à n'importe quel moment, avant, pendant ou bien après le lancement. On se fixe toutefois comme objectif de pouvoir armer le système en moins de 1 seconde [2].

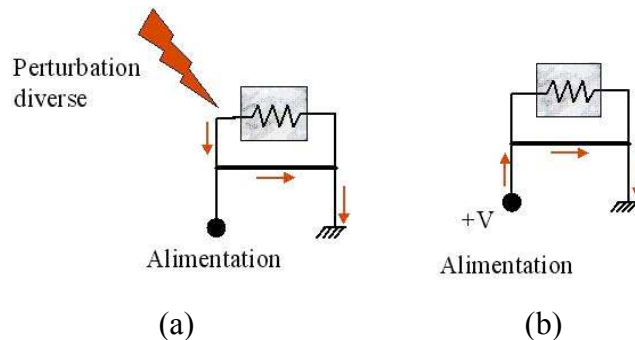


Figure 16. Sécurisation de l'initiateur en mode veille sécurisée : lors d'une perturbation extérieure (a) ou bien un déclenchement accidentel (b) les charges sont évacuées vers la masse sans traverser l'initiateur.

2.2.3 Fonction armement

L'armement consiste à déverrouiller l'initiateur pour permettre sa mise à feu. Dans notre proposition d'architecture, **l'armement consistera donc à venir supprimer le court circuit à la masse** (cf Figure 17).

Pour s'assurer que l'armement ne soit pas réalisé de façon accidentelle, le seuil de déclenchement de cette fonction d'armement devra être calibré pour satisfaire aux exigences auxquelles l'initiateur est normalement soumis et définies dans le STANAG 4187 [1].

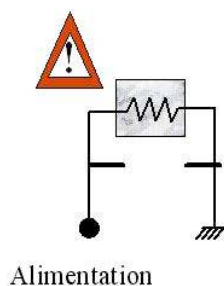


Figure 17. Armement de l'initiateur par rupture du court-circuit : la mise à feu est rendue possible mais le système ne présente plus de protection.

2.2.4 Fonction désarmement

C'est la fonction complémentaire de la précédente. **Elle consiste à venir rétablir le court-circuit à la masse** (cf Figure 18). Comme pour la fonction armement, on peut envisager de calibrer le seuil de déclenchement de cette fonction ou d'y associer des sécurités électriques.

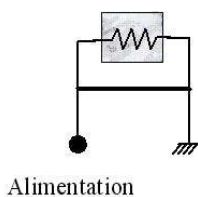


Figure 18. Désarmement de l'initiateur : le système est remis en état de veille sécurisé.

2.2.5 Fonction stérilisation

Cette fonction consiste à **venir annihiler définitivement la possibilité de mise à feu de l'initiateur**. Nous proposons alors de **sectionner la ligne d'alimentation** (cf Figure 19). Associé à un rétablissement du court circuit à la masse (désarmement), cette fonction rend le système complètement inapte à fonctionner. Elle est indépendante du système de protection par court-circuit évoqué jusqu'à présent. Elle trouve son utilité non pas avant l'utilisation de l'amorce mais dans le cas d'un actionnement defectueux qui laisserait la munition sur le lieu de l'impact en position armée. Cette fonction peut être particulièrement utile dans le cadre d'opérations de déminage.

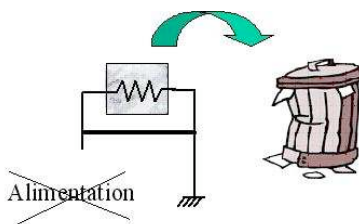


Figure 19. Stérilisation de l'initiateur sécurisé: le système est rendu inopérant.

2.3. Architecture logique du microsystème d'initiation sécurisé

Les différentes fonctions de l'initiateur sécurisé décrites dans la partie précédente peuvent être réalisées en intégrant des interrupteurs ON-OFF et OFF-ON autour d'un micro-initiateur comme le montre la Figure 20. On retrouve sur cette figure toutes les options que nous avons décrites : l'initiation, l'armement, le désarmement et la stérilisation. La logique est très simple :

- sortie d'usine le système est sécurisé par un court circuit physique de la résistance d'initiation R.
- Quelques instants avant initiation, de manière automatique, l'armement consiste à « sectionner » le court circuit.
- Si nécessaire, on peut désarmer le système en rétablissant une fois la mise en veille, par le rétablissement du court-circuit.
- Si pour diverses raisons, il faut rendre l'initiateur inopérant, la stérilisation consiste à sectionner la piste d'alimentation de l'initiateur.

L'ensemble de ces fonctions peut être assuré par de simples interrupteurs comme le montre la Figure 20.

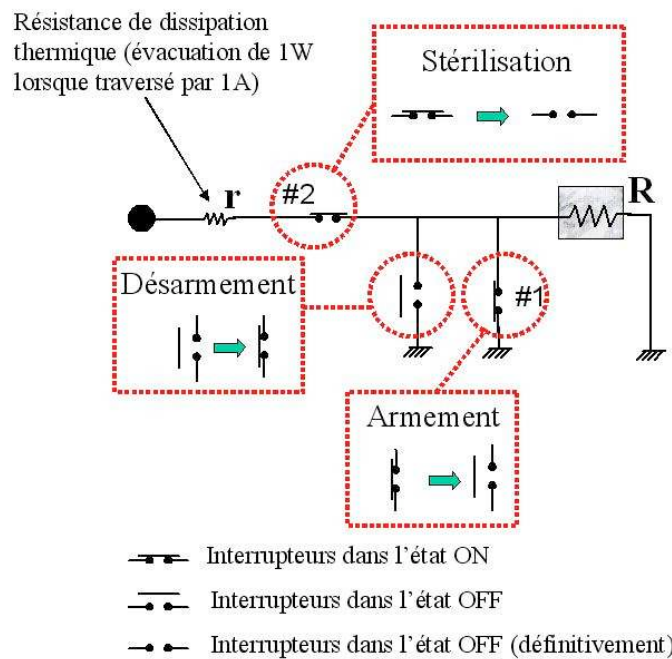


Figure 20. Schématisation de la micro-amorce (en position de veille sécurisée) avec ses fonctions sécuritaires.

Le rôle de la résistance de dissipation thermique r présenté sur Figure 20 est stratégique. C'est l'équilibre entre le rôle de r et R qui rend l'approche très attractive :

- Comme le recommande la norme, quand l'initiateur est en position de veille sécurisée et que le court circuit est traversé par 1A, elle permet de dissiper 1W et ainsi satisfaire aux exigences de cette norme sans incidence sur l'initiation.
- Quand l'initiateur est armé, elle doit absorber le minimum d'énergie pour que la majorité soit dissipée à travers la résistance de l'initiateur.

A partir de ces exigences, on fixe la valeur de r à 1Ω . Cette valeur doit être bien supérieure à la résistance du court-circuit (R_{cc}) et négligeable devant celle de l'initiateur (R)(cf Figure 21). Quelles que soient les fonctions électroniques qui pourraient être associées à cette architecture de base, ce sont les valeurs relatives de r et R qui font l'originalité du système et la perspective de réaliser une intégration totale sur silicium.

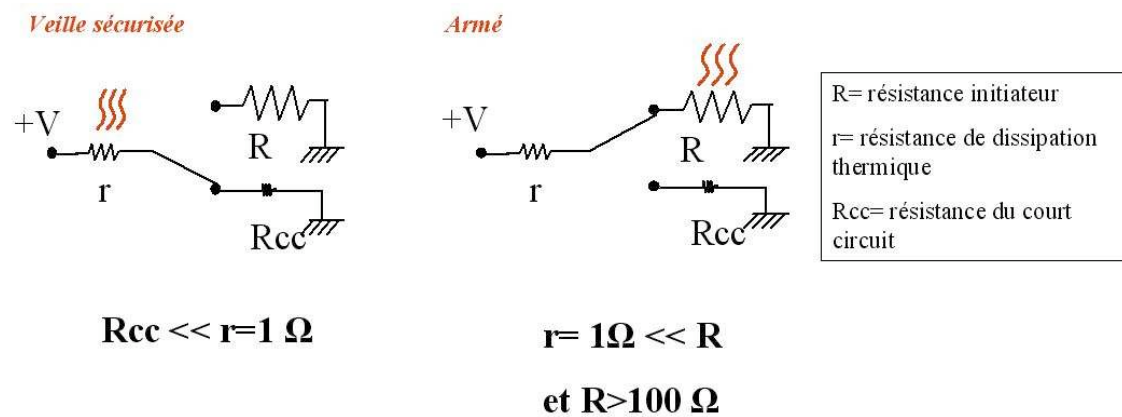


Figure 21. Schématisation du rôle de la résistance de dissipation thermique.

2.4. Nos choix technologiques

Les principes que nous venons de présenter correspondent à un modèle logique de l'initiateur sécurisé. Ils ne font pas référence aux technologies nécessaires à leur mise en œuvre. Nous avons choisi les technologies microsystemes pour l'intégration de ce micro-initiateur sécurisé pour plusieurs raisons :

- l'expérience du laboratoire en technologies microsystemes,
- la compatibilité électronique qui permettra à terme d'intégrer un circuit de commande,
- la compatibilité avec l'intégration ultérieure de capteurs, eux-mêmes en technologies microsystemes.

Cette approche permet de rendre le système « intelligent » en le rendant autonome et réactif aux diverses conditions d'utilisation.

Il faut aussi rajouter que le choix des technologies microsystemes amène des atouts supplémentaires comme :

- la capacité de miniaturisation,
- la réduction des énergies nécessaire au fonctionnement.

Ces derniers points sont critiques pour les systèmes embarqués dont l'autonomie doit être maximale.

A partir de tous ces points les technologies microsystemes à base de silicium nous sont apparues une solution très intéressante pour la réalisation d'un micro-initiateur sécurisé.

3. Conception de l'initiateur pyrotechnique sécurisé ou PYROSECURE

La conception d'un microsysteme d'initiation sécurisé que nous appellerons dans le reste du document PYROSECURE, ne peut pas pour l'instant appliquer totalement les règles habituelles de conception descendante, à savoir des spécifications au prototypage, car beaucoup d'éléments que nous allons décrire sont totalement nouveaux et l'on ne dispose pas de modèles et de technologies acquis, pour ce faire. La conception sera donc présentée élément par élément et nous garderons dans nos objectifs à terme, de revenir sur la conception descendante.

Nous organisons la description système en revenant d'abord sur la conception de l'initiateur de type fil chaud qui est la base de la filière et nous présenterons en détail les éléments les plus innovants : les interrupteurs ON-OFF et OFF-ON qui ont fait l'objet d'un dépôt de brevet [3].

3.1. L'initiateur sur membrane diélectrique

La conception de l'initiateur de type fil chaud retenu est basée sur les travaux précédemment développés par l'équipe [4]. Il consiste en un élément résistif en polysilicium déposé sur une membrane diélectrique bicouche $\text{SiO}_2(1.4\mu\text{m})/\text{SiN}_x(0.6\mu\text{m})$. Le matériau pyrotechnique est ensuite placé au contact de la résistance sur le dessus de la membrane ou bien en dessous, dans la cavité ménagée dans le substrat de silicium, comme présenté sur la Figure 22.

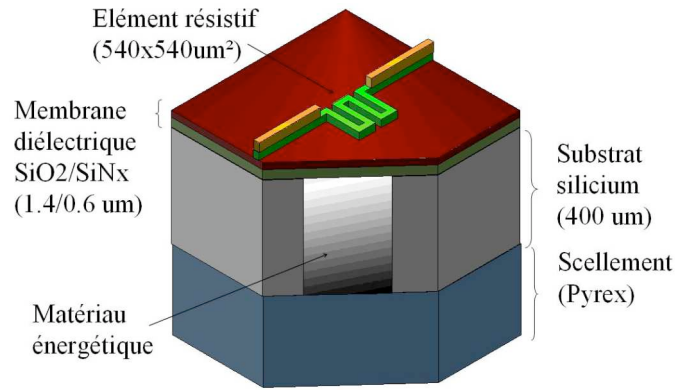


Figure 22. Composition d'un initiateur pyrotechnique sur silicium.

Le rôle de la membrane est primordial car elle permet de limiter les pertes thermiques tout en assurant une tenue mécanique suffisante pour maintenir le matériau pyrotechnique [5]. Depuis 1997, les membranes bicouches $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ ont fait l'objet d'études qui ont conduit à la réalisation de micro-initiateurs pyrotechnique performants. Parmi les études personnelles que j'ai menées, des simulations aux éléments finis sous MEMCAD² ont été réalisées avec pour objectif d'évaluer les performances thermiques de trois types d'initiateurs :

1 résistance métallique sur substrat massif d'alumine et de verre et une résistance polysilicium sur membrane $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ [6], dont les géométries et les dimensions sont rappelées à la Figure 23.

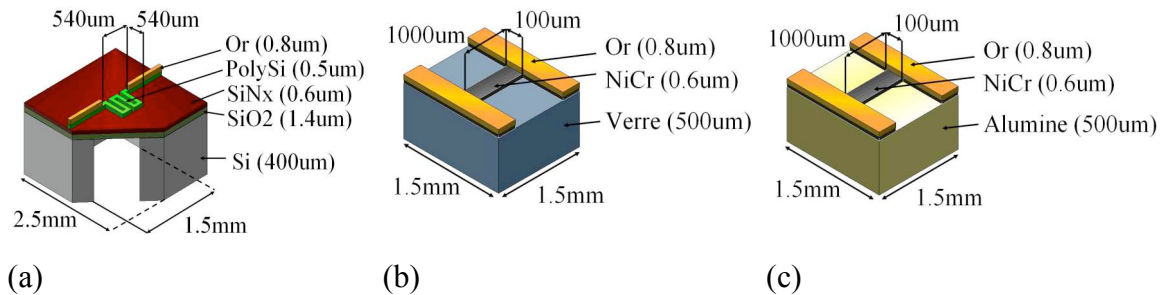


Figure 23. Géométrie des trois types d'initiateur testés : initiateur sur membrane $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ développé (a), résistance chauffante sur bloc de verre (b) et d'alumine (c).

La Figure 24 donne les courbes d'échauffement (température maximale en fonction de la puissance) pour ces trois plateformes. Une courbe expérimentale de la plateforme sur membrane diélectrique permet de valider le modèle qui a été réalisé. La structure sur membrane, qui nécessite à peine 40mW pour atteindre 250°C, est nettement plus performante

² Logiciel Coventorware

que les structures sur substrat massif qui nécessitent 230mW (verre) et 400mW (alumine) pour obtenir la même température.

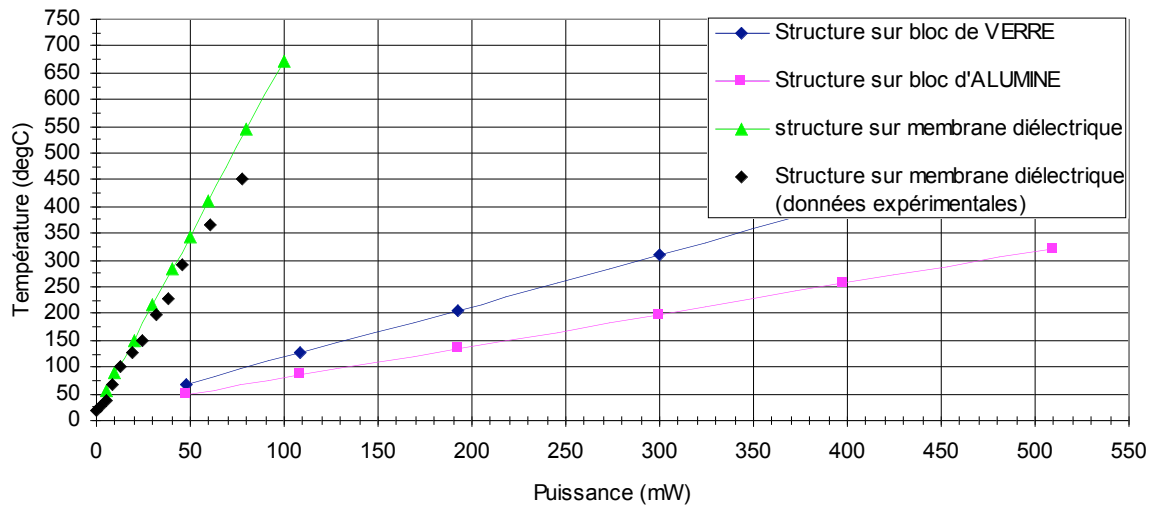


Figure 24. Température au niveau de l'élément chauffant en fonction de la puissance électrique d'alimentation pour différentes plateformes sans matériaux pyrotechniques.

Pour compléter cette analyse, nous avons calculé les temps d'initiation d'un matériau énergétique de type PAG/PA³, utilisé au LAAS dans le cadre des applications de micropropulsion pour l'espace, ayant une température d'initiation de 250°C, placé au contact de l'élément chauffant pour les deux structures ayant donné les meilleurs résultats en terme d'échauffement, à savoir plateforme sur membrane et sur substrat en verre (Figure 25). Nous avons constaté que quelle que soit la puissance appliquée, la différence est de 250ms en faveur de l'initiateur sur membrane SiO₂/SiN_x. De plus ce type de substrat ne facilite pas l'intégration de fonctions électroniques. Ces résultats nous ont donc confortés dans le choix d'un initiateur sur membrane SiO₂/SiN_x.

³ PolyAzoture de Glycidyle/ Perchlorate d'Ammonium.

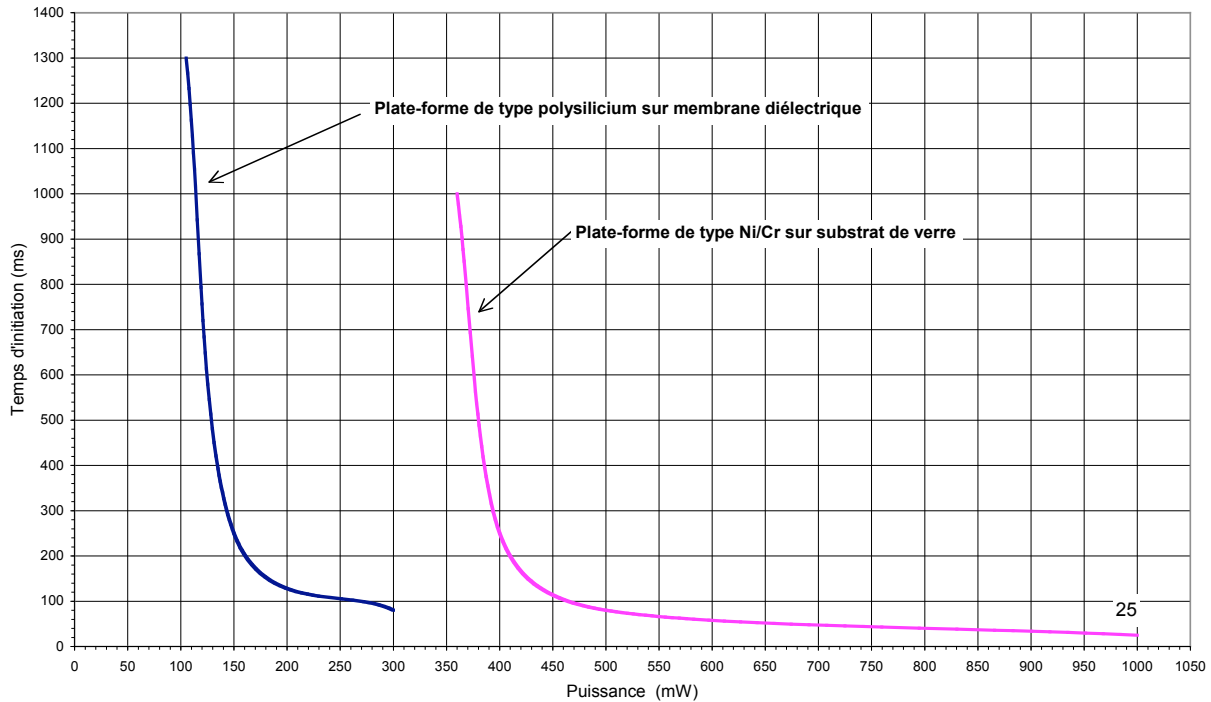


Figure 25. Temps d'initiation en fonction de la puissance électrique pour deux types d'initiateur : sur substrat de verre et sur membrane diélectrique.

3.2. Conception des interrupteurs

Le schéma ou principe d'architecture fixe le choix des technologies des interrupteurs. L'exigence d'avoir de longues périodes de stockage sans apport d'énergie n'autorise pas de systèmes sécuritaires électroniques et invite à chercher dans la micromécanique des solutions viables. La première idée débattue était celle d'utiliser les technologies en cours de développement des micro-interrupteurs RF et de chercher des solutions de bistabilité mécanique: c'est une solution possible, à terme, si les technologies de ces interrupteurs se développent dans cette direction. Notre cas d'utilisation a comme particularité de pouvoir considérer des systèmes monocoups. Pour des raisons de compatibilité, il devenait donc naturel de considérer la possibilité ouverte par des interrupteurs pyrotechniques.

Cette solution n'est envisageable que si elle répond à des exigences que les micro-interrupteurs mécaniques ne peuvent satisfaire. Ces exigences sont basées sur les contraintes propres à l'application et définies lors des spécifications:

- La réalisation micro technologique doit être compatible avec l'initiateur pour aller jusqu'à une intégration monolithique.

- Le court circuit entre les deux contacts de l'initiateur doit être parfait pour s'assurer qu'aucun courant ne traverse l'initiateur, ce qui implique des résistances de contact minimales.
- Inversement, les résistances dans l'état OFF doivent être maximales.
- Pour économiser l'énergie, on choisira des interrupteurs bistables, ne consommant que lors des changements d'état.
- L'actionnement de ces interrupteurs peut intervenir de nombreuses années après la fabrication et doit rester parfaitement fiable.
- Les interrupteurs doivent être robustes, résistants aux conditions de fonctionnement extrêmes des systèmes d'armement (choc, vibration...).

Ces critères généraux sont complétés par des exigences propres aux fonctions sécuritaires à assurer :

- Pour la fonction stérilisation, la commutation doit être irréversible.
- Pour la réalisation du court circuit (fonction armement/désarmement), il sera préférable d'utiliser un interrupteur initialement fermé, de manière à avoir un système directement sécurisé par fabrication. On pourra donc placer une charge primaire au contact de l'élément chauffant sans risquer une initiation parasite. Ou bien même, à terme, venir déposer directement le matériau pyrotechnique durant le procédé de fabrication microtechnologique par des techniques micro technologiques [7,8] sans risquer l'initiation.

Nous allons donc, dans un premier temps, faire un état de l'art des interrupteurs mécaniques existants avant de présenter le type et l'architecture des interrupteurs retenus.

3.2.1 Etat de l'art des interrupteurs mécaniques existants

a. Interrupteurs mécaniques contact solide-solide

Ils sont basés sur la déflexion d'un cantilever ou bien d'un pont qui vient mettre en contact deux pistes initialement séparées. Cette déflexion peut être soit latérale soit verticale. La rigidité du pont ou du cantilever, définie par les matériaux utilisés et sa géométrie, détermine la force à appliquer pour établir le contact et permet de rétablir l'état ouvert après l'arrêt de la commande. On peut faire intervenir différents effets physiques pour réaliser l'actionnement. Les différentes catégories reportées sont l'actionnement électrostatique [9-15], thermique [16-20], magnétique [21-23] et piézoélectrique [24,25].

Concernant les propriétés électriques de ces interrupteurs, la séparation mécanique entre les deux éléments à connecter assure une isolation parfaite dans l'état ouvert. Dans l'état fermé, il

apparaît une résistance de contact, qui doit être réduite et qui est inversement proportionnelle à la surface de contact. La taille de cette surface peut être augmentée lors de la conception ce qui a pour inconvénient un plus grand encombrement. Une autre solution consiste à augmenter la force de l'actionnement. Ceci a pour conséquence une déformation plastique des aspérités et donc l'augmentation des surfaces en contact. Par contre des forces d'actionnement trop importantes entraînent un impact du cantilever ou du pont qui abîme les contacts. Elles favorisent aussi les phénomènes de collages qui peuvent être définitifs, rendant le système inopérant. Le contact est aussi dégradé par la présence d'humidité, de poussières, ou bien d'une fine couche d'oxyde, ce qui nécessite l'encapsulation de ces interrupteurs dans des boîtiers hermétiques.

Ces phénomènes font que la résistance de contact dans ces interrupteurs mécaniques ne reste pas stable et à partir d'un certain nombre de cycle (entre 10^5 à 10^7 pour des contacts en or [9]) elle tend à augmenter. Etant donné le nombre de paramètres influant sur la valeur de la résistance de contact, il est difficile d'en donner une valeur précise mais généralement elle est comprise entre quelques dizaines et quelques centaines de $m\Omega$.

Outre ces problèmes à avoir une résistance de contact satisfaisante, plusieurs autres raisons rendent les interrupteurs mécaniques de type contact solide-solide non adaptés à notre système PYROSECURE :

- Dans l'architecture présentée, les interrupteurs sont fermés la plupart du temps ce qui favorise le collage, amplifié par la réalisation de microsoudures lors de l'échauffement dû au passage de courant parasite, ne permettant plus de l'ouvrir et rendant le système inopérant.
- Ces interrupteurs nécessitent l'application d'une force pour conserver l'état fermé ce qui n'est pas compatible avec notre application dans laquelle le système doit pouvoir être protégé même sans alimentation.
- La bistabilité de ces micro-interrupteurs mécaniques demande donc une conception particulière : utilisation de verrous mécaniques [17] ou d'aimants permanents [22], diminution de la rigidité du pont pour qu'il reste collé au contact et ainsi maintenir l'état fermé [19,20]... Dans tout ces cas il faut prévoir un actionneur supplémentaire qui puisse faire revenir l'interrupteur dans l'état ouvert, ce qui complique grandement le système et augmente le risque de défaillance.

b. Interrupteur à contact liquide-solide

Nous avons vu que la qualité du contact et plus particulièrement sa stabilité est un problème majeur dans les interrupteurs mécaniques à contact solide-solide. Les aspérités sur les contacts limitent l'aire de contact et augmente la résistance de contact. Pour pallier à ce problème, J. Simon a proposé en 1997 une solution de micro interrupteur à contact liquide-solide [26]. Le concept consiste à mettre en mouvement une bille de métal liquide (mercure) pour établir ou interrompre le lien entre deux pistes. Le métal liquide permet de s'affranchir du problème des aspérités et ainsi d'avoir des résistances de contact réduites et stables de quelques dizaines de $m\Omega$ [27]. De plus lorsque la commutation dans un état fermé est requise, le métal liquide recouvre toute la surface et adhère sans nécessiter l'application d'une force, ce qui le rend naturellement bistable. Le phénomène d'adhésion, appelé mouillage, rend l'interrupteur insensible aux vibrations, chocs et à l'orientation. L'état initial, ouvert ou fermé, de l'interrupteur est défini lors du dépôt de la bille de mercure faisant intervenir des sites de croissance préférentiels. Finalement le métal liquide n'est pas soumis à fatigue mécanique ou au phénomène de rebond lors des commutations contrairement aux micro-interrupteurs à contact solide-solide. Deux solutions d'actionnement ont été proposées dans la littérature: pneumatique [26,27] et électrostatique [28,29].

Toutefois l'utilisation d'éléments liquides nécessite d'avoir un système hermétique donc des étapes d'assemblage particulières qui limitent l'intégration. Pour ces raisons, ce type de micro-interrupteur n'est pas une solution adéquate pour sécuriser notre micro-initiateur.

c. Conclusion sur la validité des concepts d'interrupteurs existants

Le Tableau 2 récapitule dans quelle mesure les interrupteurs que nous avons pu trouver dans la littérature s'adaptent aux spécifications de notre application.

Contraintes de l'application		Interrupteurs mécaniques à contact solide-solide	Interrupteurs mécaniques à contact solide- liquide
Réalisation en micro technologie		Oui	Oui avec contraintes
Intégration		Oui	Difficile
Qualité du contact (état ON) (Résistance de contact négligeable)		Non	Oui
Qualité de l'isolation (état OFF)		Oui	Oui
Consommation énergétique		Dépend du type d'actionnement	Dépend du type d'actionnement
bistable		Possible	Oui
Robustesse		Pièces mobiles susceptibles de défaillance	Non évalué
Sensibilité aux vibrations/chocs		Plus ou moins sensible aux vibrations/choc du fait de la présence de pièces mobiles	Non
Contraintes préférables pour un fonctionnement optimal du système	Actionnement irréversible	Non	Non
	Etat initial ON	Non	Possible

Tableau 2. Validité des concepts d'interrupteurs mécaniques existants par rapport à nos spécifications.

Au vu de ce qui vient d'être exposé, il semble évident qu'aucun des concepts d'interrupteurs existants actuellement ne satisfont à l'ensemble des contraintes de PYROSECURE.

A partir de ces conclusions il semble évident que l'alternative consistant à développer des interrupteurs basés sur l'utilisation de matériaux pyrotechniques est à privilégier: un interrupteur assurant le passage de l'état ON à l'état OFF et inversement un interrupteur assurant le passage de l'état OFF à l'état ON.

3.2.2 Notre proposition d'interrupteurs pyrotechniques

L'idée initiale était de profiter de l'énergie disponible dans les matériaux pyrotechniques pour :

- détruire une connexion (interrupteur ON-OFF),
- réaliser une connexion (interrupteur OFF-ON),

Cette approche procure une certaine compatibilité avec la technologie de l'initiateur. **De là est née une idée de filière technologique complète capable de réaliser des opérations logiques complexes mais n'opérant qu'une seule fois.**

Bien qu'à première vue contraignant, le caractère monocoup de ces interrupteurs permet déjà de répondre à certaines exigences que sont:

- la bistabilité,
- l'aspect irréversible de la fonction stérilisation,
- le contrôle du court circuit de l'initiateur par un interrupteur initialement ON pour sécuriser l'initiateur dès sa fabrication.

Les parties qui suivent présentent les concepts et les éléments de conception de ces interrupteurs ON-OFF et OFF-ON totalement innovants.

a. Interrupteur ON-OFF

A la manière d'un fusible, l'idée est de venir sectionner une piste de manière mécanique, mais cette fois-ci sur commande, lorsque l'on souhaite l'ouverture de l'interrupteur.

Une solution technologique possible est que la piste à interrompre, traverse la membrane diélectrique d'un actionneur pyrotechnique tel que décrit dans le paragraphe 3.1 (cf Figure 26 (a) et (b)).

Pour ouvrir l'interrupteur, la résistance en polysilicium localisée sur la même membrane vient chauffer le matériau pyrotechnique enfermé dans la cavité sous la membrane. La membrane est la partie fragile de la cavité et éclate sous la pression des gaz de combustion du matériau pyrotechnique, entraînant par la même occasion la rupture de la piste (cf Figure 26-(c)). On passe ainsi d'un état fermé (ou ON) à un état ouvert (ou OFF).

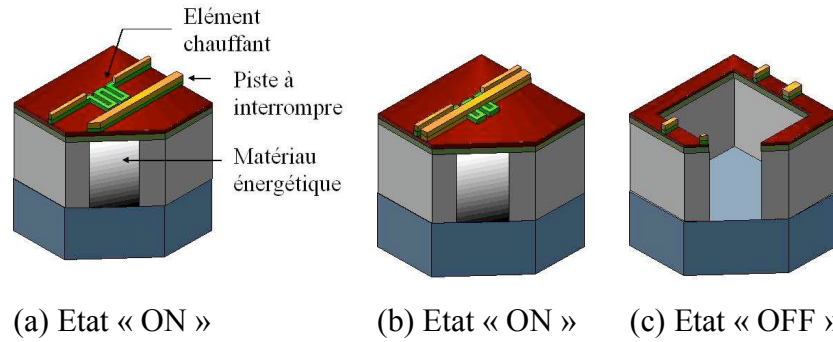


Figure 26. Concept de l'interrupteur ON-OFF: la piste électrique à interrompre traverse la membrane à proximité (a) ou sur l'élément chauffant (b) et est sectionné lorsque la membrane éclate sous l'effet des gaz de combustion du matériau pyrotechnique enfermé sous la membrane(c).

Dans le cas de l'interrupteur ON-OFF le critère de sélection du matériau pyrotechnique est différent de celui de l'initiateur pyrotechnique : la propriété essentielle que doit assurer le matériau pyrotechnique est de produire une grande quantité de gaz pour s'assurer de l'éclatement complet de la membrane. De plus l'interrupteur ON-OFF assurant la désécurisation de l'initiateur pyrotechnique, il convient de choisir un matériau peu sensible pour que son seuil d'actionnement soit assez élevé. En effet, la protection de l'initiateur est totale si le court circuit ne peut être supprimé accidentellement et donc si l'actionnement de l'interrupteur ON-OFF le contrôlant satisfait à la norme 1A/1W/5min [1]. Un propergol composite est tout à fait adapté à ces contraintes [30].

Nous avons aussi réfléchi à nous affranchir de l'utilisation de matériau pyrotechnique. L'alternative que nous avons exploré est d'utiliser directement l'énergie thermique dégagée par l'élément chauffant pour faire fondre la piste conductrice placée au contact (cf Figure 27).

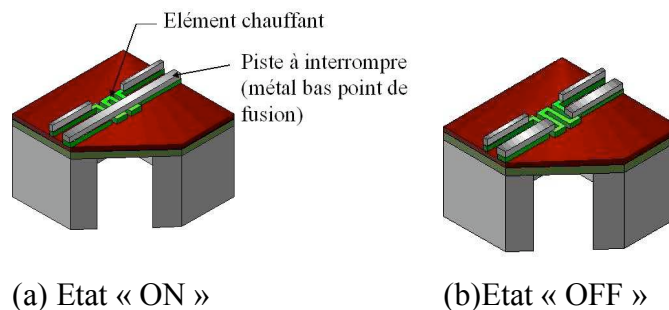


Figure 27. Concept de l'interrupteur ON-OFF thermique : la piste électrique à interrompre est placée sur l'élément chauffant (a) et fond lorsque la commutation est demandée (b).

L'élément chauffant envisagé consiste tout simplement en un micro-actionneur pyrotechnique non rempli avec le matériau pyrotechnique. On obtient un élément chauffant sur membrane assurant une isolation thermique optimale. La contrainte principale de ce concept est d'utiliser un matériau conducteur bas point de fusion et évaporable.

Le Tableau 3 classe divers métaux par température de fusion décroissante et pour chacun donne la résistivité.

Type matériau	Température de fusion (°C)	Résistivité électrique ($10^{-6} \Omega.cm$)
Cuivre	1084	1.7
Or	1064	2.2
Argent	962	1.55
Germanium	937	50
Aluminium	660	2.7
Antimoine	630	41
Cadmium	321	7.7
Etain	232	11.5
Indium	157	9

Tableau 3. Récapitulatif des matériaux pouvant être utilisés pour réaliser la piste à interrompre.

L'aluminium nous a semblé la meilleure alternative car il allie à la fois une très bonne conductivité à une température de fusion relativement basse.

Pour favoriser l'échange thermique entre l'élément chauffant et la piste à interrompre, celle-ci est déposée sur l'élément chauffant. Une fine couche diélectrique est placée entre les deux pour assurer l'isolation électrique.

Pour différencier ces deux interrupteurs, nous appellerons interrupteur ON-OFF pyrotechnique, celui basé sur la combustion d'un matériau énergétique et ON-OFF thermique, celui permettant de fondre une piste d'aluminium.

Quelque soit la solution retenue, l'approche générale qui consiste à interrompre une piste métallique pour réaliser une commutation ON-OFF présente plusieurs avantages:

- Aucune résistance de contact dans l'état ON.
- Une isolation mécanique dans l'état OFF.
- L'interrupteur est bistable, ce qui le rend parfaitement adapté aux applications embarquées en particulier aux contraintes de PYROSECURE.
-

b. Interrupteur OFF-ON

L'aspect unidirectionnel de l'interrupteur ON-OFF nécessite la réalisation d'un interrupteur OFF-ON complémentaire. **Dans notre approche l'interrupteur OFF-ON se base sur la réalisation par voie thermique d'une brasure locale entre deux pistes électriques que l'on souhaite connecter** (cf Figure 28). La brasure est le résultat d'une interdiffusion entre le métal des pistes et un métal d'apport en fusion. Il se forme alors une interface conductrice appelée intermétallique. Le fait d'avoir un des deux métaux en phase liquide permet d'avoir une cinétique de croissance importante de l'ordre de 10 fois celle obtenue dans le cadre d'une diffusion classique entre deux métaux à l'état solide [31]. On ne parle d'ailleurs plus de diffusion mais de dissolution du métal dans le métal d'apport.

La mise en œuvre pratique de cette approche consiste à disposer d'un métal d'apport placé directement entre les deux pistes à connecter, initialement séparé de celles-ci par une résine diélectrique spécifique. Cette résine assure l'isolation électrique dans l'état OFF et a un point de fusion plus bas que celui de l'élément d'apport pour permettre la mise en contact de l'élément d'apport et des pistes lors de la brasure. Pour réaliser l'évaporation du diélectrique et la fusion du métal d'apport pour la brasure, il faut une énergie thermique importante :

- On pourrait imaginer l'extraire de la combustion d'un matériau pyrotechnique. Cette voie est sûrement à privilégier pour des brasures de grande surface.
- On peut et c'est notre choix, s'agissant de surfaces faibles, utiliser simplement l'effet joule sur une membrane telle que celle utilisée pour nos initiateurs en conservant l'avantage de la cohésion technologique.

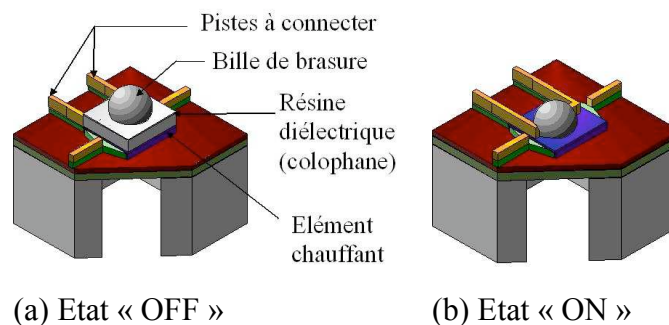


Figure 28. Concept de l'interrupteur OFF-ON: les piste électriques sont interrompues et l'espace libre est occupé par une bille de soudure isolée électriquement par une couche de colophane (a). Lorsque la commutation est demandée, l'élément chauffant va faire fondre à la fois la colophane et la bille de soudure permettant la réalisation de la brasure (b).

i. Méca`isme de brasure et choix des matériaux

Le choix des matériaux utilisés pour les pistes et l'élément d'apport est primordial car il conditionne la qualité de la brasure et par extension du contact électrique.

Comme élément d'apport, nous choisissons un alliage SnPb eutectique composé de 63% d'étain et 37% de plomb. Cet alliage est choisi du fait de son bas point de fusion ($T_{\text{fusion}}=183^{\circ}\text{C}$), parfaitement adapté aux contraintes des microtechnologies. Cette faible température est obtenue grâce à l'action du plomb qui abaisse la température de fusion par rapport à de l'étain pur qui lui est l'élément actif intervenant lors de la brasure. Le fait que cet alliage soit très répandu et connu, nous procure aussi une certaine assurance de performance. Le choix d'un alliage eutectique permet en outre d'avoir, comme pour un métal pur, un passage direct de l'état solide à liquide et inversement. On évite ainsi lors du refroidissement le passage par une phase « pâteuse » non contrôlée ne donnant pas une brasure reproductible. Pour les pistes, tous les métaux nobles (Or, Argent, Etain...) sont utilisables mais se dissolvent très facilement dans l'élément d'apport conduisant à une croissance rapide de l'intermétallique qui fragilise l'interface [32]. Une alternative est donc d'utiliser du cuivre qui se dissout moins vite que les métaux nobles (cf Figure 29) et qui est devenu un matériau classique des microtechnologies.

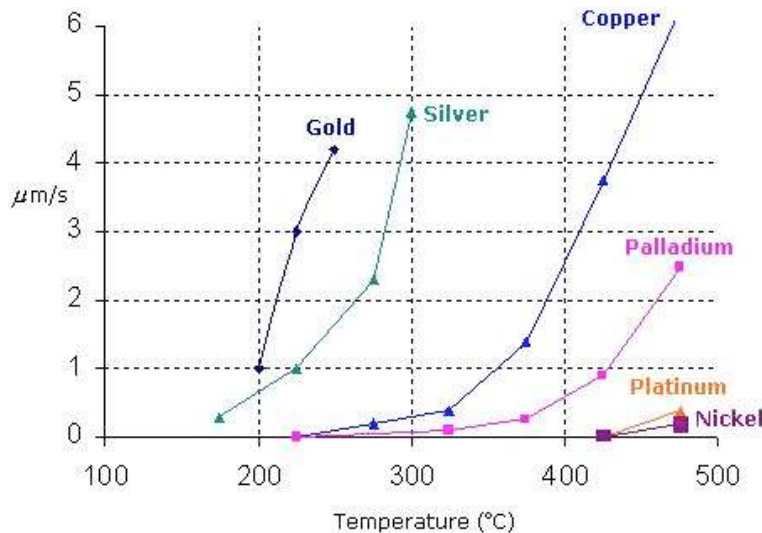


Figure 29. Vitesse de dissolution de quelques métaux dans un alliage étain-plomb [32].

Ce que l'on sait de la filière que nous préconisons (SnPb/Cu) est que le cuivre se dissout dans l'alliage étain-plomb et ce n'est qu'une fois que la partie étain-plomb au contact de la piste en cuivre atteint la limite de solubilité, que l'intermétallique se forme dans le cuivre [33]. Cet intermétallique est constitué de deux phases superposées:

- ϵ -phase (Cu_3Sn), riche en cuivre et localisée près de la piste en cuivre,

- η -phase (Cu_6Sn_5), riche en étain et localisée près de l'élément d'apport (SnPb).

La phase η constitue la majeure partie de l'intermétallique et présente une forme en coquille tandis que la phase ε est plus fine et plane. L'intermétallique croît de quelques μm pour des temps de brasure de quelques secondes et peut aller jusqu'à plus de $10\mu\text{m}$ pour un temps de brasure de 40min [31].

ii. I`tégratio` d'u` système de micro-brasure comma`dable sur silicium

Après avoir choisi les matériaux intervenant dans la réalisation du contact électrique, il convient de trouver une technologie d'intégration de ces éléments de manière à assurer les fonctions fondamentales de l'interrupteur OFF-ON : isolation à l'état initial et réalisation de la brasure lorsque la commutation est requise.

En électronique, il est courant de réaliser des brasures, pour des reports de puce sur substrat. On utilise généralement une pâte à braser constituée de petites particules du métal d'apport ($20\mu\text{m}$ de diamètre) noyées dans une matrice de flux qui est placée entre les deux contacts à interconnecter. Lors de la brasure les billes s'agglomèrent et la goutte obtenue s'étale sur les deux contacts pour réaliser l'interconnexion. Les pâtes à braser ont fait l'objet de nombreuses études et elles sont maîtrisées dans l'industrie, il était naturel que l'on s'intéresse à cette approche pour l'adapter aux besoins de nos interrupteurs OFF-ON.

Le flux est essentiel pour la réalisation de cette brasure. Son rôle principal est de supprimer l'oxyde présent sur le métal des contacts, qui bloquerait l'attraction moléculaire entre la brasure et le métal des contacts. Cela permet aussi un meilleur étalement de l'élément d'apport sur les contacts, une augmentation des surfaces en contact et une meilleure interdiffusion. Cette capacité à s'étaler est connue sous le nom de mouillabilité.

Le flux est majoritairement constitué de colophane qui est une forme naturelle de résine que l'on retrouve dans les pins. C'est une substance inerte, solide à température ambiante et diélectrique. Pour rendre les flux à base de colophane plus agressifs pour l'élimination des oxydes, des produits activateurs leur sont ajoutés. Bien qu'améliorant les processus de brasage, les résidus sont corrosifs et nécessitent un nettoyage après brasure. Pour faciliter sa manipulation, le flux est dissous par un solvant ce qui permet de faire un dépôt par seringue ou sérigraphie à température ambiante.

Pour notre application la grande quantité de métal dans les pâtes à braser commerciales (> 85% [34-36]) ne permet pas de s'assurer d'une parfaite isolation électrique. De plus la structure en amas de micro-billes de la pâte à braser présente l'inconvénient d'avoir une

grande surface au contact de l'air, susceptible d'être oxydée. Le flux peut ne pas tout désoxyder ce qui conduit à une brasure de mauvaise qualité, voir à une non brasure.

Toutefois les caractéristiques de la colophane seule sont particulièrement intéressante pour notre application, en particulier en tant qu'élément d'interface entre le métal des piste et l'élément d'apport :

- Son caractère diélectrique assure l'isolation dans l'état initial.
- Solide à température ambiante, elle bloque le rapprochement de l'élément d'apport et des pistes.
- Elle participe à la réalisation d'une brasure de qualité et donc à la commutation dans l'état fermé.
- La colophane choisie a une température de fusion de 83°C. Elle est donc liquide lors de la brasure qui se fait à 183°C, et n'est donc plus un frein au rapprochement moléculaire de l'élément d'apport et des pistes.

Cette solution d'interfaçage, nous laisse une certaine liberté au niveau de la forme de l'élément d'apport. Nous choisissons d'utiliser de l'étain plomb sous forme de bille de 350µm de diamètre. La bille est déposée sur la colophane amenée à sa température de fusion. Ainsi en se refroidissant elle vient piéger la bille au dessus de la zone de soudure.

Le mécanisme de l'interrupteur est donc le suivant :

- A l'état initial la colophane assure l'isolation entre les pistes et la bille de soudure.
- Lorsque la commutation est désirée, le système est porté à température de fusion de la bille de soudure (183°C pour un alliage eutectique de SnPb).
- La colophane à l'état liquide à partir de 83°C permet à la bille de soudure de se rapprocher du métal des pistes et désoxyde les surfaces.
- La bille en fusion s'étale sur les pistes pour réaliser la brasure.
- Une fois la brasure réalisée, le chauffage est interrompu, la bille se solidifie donnant un contact permanent.

Comme pour les interrupteurs ON-OFF, l'actionnement du système est électrothermique. Il nécessite donc l'intégration d'un élément chauffant réalisé en polysilicium que nous déposons sur une membrane diélectrique $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$.

Les avantages de l'approche sont :

- L'isolation électrique dans l'état OFF est parfaitement assurée par la couche de résine diélectrique.
- Le fait de réaliser une brasure doit permettre d'obtenir des résistances de contact très réduites dans l'état ON.
- Le système est bistable, ce qui est une caractéristique essentielle dans le cadre d'applications embarquées.

4. Conclusion

Ce chapitre avait pour objectif de présenter notre architecture de micro-initiateur sécurisé avec le détail des concepts et technologies de chaque composant.

Le système comprend la fonction d'initiation et plusieurs fonctions sécuritaires, qui ont été définies :

- armement,
- désarmement,
- stérilisation.

Celles-ci s'intègrent autour de l'initiateur qui est initialement en veille sécurisée par un court-circuit entre ses deux contacts. Ce court-circuit protège l'initiateur contre toute perturbation électrique et ceci jusqu'au moment de l'initiation grâce à son aspect commandable. Pour que l'initiateur en veille sécurisée soit en mesure de dissiper 1W lorsqu'il est traversé par 1A, nous lui avons adjoint une résistance de dissipation thermique qui a un double rôle :

- en position sécurisée, elle doit être l'élément le plus résistif du circuit pour absorber toute la puissance,
- après retrait du court-circuit, elle ne doit pas perturber l'initiation et sa valeur doit être bien inférieure à celle de la résistance de l'initiateur.

Par la suite, les détails de conception de chaque composant du système ont été donnés : l'initiation est réalisé par un initiateur issu des travaux déjà effectués par le LAAS-CNRS tandis que les fonctions sécuritaires sont réalisées à l'aide d'interrupteurs nouveaux. Par souci de compatibilité avec l'initiateur pyrotechnique, constituant l'élément de base de toutes nos applications de micropyrotechnie, nous avons cherché à développer une filière d'interrupteurs pyrotechniques. Nous avons donc proposé deux concepts:

- Un micro-interrupteur ON-OFF, qui consiste à sectionner une piste qui traverse un micro-actionneur pyrotechnique. L'initiation du matériau pyrotechnique va amener une rupture de la membrane et donc de la piste. Une filière alternative consistant à

utiliser directement l'énergie thermique d'un élément résistif pour faire fondre la piste a été présentée.

- Un micro-interrupteur OFF-ON, qui consiste à réaliser une micro-brasure commandable entre deux pistes à connecter. Concernant ce concept, les faibles surfaces de brasure mise en jeu ne nécessitant pas l'apport énergétique d'un matériau pyrotechnique, nous nous sommes contenté d'un apport d'énergie par plateforme chauffante.

Les avantages potentiels de ces interrupteurs dans le cadre de notre application sont nombreux et ont été présentés : ils ne présentent pas ou très peu de résistance de contact dans l'état fermé et une isolation mécanique dans l'état ouvert, sont bistables et n'ont pas de pièces mobiles à mettre en mouvement pour réaliser la commutation. Le fait qu'ils soient à actionnement unique constitue bien sûr une limitation mais ils restent toutefois bien adaptés aux applications de type sécurité, qui ne requièrent généralement qu'un nombre limité de commutations. Enfin, leur commande, de type électrothermique, limite leur utilisation à un domaine de température spécifique.

Dans le chapitre suivant nous verrons le dimensionnement des différents composants qui ont été présentés à savoir l'initiateur pyrotechnique ainsi que les interrupteurs ON-OFF et OFF-ON. Notre démonstrateur PYROSECURE les intégrant sera ensuite présenté et son procédé de fabrication exposé.

Chapitre 3

Intégration du micro-initiateur sécurisé **PYROSECURE** sur silicium



1. Introduction

Dans le chapitre précédent en réponse aux spécifications, nous avons proposé une architecture originale d'un système intégré permettant de sécuriser un micro-initiateur pyrotechnique que nous avons dénommé PYROSECURE. Les différentes fonctions sécuritaires (armement, désarmement, stérilisation) y sont réalisées par l'intermédiaire d'interrupteurs associés à un micro-initiateur à effet Joule. Pour la conception technologique de ces interrupteurs, nous avons privilégié une filière pyrotechnique pour, d'une part ouvrir un nouveau champ d'application de la micropyrotechnie, et d'autre part disposer d'un procédé de fabrication de ces interrupteurs ON-OFF, OFF-ON compatible avec celui du micro-initiateur compatible, facilitant ainsi leur intégration au sein d'un même substrat.

L'objectif général de ce chapitre sera donc de démontrer à la fois la faisabilité technologique des concepts proposés et valider la possibilité de leur intégration au sein d'une même puce.

Dans un premier temps nous décrirons le démonstrateur PYROSECURE tel qu'il sera réalisé, intégrant :

- un micro-initiateur pyrotechnique sur membrane $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$,
- deux interrupteurs ON-OFF pyrotechniques,
- un interrupteur OFF-ON.

Cette présentation considèrera le dimensionnement de chaque composant pris de manière individuelle. Des résultats de simulations aux éléments finis réalisées sur la base de ces dimensionnements pour chaque interrupteur permettront de prévoir leurs performances thermiques. Finalement, nous donnerons la structure du démonstrateur PYROSECURE avec ses dimensions.

Une fois la structure complète décrite, nous présenterons le procédé de fabrication d'ensemble qui sera divisé en deux parties :

- Des opérations sur des plaques de silicium de 4 pouces, intégrant plusieurs cellules de micro-initiateur sécurisé, qui sont collectives et qui mettent en oeuvre des procédés classiques de microtechnologie.
- Des opérations d'assemblage qui interviennent à la fin de la réalisation pleine plaque et qui sont effectuées sur les cellules individualisées de PYROSECURE.

Par la suite nous donnerons des éléments de validation technologique en terme de dispersion et contrôle de reproductibilité. Le système qui est présenté tout au long de ce chapitre constitue un premier démonstrateur de la faisabilité. Les procédés de fabrication évoqués

peuvent être améliorés moyennant un effort de développement supplémentaire et des pistes d'améliorations seront donc données à la fin de ce chapitre.

2. Description du démonstrateur du micro-initiateur sécurisé PYROSECURE

La réalisation d'un démonstrateur est l'étape terminale de la démarche de conception d'un système. Elle fait le lien entre le concept et le produit final industrialisé en vérifiant la faisabilité du système tel qu'il a été conçu et en validant ou non son fonctionnement opérationnel.

Pour notre démonstrateur PYROSECURE, l'étape de réalisation a pour objectif de :

- Valider la faisabilité technologique des différents composants du microsystème à savoir l'initiateur et les interrupteurs ON-OFF et OFF-ON.
- Valider leur intégration au sein d'un même substrat.
- Fournir des premiers systèmes tests pour évaluer les performances, en terme de sécurité notamment.

En accord avec l'architecture présentée au chapitre 2, PYROSECURE intègre un micro-initiateur pyrotechnique ainsi que les interrupteurs ON-OFF et OFF-ON.

Dans un premier temps nous allons présenter le dimensionnement de chacun des composants de manière individuelle avant d'exposer les contraintes et les choix liés à leur intégration au sein du micro-initiateur sécurisé PYROSECURE.

2.1. Dimensionnement de l'initiateur pyrotechnique

L'initiateur choisi est constitué d'un élément chauffant de type résistif venant initier un matériau pyrotechnique au contact par effet Joule. Il convient donc de dimensionner à la fois la partie plateforme chauffante et de choisir le matériau pyrotechnique adapté.

2.1.1 L'élément résistif

L'élément résistif chauffe par contact direct le matériau pyrotechnique pour l'initier. L'équipe en charge des solutions de micropyrotechnie du LAAS a l'habitude d'utiliser du propergol composite de type PAG/PA. Pour ce type de matériaux, des travaux antérieurs [1] ont montré qu'une surface de chauffe minimale était nécessaire à sa bonne initiation. Plusieurs surfaces de chauffe ont été testées : $450 \times 450 \mu\text{m}^2$, $540 \times 540 \mu\text{m}^2$, $630 \times 630 \mu\text{m}^2$ et $720 \times 720 \mu\text{m}^2$. La

surface minimale permettant de réaliser l'initiation de manière reproductible, et qui est conservée dans notre système, est $540 \times 540 \mu\text{m}^2$.

Nous avons vu dans le chapitre 2, que la résistance de l'élément chauffant R devait être supérieure à 100Ω pour satisfaire à la condition $R \gg r$, r étant la résistance de dissipation thermique placée en série de la résistance de l'initiateur R.

Pour assurer une compatibilité future avec une électronique de commande, nous visons des tensions de commande maximale entre 1.5V et 12V. Pour notre dimensionnement nous prenons une tension de 10V. Ainsi, pour obtenir des puissances d'initiation de 200mW, qui sont les puissances validées dans des travaux précédents pour des matériaux de type PAG/PA avec des résistances de $540 \times 540 \mu\text{m}^2$ [1], il faut une résistance de 500Ω . Cette valeur reste compatible avec l'utilisation d'une résistance de dissipation thermique de 1Ω .

Le matériau choisi pour la résistance est du polysilicium dopé N par diffusion de phosphore. Sa résistivité est de $\rho = 5.8 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ et l'épaisseur e de la couche est fixée à $0.5 \mu\text{m}$ par les procédés standard du LAAS. On peut donc évaluer le rapport $\frac{L}{l}$, avec L la longueur totale de

la résistance et l sa largeur, pour obtenir 500Ω :

$$\frac{L}{l} = \frac{R \times e}{\rho} = \frac{500 \times 0.5}{5.8} = 43.1$$

Une résistance vérifiant ce critère et occupant une surface de $540 \times 540 \mu\text{m}^2$ a été réalisée et sa géométrie est donnée dans la Figure 30.

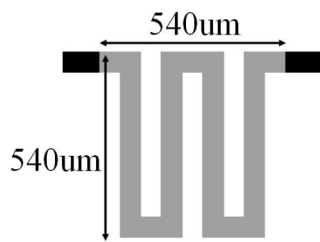


Figure 30. Géométrie de la résistance chauffante du micro-initiateur pyrotechnique.

Pour avoir des performances thermiques optimales, la taille de la membrane doit être adaptée à la taille de l'élément chauffant. Sur les membranes encastrées, le rapport entre le côté de la membrane et celui de l'élément chauffant influence les pertes thermiques de manière logarithmique [2]. Pour un rapport supérieur à 2.6, les performances thermiques ne sont

pratiquement plus améliorées. Nous optons donc pour une membrane carrée de côté 1.5mm, ce qui nous donne pour notre élément chauffant de $540\mu\text{m}$ de côté un rapport de 2.77.

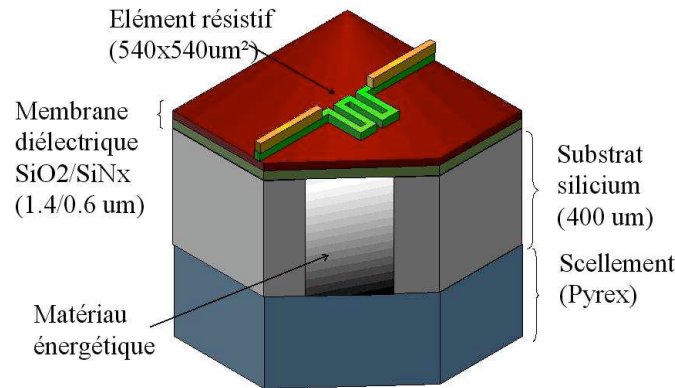


Figure 31. Schéma du micro-initiateur pyrotechnique.

2.1.2 Le matériau énergétique

Dans les initiateurs de type fil chaud, les matériaux pyrotechniques utilisés sont généralement des primaires, qui sont très réactifs. Les plus courants sont le fulminate de mercure, styphnate de plomb et azoture de plomb [3]. Mais ces matériaux sont à accès restreint ce qui nous a poussé à choisir, pour valider le démonstrateur PYROSECURE, un propergol composite disponible PAG/PA. Bien sûr, les temps et les énergies d'initiation obtenus ne seront pas représentatifs de ce que l'on pourrait obtenir avec un matériau primaire bien plus réactif.

2.2. Dimensionnement de l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique

Dans le démonstrateur PYROSECURE réalisé, nous avons fait le choix d'intégrer l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique. Nous ne traitons donc que de ce concept dans cette partie tandis que les détails de dimensionnement de l'interrupteur ON-OFF thermique sont exposés en annexe 1.

La structure de l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique étant basé sur celle du micro-initiateur pyrotechnique, l'élément résistif ainsi que la membrane ont été choisis de la même manière : résistance polysilicium diffusé phosphore de forme en serpentin couvrant une surface de $540 \times 540 \mu\text{m}^2$ sur une membrane de $1.5 \times 1.5 \text{mm}^2$.

Notons que, dans le cas de l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique, le critère de sélection du matériau pyrotechnique est différent de celui de l'initiateur pyrotechnique puisque la propriété essentielle que doit assurer le matériau pyrotechnique est de produire une grande quantité de gaz pour assurer l'éclatement complet de la membrane. De plus cet interrupteur assurant la

désécurisation de l'initiateur pyrotechnique, il convient de choisir un matériau peu sensible pour satisfaire aux conditions de sécurité 1A/1W/5min imposées par la norme [4] sans protection particulière. Un propergol homogène ou composite de type PAG/PA, comme utilisé dans les micro-propulseurs, est donc parfaitement adapté.

Dans le système conçu, la piste à interrompre est placée à 100 μm de l'élément chauffant. Cette distance piste - résistance chauffante n'est pas un point de conception essentiel car les gaz de combustion engendreront la rupture complète de la membrane. On peut aussi envisager de placer la piste directement sur la résistance chauffante avec une couche intermédiaire d'isolant électrique de type SiO_2 ou Si_3N_4 . La piste est réalisée en cuivre et est dimensionnée pour pouvoir soutenir un courant d'au moins 1A conformément à la norme 1A/1W/5min [4]. La densité de courant dans les métallisations en couche mince ne doit pas excéder 10⁶A/cm² pour éviter une dégradation [5], ce qui impose une section de 100 μm^2 pour passer 1A. Nous choisissons un coefficient de sécurité de 3 qui ramène la section à 300 μm^2 soit une piste de 60 μm de large pour 5 μm d'épaisseur.

La Figure 32 présente l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique avec ses principales dimensions.

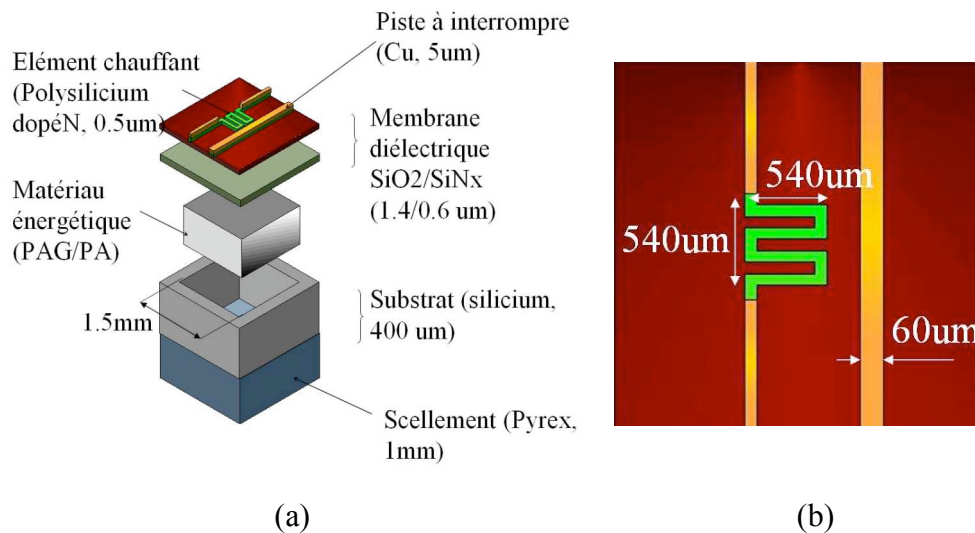


Figure 32. Bilan du dimensionnement de l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique: vue éclatée indiquant les couches et leurs épaisseurs (a), et vue de dessus avec les côtes (b).

Une étude électrothermique par simulation aux éléments finis a été réalisée avec le logiciel MEMCAD pour prévoir les performances de l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique en terme de puissance électrique minimale à appliquer et temps commutation. La puissance à appliquer

pour la commutation correspond à la puissance à appliquer pour chauffer le matériau énergétique à sa température d'initiation (250°C) et le temps de commutation est le temps de chauffe du matériau énergétique jusqu'à sa température d'initiation.

La structure étudiée est la structure de la Figure 32 avec les mêmes dimensions qui y sont présentées. Le substrat occupe une surface de $2.5 \times 2.5 \text{ mm}^2$ avec la cavité de $1.5 \times 1.5 \text{ mm}^2$ centrée.

Les propriétés physiques des matériaux importantes pour les études thermiques sont la conductivité thermique, la chaleur spécifique et la densité des matériaux de structure. Ces caractéristiques sont présentées pour chaque matériau dans le Tableau 4.

	Conductivité thermique k (W/m.K)	Chaleur Spécifique (J/kg.K)	Densité (g/cm ³)
Pyrex (matériau de scellement)	1.4	1000	2.27
Silicium	100	702	2.33
SiO ₂	1.4	1000	2.27
SiN _x	49	1000	2.27
polysilicium	100	700	3.28
Cuivre	398	384.6	8.9
Matériau pyrotechnique	0.04	1850	1.5

Tableau 4. Récapitulatif pour chaque matériau de l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique des propriétés physiques importantes.

Les conditions aux limites choisies pour l'étude de l'interrupteur ON-OFF visent à définir son environnement. On applique donc une différence de potentiel sur le bord des pistes d'alimentation en cuivre pour assurer sa commande. Il faut noter que pour les simulations dynamiques, le logiciel utilisé ne permettant pas de réaliser des études électrothermiques mais seulement thermique, la commande s'effectue sous la forme d'un flux de chaleur appliqué sur l'élément chauffant.

Le métal, très bon dissipateur thermique, est rapidement à température ambiante hors de la zone de chauffe. Pour le modèle les bords des pistes métalliques sont fixés à une température de 22°C. Le dessous de la couche de pyrex faiblement conducteur thermique est aussi fixé à 22°C. Finalement, nous appliquons des pertes par convection sur les surfaces supérieures qui sont en contact avec l'air ambiant (22°C). Le coefficient de convection h est fixé à

125W/m².K. Cette valeur a été validée lors d'études antérieures sur les plateformes chauffantes sur membrane SiO₂/SiN_x [5].

La Figure 33 reprend la géométrie de l'interrupteur ON-OFF qui a été simulée ainsi que les conditions aux limites appliquées.

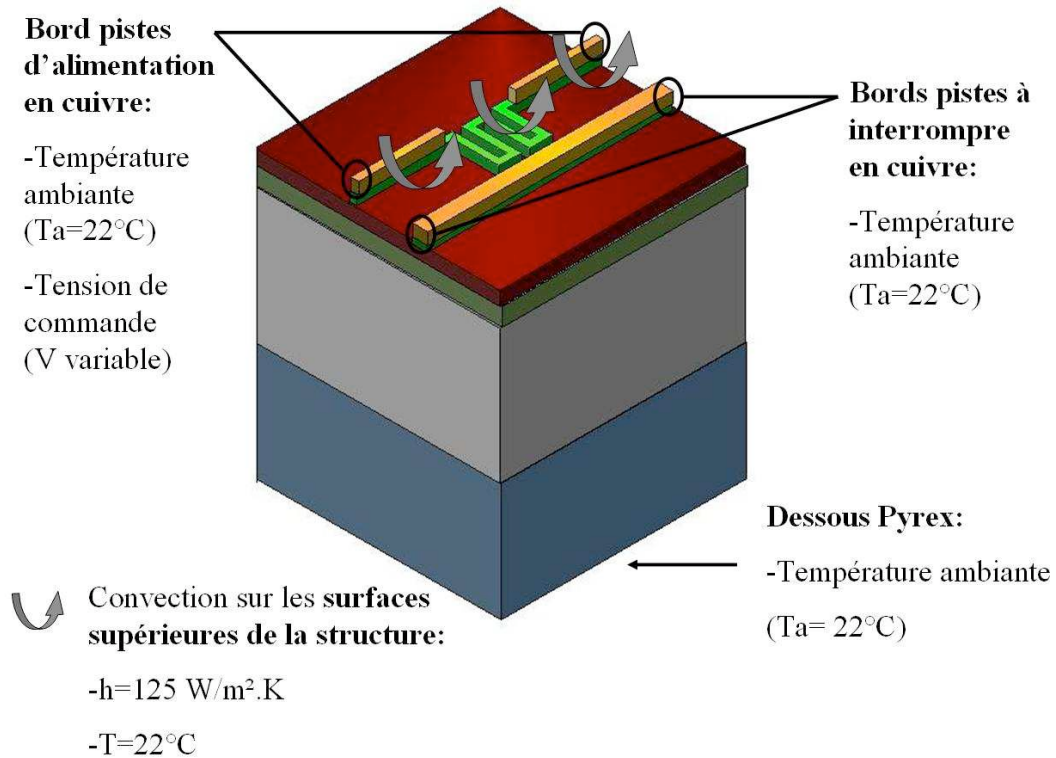


Figure 33. Géométrie et conditions aux limites utilisées pour la simulation de l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique.

La Figure 34 récapitule les résultats des simulations électrothermiques de l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique. Pour atteindre la température d'initiation du matériau énergétique fixée à 250°C, il faut au minimum appliquer une puissance de 65mW (cf Figure 34(a)). En dessous de cette valeur le matériau énergétique n'est pas initié et la commutation ne peut être réalisée. L'interrupteur ON-OFF pyrotechnique étant un système à actionnement thermique, ses performances en terme de vitesse de commutation sont fortement liées à la puissance appliquée, ce qui est confirmé par la courbe théorique de commutation (cf Figure 34(b)). Les temps de commutations sont compris entre 72 ms pour 150mW et 14ms pour 500mW. Ces valeurs seront validées par des caractérisations expérimentales effectuées au chapitre 4.

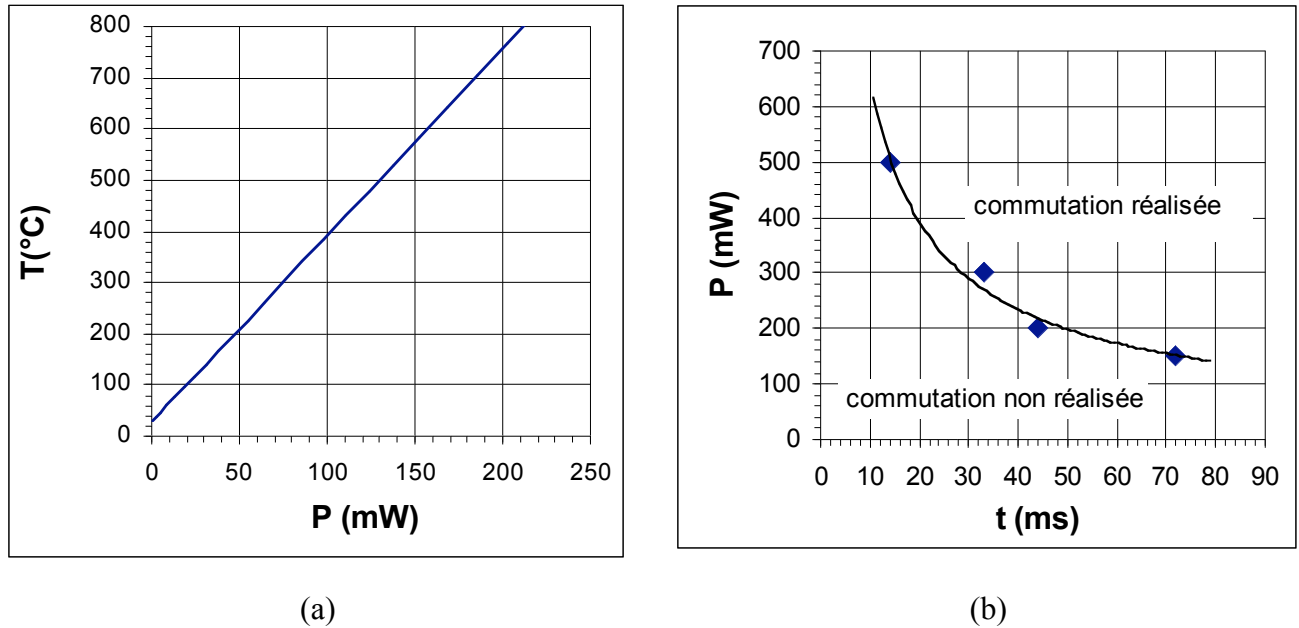


Figure 34. Résultat des simulations de l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique : température maximale au niveau de l'élément chauffant (a) et temps de commutation (b) en fonction de la puissance appliquée.

2.3. Dimensionnement de l'interrupteur OFF-ON

L'interrupteur OFF-ON se compose d'une plateforme chauffante pour la commande thermique sur laquelle sont déposées 2 pistes en cuivre à connecter, une couche de colophane et une bille Sn/Pb. La colophane ainsi que les billes de brasure Sn/Pb nous ont été fournies par NOVATEC.

La plateforme chauffante consiste en une résistance chauffante en polysilicium dopé N sur une membrane diélectrique $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$, comme pour le micro-initiateur et l'interrupteur ON-OFF. La forme de la résistance choisie est un carré de $690 \times 680 \mu\text{m}^2$ permettant d'avoir d'une part une épaisseur de piste constante sur la zone de brasure mais aussi de chauffer des billes de brasure Sn/Pb de $350 \mu\text{m}$ de diamètre. Un trou au centre de la résistance de $150 \times 150 \mu\text{m}^2$ permet d'augmenter la valeur de la résistance et donc de limiter les niveaux de courants sans perturber la planéité de la zone de brasure. La Figure 35 donne la forme et les dimensions des résistances de l'interrupteur OFF-ON. La forme triangulaire de la résistance pour rejoindre les contacts permet de limiter le point chaud au niveau du passage de la zone de conduction métallique en cuivre à la zone résistive en polysilicium comme le montre les simulations rapportées dans le Tableau 5 qui compare des géométries avec et sans amenées de courant oblique.

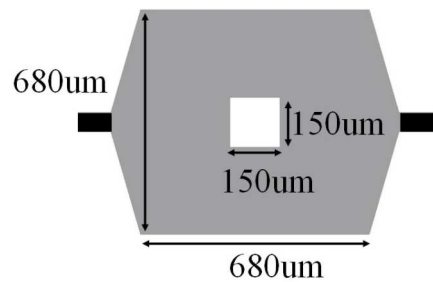


Figure 35. Géométrie de la résistance chauffante de l'interrupteur OFF-ON.

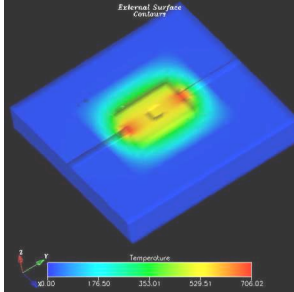
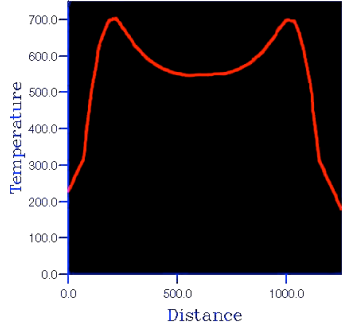
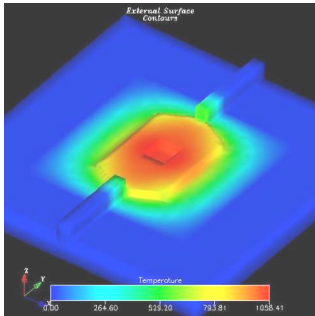
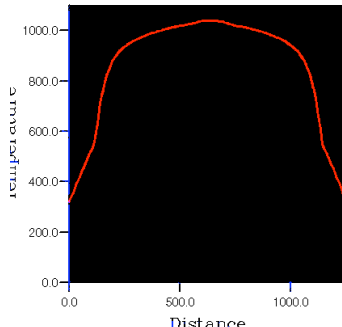
	Vue tridimensionnelle de la géométrie avec répartition de la température	Profil de température suivant Profil de température suivant l'axe de passage du courant
Résistance sans amenés de courant obliques 		
Résistance avec amenés de courant obliques 		

Tableau 5. Comparaison des performances thermiques de deux types de résistances.

Le choix de la forme des pistes à connecter et leur dimension (épaisseur, surface) a fait l'objet d'études expérimentales. En effet lors du chauffage, il faut s'assurer que la bille Sn/Pb en fusion s'étale et reste sur les deux pistes. Or la mouillabilité du Sn/Pb sur le cuivre de pistes peut guider la bille hors de la zone d'interconnexion, ce qu'il faut éviter si l'on veut avoir interconnexion.

Ainsi plusieurs géométries de pistes de 60 μm de large ont été réalisées avec un espacement entre les deux pistes de 100 μm (cf Figure 36). Une bille de Sn/Pb a été placée dessus et nous

avons observé et testé quelles géométries permettaient d'obtenir une brasure sur les deux pistes avec une très bonne reproductibilité (100%).

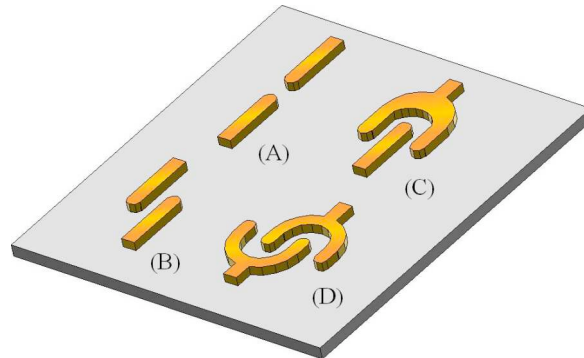


Figure 36. Géométrie des pistes testées lors de la conception de l'interrupteur OFF-ON.

Géométrie	(A)	(B)	(C)	(D)
Étalement sur les deux pistes (%)	<90	<90	100	100

Tableau 6. Tableau récapitulatif des tests d'étalement effectués sur différentes géométries de pistes.

Les résultats obtenus résumés dans le Tableau 6 montrent que les géométries de type « doigt interdigités » qui tendent à augmenter les surfaces en regard (C et D) sont préférables aux pistes simples (A et B) pour lesquelles la bille ne s'étale pas toujours sur les deux pistes. Pour les géométries C et D, les tests montrent, que lors de la fusion, la bille se recentre toujours sur la zone d'interruption et cela même si la bille est, de manière volontaire, initialement décalée. La seule différence notée entre ces deux géométries intervient uniquement au niveau de la position finale de la bille : pour la géométrie C, la bille est toujours au centre tandis que pour la géométrie D, elle peut occuper deux positions suivant sa position initiale sans gêner le fonctionnement (cf Figure 37). Nous avons donc choisi la géométrie C qui est plus compacte.

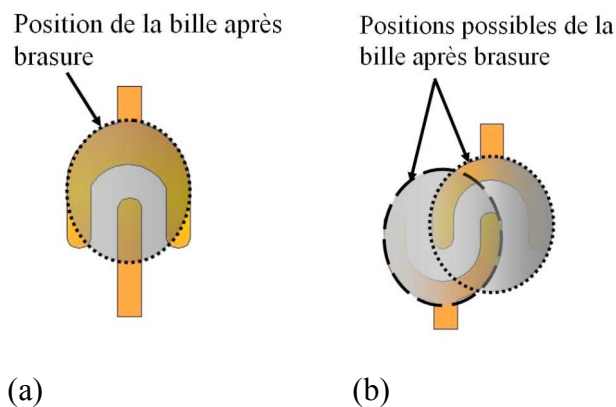


Figure 37. Positions occupées par la bille après soudure pour la géométrie C (a) et D (b).

Le deuxième paramètre important est l'épaisseur des pistes en cuivre à connecter. Si l'épaisseur est insuffisante, la dissolution de la piste en cuivre lors du processus de brasure peut conduire à une déplétion complète de la piste métallique et une interruption électrique. Ainsi plusieurs épaisseurs de cuivre ont été réalisées (0.5 μm , 1 μm , 3 μm , 5 μm et 7 μm) et les brasures avec les billes de Sn/Pb testées. Les temps de brasure appliqués sont de plusieurs secondes pour se positionner dans le cas le plus défavorable. Pour valider la formation de l'intermétallique qui est l'indicateur de brasure, on réalise, pour chacune des épaisseurs, une coupe de la bille à la scie diamantée et on observe l'interface Cu-SnPb avec un MEB (Microscope Electronique à Balayage) JEOL 840A. Un exemple de cliché obtenu est donné à la Figure 38 qui montre une brasure réalisée à une puissance de 200mW pendant 15s.

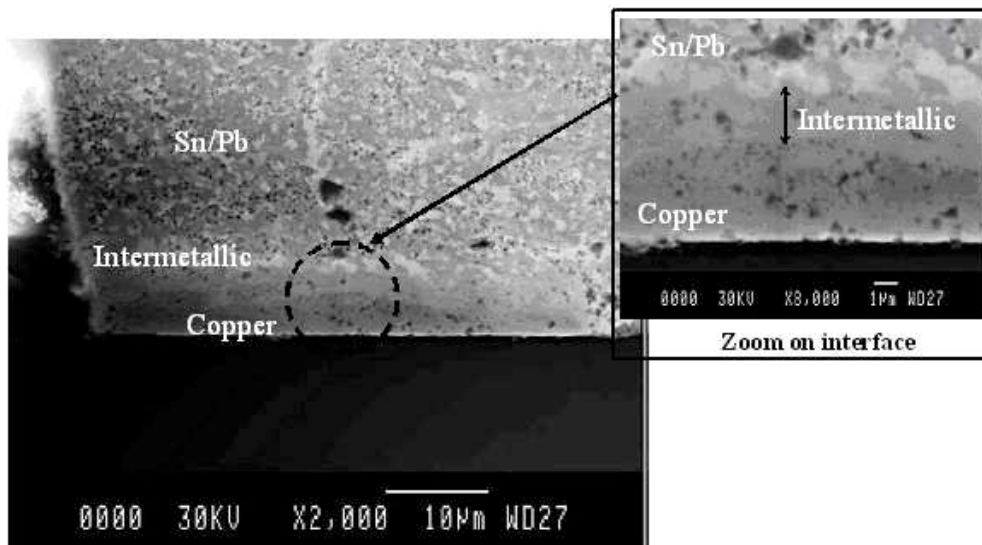


Figure 38. Photographie d'un intermétallique réalisée avec un MEB (brasure réalisée à 200mW pendant 15s).

Les résultats montrent que pour une épaisseur de 1 μm l'opération de brasure conduit à une déplétion totale du cuivre et une interruption électrique, tandis qu'avec une épaisseur de piste supérieure à 3 μm , une couche d'intermétallique est observée et la connexion est réalisée. La limite se situe donc entre 1 μm et 3 μm d'épaisseur. On choisit donc l'épaisseur directement supérieure, à savoir 5 μm , pour avoir une brasure de qualité mais aussi pouvoir passer un courant de plus de 1A pour respecter la norme 1A/1W/5min [4].

En résumé, les pistes à connecter seront en cuivre, d'épaisseur 5 μm et de largeur 60 μm avec la géométrie C de la Figure 36.

La Figure 39 présente l'interrupteur OFF-ON avec ses principales côtes.

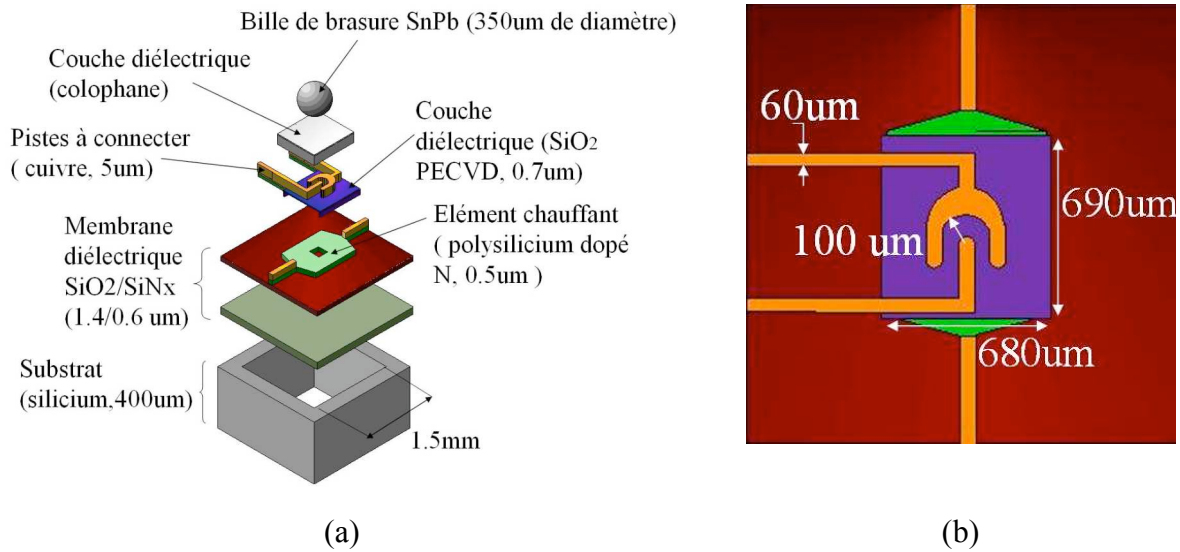


Figure 39 Bilan du dimensionnement de l'interrupteur OFF-ON: vue éclatée indiquant les couches et leurs épaisseurs (a), et vue de dessus avec les côtes (b).

Comme pour l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique détaillé dans la partie précédente, nous avons validé le fonctionnement de l'interrupteur OFF-ON par des simulations aux éléments finis réalisées avec le logiciel MEMCAD. Le mécanisme mis en jeu lors de la commutation de l'interrupteur OFF-ON implique des changements de phases (solide-liquide) qui ne peuvent être décrits à l'aide de l'outil utilisé. On se limite donc à une étude électrothermique statique qui permet d'évaluer la puissance minimale à appliquer pour atteindre la température de fusion de la bille de 350µm de diamètre.

La structure étudiée est la structure complète telle qu'elle a été conçue (cf Figure 39). Le substrat occupe une surface de 2.5×2.5mm² avec la cavité de 1.5×1.5mm² centrée. Le logiciel ne permet pas de réaliser la géométrie de la bille de brasure de 350µm de diamètre qui est donc remplacée par un cube de 280µm de côté pour avoir le même volume. Pour se rapprocher des conditions réelles de fabrication, où la colophane n'est pas localisée sur la résistance chauffante mais a tendance à s'étendre sur la membrane, on recouvre toute la surface de la membrane sur une épaisseur de 50µm ce qui est équivalent à un volume de 11µL correspondant aux mesures effectuées lors de tests de dépôt de gouttes.

Les conductivités thermiques de la bille de brasure Sn/Pb ainsi que celles de la colophane sont données dans le Tableau 7 qui complète les données du Tableau 4.

	Conductivité thermique k (W/m.K)
Sn/Pb	1.4
Colophane	0.2

Tableau 7. Récapitulatif des propriétés physiques de la bille de brasure (Sn/Pb) et de la colophane.

Les conditions aux limites choisies pour l'étude de l'interrupteur OFF-ON visent à définir son environnement et restent relativement proches de celles de l'interrupteur ON-OFF. On applique ainsi une différence de potentiel sur le bord des pistes d'alimentation en cuivre. Une température constante de 22°C est appliquée sur le bord des pistes métalliques. Le dessous de la structure est fixé à une température constante de 22°C. Comme le silicium est fortement conducteur thermique et pour que cette condition ne soit pas trop contraignante sur la répartition thermique on utilise une couche d'interface en pyrex, de même dimension que celle de l'interrupteur ON-OFF. Des pertes par convection ($h=125\text{W/m}^2.\text{K}$) sont appliquées les couches supérieures et les bords de la bille de brasure. La Figure 40 reprend la géométrie de l'interrupteur OFF-ON qui a été simulé ainsi que les conditions aux limites appliquées. Pour des raisons de lisibilité la colophane ne recouvre, dans ce schéma, que la surface de la résistance en polysilicium.

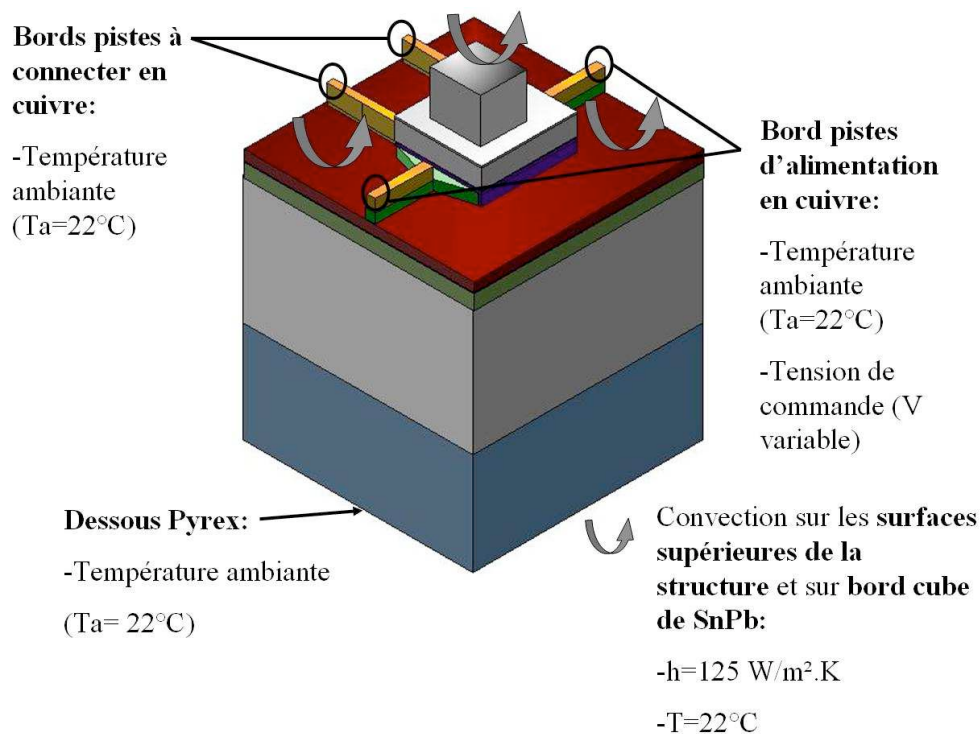


Figure 40. Géométrie et conditions aux limites utilisées pour la simulation de l'interrupteur OFF-ON.

Les résultats des simulations sont présentés à la Figure 42. On indique sur ce graphe la température sur la résistance chauffante et au centre du cube qui représente la bille de brasure Sn/Pb(cf Figure 41).

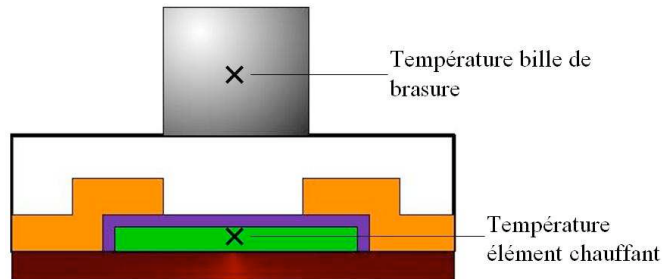


Figure 41. Position des points de mesure de la température.

A l'intérieur de la bille, l'écart de température est faible du fait de sa très bonne conductivité thermique : les simulations ont montré que l'écart de température entre le bas de la bille situé près de la source de chaleur et le haut est inférieure à 1%. Sur la Figure 42, qui indique la température en fonction de la puissance appliquée, on n'indique donc, pour la bille de brasure, que sa température au centre. L'écart de température entre les deux courbes de température (au centre de la bille et sur la résistance chauffante) est dû à la présence de la colophane qui a une très faible conductivité thermique. Pour avoir une température supérieure à la température de fusion du Sn/Pb au centre de la bille de brasure, il faut appliquer environ 170mW. Pour cette puissance, l'élément chauffant est à 225°C.

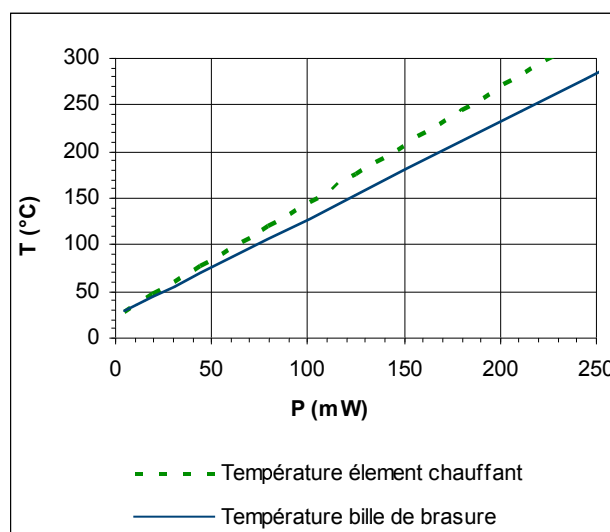


Figure 42. Température au niveau de l'élément chauffant et de la bille de brasure en fonction de la puissance appliquée.

2.4. Dimensionnement de PYROSECURE

Le démonstrateur réalisé reprend l'architecture qui a été présentée au chapitre 2, à la différence près qu'il n'intègre pas la résistance de dissipation thermique qui ne constitue pas un verrou technologique. La Figure 43 présente le système tel qu'il a été conçu et réalisé.

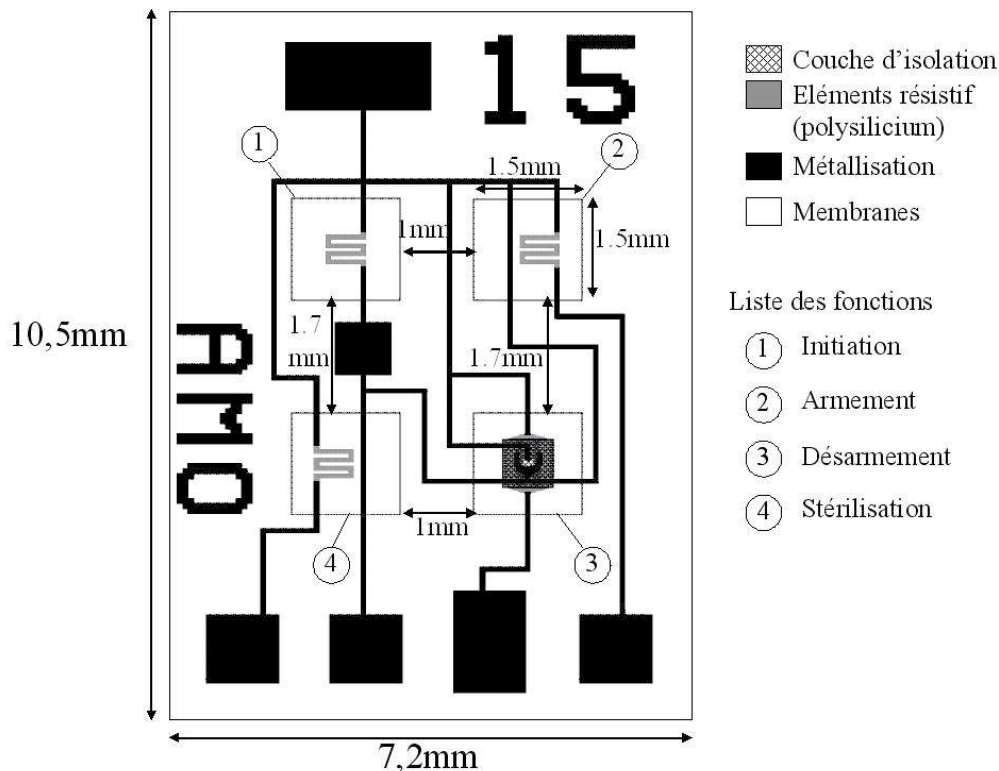


Figure 43. Schéma du micro-initiateur réalisé tel qu'il apparaît avant remplissage des cavités et dépôt de la bille de brasure.

On y retrouve :

- le micro-initiateur,
- deux interrupteurs ON-OFF pyrotechniques assurant les fonctions armement et stérilisation,
- un interrupteur OFF-ON assurant la fonction désarmement.

Ces quatre composants reprennent une même base technologique qui est celle d'un élément chauffant sur membrane initiant un matériau pyrotechnique ou venant faire fondre une bille de brasure. L'utilisation du cuivre est imposée par l'interrupteur OFF-ON pour permettre la réalisation de la micro-brasure mais ses très bonnes caractéristiques électriques sont aussi avantageuses pour tous les autres composants. Ce soucis permanent de compatibilité et ceci

dés l'étape de conception, a pour but d'anticiper au maximum les problèmes liés à l'intégration.

L'implantation de ces composants sur la puce s'est faite de manière à avoir un espacement entre les composants de 500µm, distance en dessous de laquelle peuvent avoir lieu des initiations intempestives par transfert thermique d'une cavité à l'autre [1]. **La surface globale du micro-initiateur est de l'ordre de 1cm² mais elle pourrait être fortement réduite.** Cette taille est toutefois conservée pour permettre une manipulation plus aisée de l'échantillon lors des tests. Elle respecte toutefois la contrainte d'encombrement maximal de 1cm³ que nous nous sommes fixé au départ, attendu que le substrat a une épaisseur de 400µm auquel on ajoute la couche de scellement en pyrex de 1mm.

3. Le procédé de fabrication du démonstrateur PYROSECURE

Nous avons précédemment considéré les constituants du microsysteme PYROSECURE et les procédés unitaires qui pouvaient être envisagés pour leur réalisation. Nous allons maintenant considérer le procédé de fabrication global qui doit être collectif. Collectif signifie que tous les constituants sont réalisés ensemble dans un même procédé de fabrication. Cette méthode devenue classique avec la microélectronique, présente deux grands avantages :

- Celui de baisser les coûts, du fait que les systèmes sont réalisés en grande quantité sur une même plaque de silicium. En l'occurrence nous pouvons envisager réaliser plusieurs dizaines de dispositifs sur des plaques de 4pouces. On peut souligner ici l'intérêt de la miniaturisation qui multiplie le nombre de cellules fabriquées par plaque. Dans le cadre de notre application, cet avantage est toutefois à relativiser du fait du volume de production réduit des systèmes d'initiation.
- Celui d'améliorer la fiabilité, par le fait d'intégrer les interconnexions que l'on sait source de défaillance du fait de problèmes de contacts.

Evidemment, aujourd'hui l'ont ne peut être totalement collectif et il reste des opérations manuelles, dites d'assemblage, qui sont sources de défaillances potentielles. Des études sont en cours, pour les intégrer au procédé collectif. En particulier, on est à la recherche de :

- Procédés de dépôts de matériaux pyrotechniques en couche mince,
- Procédés d'interrupteurs OFF-ON en couches minces et miniaturisés.

Le démonstrateur PYROSECURE a été réalisé intégralement au LAAS-CNRS avec les limitations exposées liées à la présence d'opération manuelles. Le procédé de fabrication du démonstrateur qui va être exposé à un double rôle :

- Il reprend les étapes propres à la réalisation du micro-initiateur et des micro-interrupteurs ON-OFF pyrotechnique et OFF-ON. Dans ce sens il permet de connaître les différentes étapes de réalisation de chaque composant.
- Il définit la succession des étapes à appliquer dans le cadre de l'intégration de l'ensemble de ces composants au sein d'un même substrat, pour fabriquer PYROSECURE.

La réalisation met en jeu 4 masques qui sont donnés en annexe 2.

En ce qui concerne l'interrupteur ON-OFF thermique, non intégré dans ce démonstrateur, ses étapes de fabrication sont présentées en annexe 1.

3.1. Les étapes micro technologiques

Le substrat utilisé est un substrat silicium de 400 μ m d'épaisseur, poli double face et d'orientation (100). Le type de dopage et la résistivité du substrat n'ont pas d'importance dans le cadre de notre procédé technologique puisqu'il ne sert que de support. En l'occurrence, nous avons utilisé un dopage de type P avec une résistivité de 10-12 Ω .cm.

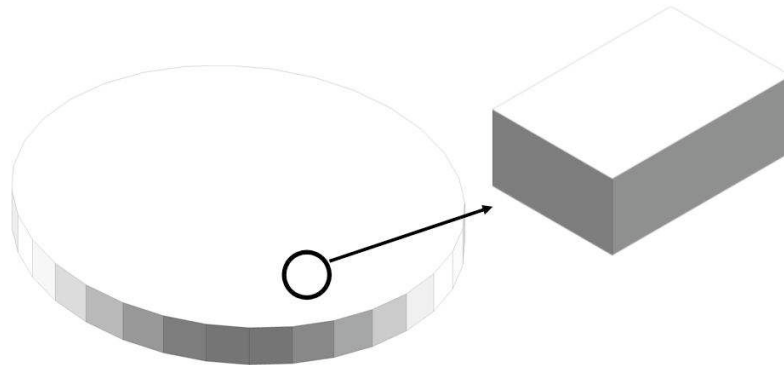


Figure 44. Substrat de silicium servant de support à la réalisation du démonstrateur PYROSECURE

Après nettoyage de la plaque, le silicium est d'abord oxydé thermiquement dans un four à 1150°C sur une épaisseur de 1.4 μ m.

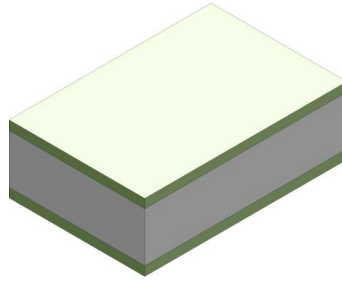


Figure 45. Substrat après dépôt du SiN_x.

Une couche de SiN_x de 0.6µm est ensuite déposée par LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) à 705°C (cf Figure 46).

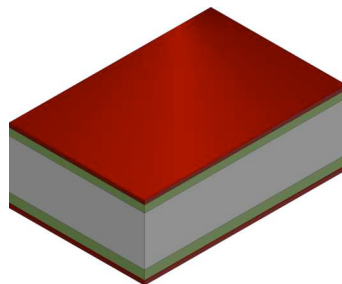


Figure 46. Substrat après dépôt du SiN_x.

Une couche de 0.5µm d'épaisseur de polysilicium est ensuite déposée par LPCVD à 605°C. Cette couche est ensuite dopé N par diffusion de phosphore (cf Figure 47). Cette étape se fait grâce à un oxyde dopant de P₂O₅ que l'on fait croître sur le polysilicium. L'épaisseur de cet oxyde est de 80nm avec deux tiers formés en surface du polysilicium et un tiers dans le polysilicium. L'épaisseur de polysilicium est donc réduite d'environ 30nm. La résistivité du polysilicium visée est de $5.8 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$.

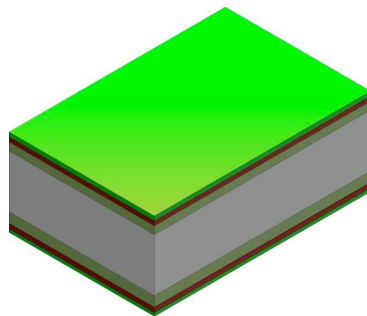


Figure 47. Substrat après dépôt et dopage du polysilicium.

Le polysilicium est ensuite gravé par RIE (Reactive Ionic Etching) en utilisant un masquage de résine positive AZ1529 de 2.8µm d'épaisseur révélées dans bain d'AZ developer (50mL d'EDI et 50mL d'AZ developer). Les formes des parties résistives sont définies par le

masque 1 (cf Annexe 2). Après gravure RIE, la résine est enlevée par nettoyage d'acétone puis bain de mélange sulfurochromique (cf Figure 48).

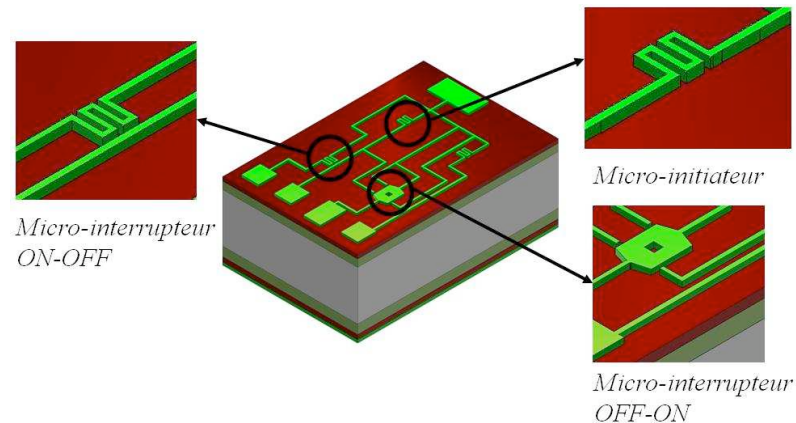


Figure 48. Substrat après gravure RIE du polysilicium.

Une couche $0.7\mu\text{m}$ de SiO_2 faiblement contrainte est déposée par PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition). L'oxyde est ensuite gravé par buffer HF tampon au travers du masque 2 de résine AZ1529 (cf Annexe 2) pour définir les plots de SiO_2 au niveau de l'élément chauffant de l'interrupteur OFF-ON. La résine est ensuite retirée par nettoyage d'acétone puis bain de mélange sulfurochromique.

Le rôle de cette couche d'oxyde est d'empêcher le court circuit lors du croisement des pistes et l'épaisseur de $0.7\mu\text{m}$ est choisie pour s'assurer d'un très bon recouvrement de la résistance en polysilicium de $0.5\mu\text{m}$ d'épaisseur.

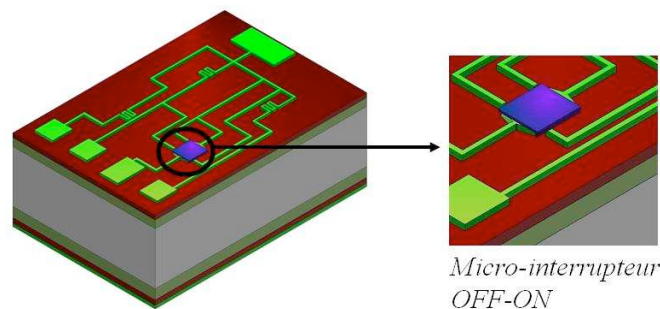


Figure 49. Substrat après dépôt du plot de SiO_2 PECVD sur la résistance de l'interrupteur OFF-ON.

L'étape suivante consiste à réaliser les pistes métalliques en cuivre de $5\mu\text{m}$ par dépôt électrolytique qui permet d'atteindre de fortes épaisseurs tout en ayant un niveau de contraintes dix fois moins important que pour le dépôt de la même couche avec des techniques d'évaporation (10MPa environ pour le cuivre électrolytique contre 100MPa pour le cuivre par évaporation). Le bain électrolytique utilisé est un bain MicrofabCu200 de

Polyclad. La plaque est reliée à la cathode, sur laquelle est réalisé le dépôt, tandis qu'une cible en cuivre, qui est consommée, est reliée à l'anode et le dépôt est réalisé avec une densité de courant de 0.75A/dm^2 . Pour améliorer l'adhérence du cuivre sur le polysilicium, on dépose une couche d'accrochage titane/or (200/800nm) par évaporation sur toute la plaque. L'or qui est la base de croissance de cuivre est gravé chimiquement dans un bain de KI+I2 après masquage avec une résine 5214 inversible et n'est conservé que sur les zones de croissance de cuivre et sur la périphérie de la plaque ce qui permet d'améliorer le contact électrique lors de la polarisation de la plaque. Le titane est conservé sur toute la plaque car il permet d'améliorer l'homogénéité du potentiel et donc du dépôt entre l'extérieur et le centre de la plaque. Pour définir les zones de croissance du cuivre, un moule de résine AZ4562 de $10\mu\text{m}$ d'épaisseur est réalisé (cf masque3 en annexe 2). Un flash d'or de 300nm d'épaisseur est ensuite déposé sur le cuivre électrolytique pour empêcher son oxydation. L'or électrolytique présente la caractéristique de ne se déposer que sur le cuivre électrolytique ce qui ne nécessite aucun masquage particulier. Pour finir, la couche de titane est enlevée par attaque chimique au buffer HF sur toutes les zones sans cuivre (cf Figure 50).

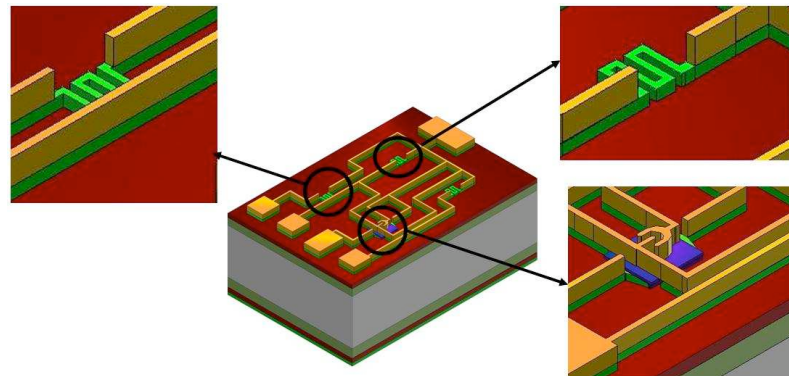


Figure 50. Substrat après croissance électrolytique du cuivre.

Une fois les étapes face avant réalisées, les couches face arrière de polysilicium, de SiN_x et de SiO_2 en face arrière sont enlevées par RIE (cf Figure 51).

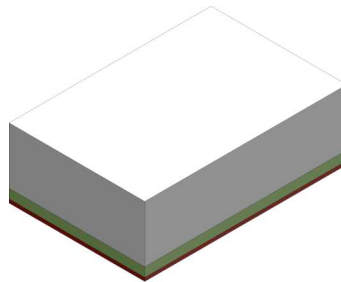


Figure 51. Substrat après gravure RIE face arrière des couches de polysilicium/ SiN_x / SiO_2 .

L'étape suivante consiste à graver des cavités sous les éléments chauffants : on parle de libération des membranes SiO_2 / SiN_x . Cette étape consiste à réaliser une gravure profonde du substrat de silicium en partant de la face arrière pour s'arrêter sur la couche d'oxyde thermique de la face avant (cf Figure 52). Nous avons choisi une méthode de gravure par DRIE (Deep Reactive Ion Etching), qui permet d'avoir des flancs verticaux contrairement aux gravures humides anisotropiques, et donc une meilleure intégration. La DRIE est effectuée en utilisant un gaz SF_6 et en alternant de manière cyclique avec une phase de passivation. Cette phase consiste à déposer une couche inhibitrice utilisant le gaz C_4F_8 pour éviter la gravure latérale et obtenir des flancs verticaux. La vitesse de gravure du silicium est comprise entre 3 et $3.3\mu\text{m}/\text{min}$. Ce temps varie avec la surface totale à graver, la géométrie des ouvertures ainsi que leur disposition sur la plaque et nécessite donc un étalonnage à l'aide d'un substrat témoin.

Pour cette gravure, on enduit la face arrière de la plaque avec une résine épaisse AZ4562 de $10\mu\text{m}$. les ouvertures des zones à graver sont réalisées par insolation aux ultra violets, puis révélation de la résine dans un bain d'AZdevelopper 400K (20mL AZ400K pour 70mL d'eau) avec le masque 4 (Annexe 2). La révélation se fait cycliquement par bain de 30s puis rinçage à l'eau jusqu'à voir apparaître la surface de silicium. Le rinçage cyclique permet d'éviter un écroulement des flancs de résine et donc une modification des côtes définies par le masque.

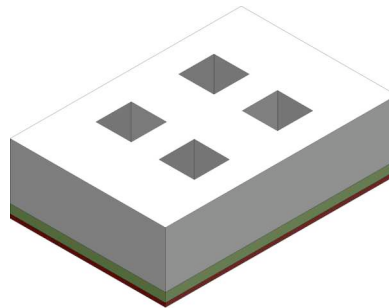


Figure 52. Substrat après gravure DRIE en face arrière.

La Figure 53 présente une vue du système après libération des membranes.

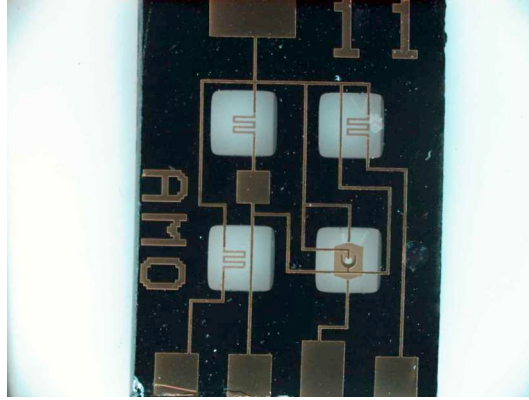


Figure 53. Photo d'un micro-initiateur sécurisé PYROSECURE après libération des membranes.

3.2. Les étapes d'assemblage

Après avoir réalisé l'ensemble des étapes décrites précédemment, le substrat est clivé en cellules individuelles PYROSECURE. Il s'en suit les étapes d'assemblage qui consistent à venir successivement déposer la bille de Sn/Pb pour l'interrupteur OFF-ON puis remplir de matériau pyrotechnique les cavités des interrupteurs ON-OFF pyrotechniques et de l'initiateur.

3.2.1 Le dépôt de la bille Sn/Pb

Le dépôt de la bille de l'interrupteur OFF-ON se fait en deux phases. Dans un premier temps, la colophane qui vient faire l'interface entre les pistes et la bille est déposée par stamping (cf Figure 54).

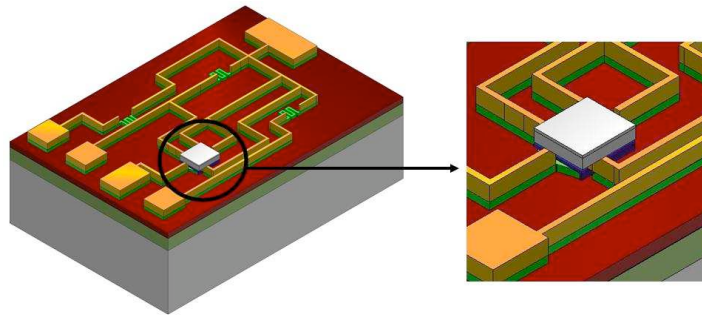


Figure 54. Dépôt de la colophane sur la zone de brasure de l'interrupteur OFF-ON.

La technique de stamping consiste à venir prélever le produit à déposer par trempage d'une aiguille puis, par contact, le reporter sur la zone désirée. La quantité déposée dépend de la géométrie de l'aiguille, de la viscosité du produit et de la durée d'application lors du report. C'est une technique qui ne fonctionne que pour des produits à l'état liquide ou bien visqueux. En effet, ce sont les forces de capillarité qui permettent l'accroche sur l'aiguille puis le transfert sur le substrat lors du contact. La colophane étant solide à température ambiante, le

substrat ainsi que le réservoir de colophane sont portés au delà de sa température de fusion , qui est, pour la colophane utilisée, 83°C. L'aiguille est ensuite trempée dans la colophane liquide. Lorsqu'elle est retirée, la goutte de colophane accrochée se refroidit directement au contact de l'air et devient solide. Lors du contact avec le substrat chauffé, elle se liquéfie de nouveau et peut donc s'étaler.

Après des tests de mise au point du dépôt, nous utilisons une aiguille de dépose de dosage2000 de diamètre intérieur de 0.20mm et extérieur de 0.41mm et la température de chauffage est de 150°C, ce qui permet d'avoir une viscosité de colophane optimisée. Pour une température plus faible, on a une viscosité qui entraîne la création de fils parasites, se refroidissant au contact de l'air, entre le réservoir et l'aiguille de stamping. Pour une température plus élevée, la viscosité se réduisant, la quantité de colophane déposée est faible et elle s'évapore de manière trop rapide.

La bille de 350µm de diamètre est ensuite déposée sur la colophane à l'état liquide à l'aide d'une pince. Par capillarité, la colophane remonte sur la bille. Pour la température choisie, elle n'est toutefois pas assez liquide pour recouvrir toute la bille. Une fois la bille déposée, la température est augmentée légèrement jusqu'à que la colophane soit assez liquide pour remonter par capillarité et recouvrir totalement la bille. Ceci à un double rôle à la fois de protection de la bille ainsi que de maintien mécanique. Finalement le substrat est remis à température ambiante, la colophane se solidifie emprisonnant la bille.

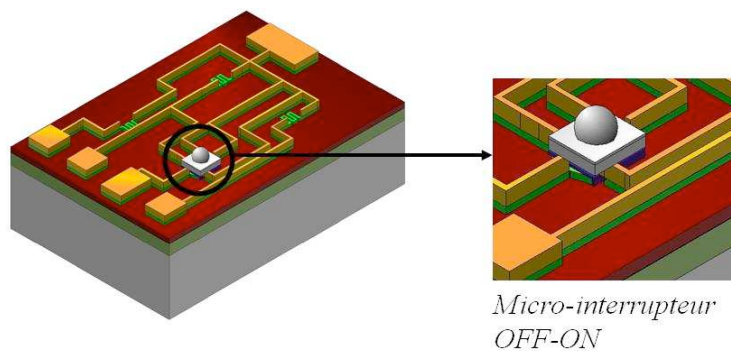


Figure 55. Dépôt de la bille de Sn/Pb sur la zone de brasure de l'interrupteur OFF-ON.

3.2.2 Le remplissage des cavités avec PAG/PA

Les cavités des initiateurs et interrupteurs ON-OFF pyrotechniques sont ensuite remplies avec le matériau énergétique.

Une première solution consiste à venir remplir les cavités avec un matériau liquide qui est ensuite réticulé. Ce dépôt peut se faire par seringue ou bien encore par sérigraphie. Cette dernière est une technique plus adaptée à une fabrication collective et a donné lieu au développement d'un dispositif spécifique de remplissage de cavités par matériaux pyrotechniques par la société NOVATEC dans le cadre du projet Micropyros [6]. Cette technique consiste à venir reporter sélectivement dans les cavités le matériau pyrotechnique à l'aide d'un masque en mylar. Avant de remplir les cavités, on fait le vide dans celles-ci. La différence de pression entre le réservoir de matériau (Pression atmosphérique) et les cavités pousse le matériau énergétique dans les cavités. Le matériau utilisé est un PAG/PA liquide avant réticulation à 60°C, et solide ensuite.

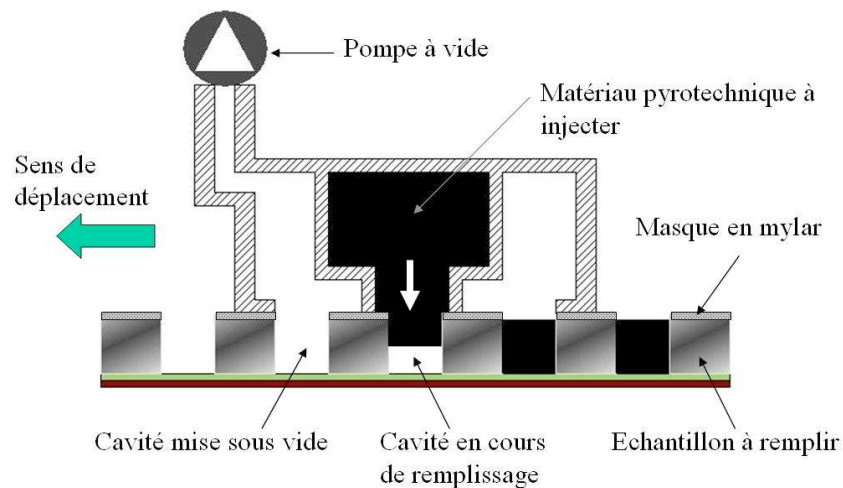


Figure 56. Schématisation du principe de fonctionnement du dispositif de remplissage par sérigraphie.

Une autre méthode de remplissage consiste à prendre un matériau énergétique solide et découpé aux dimensions de la cavité. Il est ensuite collé sous la membrane, au contact de la résistance chauffante. La colle utilisée est une colle époxy H70E fabriquée par Epotek [7].

Cette méthode de remplissage impose un remplissage individuel des cavités, ce qui n'est pas adapté à une fabrication collective. Toutefois elle a été choisie pour nos démonstrateurs car elle est plus simple à mettre en œuvre lorsque le nombre d'échantillons est faible (<10) : pas de masque à fabriquer, pas de procédé à mettre au point. Il faut toutefois faire la découpe du matériau pyrotechnique avec soin pour être reproductible ce qui n'a pas été un problème aux dimensions qui sont les nôtres (1.5×1.5mm²).

Une goutte de colle est donc déposée sous la membrane puis le matériau énergétique est reporté dans la cavité (cf Figure 57).

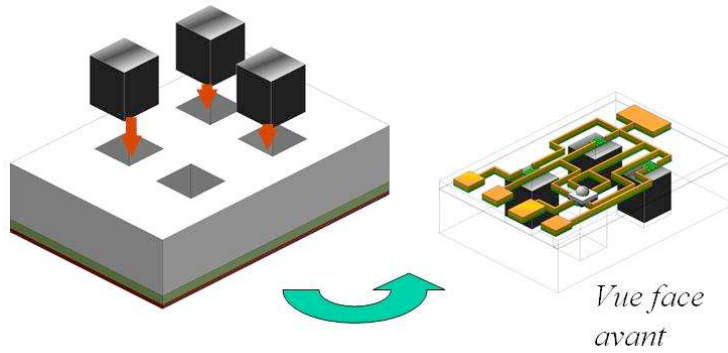


Figure 57. Remplissage des cavités avec du PAG/PA à l'état solide.

Enfin, une plaque en pyrex de la taille de l'échantillon vient sceller les cavités par collage à la colle époxy H70E [8] (cf Figure 58). Pour éviter toute fuite de gaz de combustion d'une cavité à une autre, ce qui risque d'initier accidentellement le matériau, il faut prendre soin d'entourer chaque cavité d'un cordon de colle. Cette solution de scellement est peu coûteuse et assure une tenue mécanique de 30 bars après réticulation à 60°C pendant 15 heures [8].

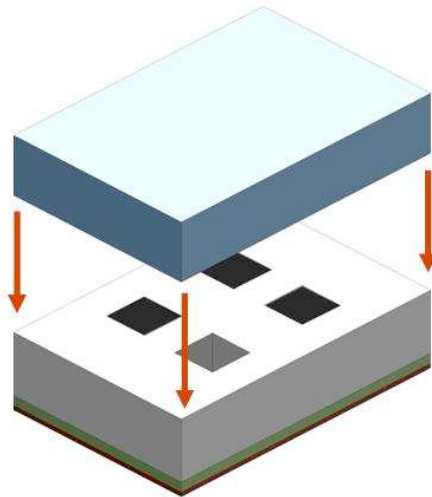


Figure 58. Scellement des cavités par collage d'une plaque de pyrex.

La Figure 59 et la Figure 60 donne un aperçu du démonstrateur PYROSECURE en fin de fabrication.

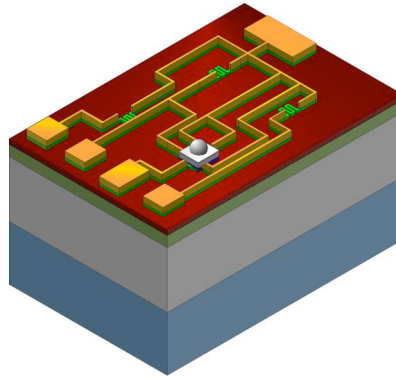


Figure 59. Schéma du démonstrateur PYROSECURE en fin de fabrication.

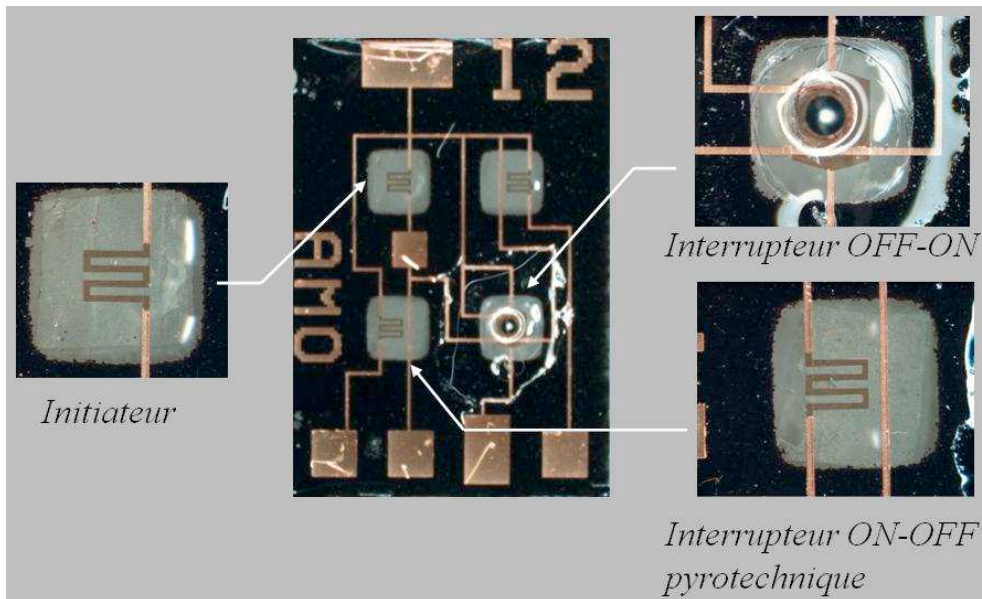


Figure 60. Photographie du démonstrateur du micro-initiateur PYROSECURE en fin de fabrication.

4. Vérification dimensionnelle et évaluation des conséquences

Qualifier un procédé de fabrication consiste à s'assurer qu'il remplit les exigences de performance, de rendement et de fiabilité, définies dans le cahier des charges :

- S'agissant des performances, celles-ci seront exposées dans le chapitre 4 consacré à la caractérisation du microsystème PYROSECURE.
- S'agissant du rendement de production et de la fiabilité, ce sont des caractéristiques que l'on doit évaluer de manière précoce, au stade des choix technologiques et de prototypage virtuel.

Ce dernier point est un sujet de recherche de grande actualité qui a donné lieu au LAAS à une proposition d'évaluation par la physique des défaillances et l'établissement d'un « prototypage virtuel fiabilité » [9]. Ce prototypage virtuel incluant la fiabilité consiste à intégrer dans un même modèle les aspects fonctionnels (modélisation logique de la proposition faite au chapitre 2) et la représentation des mécanismes de défaillance du système. Nous reviendrons sur les aspects fonctionnels au chapitre 4. Dans cette partie, nous considérerons les mécanismes pouvant, soit être responsables de mauvais rendements de production, soit être responsables à terme de défaillances pendant l'utilisation.

Dans notre application, les points durs sont liés à la fabrication de la membrane et aux fabrications des deux interrupteurs. Nous allons le voir d'abord sous l'angle de la maîtrise des technologies en donnant les dispersions sur les dimensions. Les conséquences seront donc évoquées par la suite ainsi que l'aspect fiabilité abordé.

4.1. Evaluation de l'épaisseur réelle des couches déposées

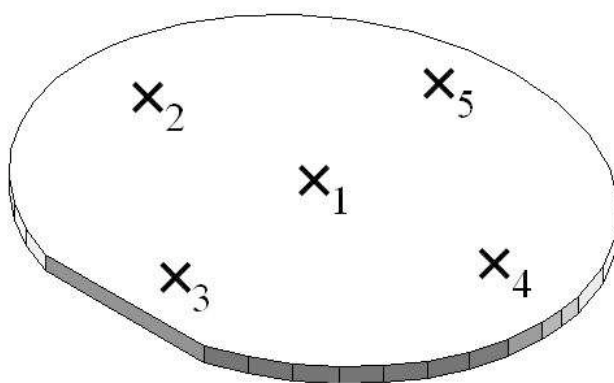
Lors de nos vérifications dimensionnelles nous nous attachons seulement aux opérations de type microtechnologiques et négligeons les étapes d'assemblage. En effet, le caractère manuel de ces opérations est intrinsèquement un facteur de mauvaise reproductibilité. Pour le procédé qui a été défini, il n'y a alors pas d'intérêt à essayer de caractériser la dispersion aux niveaux des volumes déposés, des quantités de colle utilisées...

Le Tableau 8 récapitule les différentes couches déposées avec pour chacune d'elles, l'épaisseur attendue et la gamme d'épaisseur généralement atteinte ainsi que la gamme de résistivité obtenue après dopage pour le polysilicium. Les différences obtenues pour ces étapes technologiques sont le résultat de différence de reproductibilité sur les conditions de dépôt (température, flux, pression...).

Matériau	Epaisseur planifiée (μm)	Gamme d'épaisseurs atteintes (μm)
SiO ₂ thermique	1.4	$1.36 \leq e \leq 1.4$
SiN _x LPCVD	0.6	$0.57 \leq e \leq 0.6$
Polysilicium (avant dopage)	0.5	$0.46 \leq e \leq 0.53$
SiO ₂ (PECVD)	0.7	$0.69 \leq e \leq 0.73$
	Résistivité planifiée (10 ⁻⁴ Ω.cm)	Gamme résistivité obtenue (10 ⁻⁴ Ω.cm)
Polysilicium dopé N (Phosphore)	5.8	$5.2 \leq e \leq 8.1$

Tableau 8. Bilan dimensionnel des couches déposées lors du procédé de fabrication ainsi que du dopage du polysilicium.

Ces dispersions sont évaluées sur des plaques différentes mais il existe aussi des dispersions au niveau d'une même plaque. Ceci apparaît notamment au niveau de la croissance électrolytique du cuivre. Ce procédé permet d'atteindre précisément l'épaisseur de cuivre attendue car il donne la possibilité d'interrompre le dépôt pour faire un contrôle d'épaisseur mais la couche de titane n'assure pas une équipotentialité parfaite sur toute la plaque du fait de sa résistance. Le potentiel appliqué sur l'extérieur de la plaque tend donc à décroître au fur et à mesure qu'on se rapproche du centre, ce qui se traduit par une vitesse de dépôt plus faible. Un exemple est donné dans le Tableau 9 qui indique les différentes épaisseurs obtenues en différents points d'une des plaques réalisées. La dispersion entre le centre et la périphérie de la plaque est de 10%.



Point de mesure	Epaisseur de Cuivre (μm)
1	4.3
2	4.8
3	4.8
4	5.2
5	4.6

Tableau 9. Exemple de mesure d'épaisseurs de cuivre en différents points d'une plaque réalisée.

Concernant l'étape de gravure DRIE, la différence de refroidissement entre le centre et l'extérieur de la plaque ainsi que la répartition et la géométrie des ouvertures sur la plaque

vont influencer sur l'homogénéité de la gravure et donc la vitesse de libération des membranes. Pour éviter cette inhomogénéité qui peut conduire à une surgravure du SiO₂ de la membrane au niveau des cavités gravées le plus vite, on utilise le caractère sélectif des gaz utilisés. En fin de gravure DRIE, on donne un caractère plus chimique à la gravure en limitant l'impact des ions (attaque physique) sur le substrat qui rend la gravure par les gaz (attaque chimique) prépondérante. La sélectivité du processus permet de libérer l'ensemble des membranes de la plaque de manière homogène et donc sans risque de détérioration par surgravure.

4.2. Effets des dispersions sur le rendement de fabrication et prédiction des défaillances

4.2.1 Epaisseur des couches de la membrane SiO₂/SiN_x

Les variations sur les épaisseurs des couches de SiO₂ et SiN_x vont directement jouer sur la contrainte interne de la membrane. Des études ont montré que pour avoir de bonnes caractéristiques mécaniques, il fallait que la contrainte interne de la membrane soit inférieure à 0.1GPa en valeur absolue [10]. Connaissant les contraintes internes de chaque couches ($\sigma_{SiO_2} = -0.27\text{GPa}$ et $\sigma_{SiN_x} = 0.6 \text{ GPa}$ [10]), la contrainte interne de la membrane bicouche SiO₂/SiN_x peut être déduite à partir de l'équation (1).

$$\sigma_r = \frac{\sigma_{SiO_2} \times e_{SiO_2} + \sigma_{SiN_x} \times e_{SiN_x}}{e_{SiO_2} + e_{SiN_x}} \quad (1)$$

Le Tableau 10 donne les contraintes de la membrane calculées pour les épaisseurs de SiO₂ et SiN_x attendues et pour celles finalement obtenues. Pour ces dernières, on évalue les deux cas entraînant le plus de dispersion sur la contrainte résiduelle. Dans tous les cas la contrainte résiduelle de la membrane bicouche SiO₂/SiN_x reste inférieure à 0.1GPa en valeur absolue, ce qui permet de conclure que même avec les dispersions obtenues lors de la fabrication la membrane reste robuste.

	SiO ₂ (μm)	SiN _x (μm)	σ _r (GPa)
Épaisseurs attendues	1.4	0.6	-0.009
Épaisseurs réelles : dispersion vers une contrainte en compression	1.4	0.54	-0.018
Épaisseurs réelles : dispersion vers une contrainte en tension	1.36	0.6	-0.004

Tableau 10. *Calcul des contraintes de la membrane pour les épaisseurs attendues et obtenues.*

4.2.2 Valeur des résistances en polysilicium

La valeur des résistances en polysilicium dépend de l'épaisseur de la couche ainsi que de son dopage. Concernant les épaisseurs, le procédé de fabrication est tel que le dopage de cette couche entraîne une réduction d'épaisseur de 30 nm, ce qui nous amène à des épaisseurs toujours inférieures à celles prévues initialement. De plus la résistivité obtenue a tendance à être plus élevée que celle visée. Les résistances en polysilicium sont donc de valeur supérieure à ce qui a été calculé (Tableau 11). Par conséquent, la tension à appliquer pour atteindre la puissance de commutation de chaque interrupteur sera plus élevée.

	Épaisseur (μm)	Résistivité (10 ⁻⁴ Ω.cm)	Résistance en serpent (Ω)	Résistance carrée (Ω)
Valeurs attendues	0.5	5.8	500	40
Valeurs maximales obtenues	0.43 (valeur obtenue après dopage)	8.1	812	65

Tableau 11. *Comparaison des valeurs de résistance attendues et réévaluation en fonction des dispersions.*

4.2.3 Protection électrique de la couche d'oxyde

La couche de SiO₂ PECVD sert de protection électrique à la résistance en polysilicium de l'interrupteur OFF-ON sur laquelle sont déposées les pistes métalliques à connecter. Les épaisseurs obtenues restent supérieures à l'épaisseur de la résistance en polysilicium à recouvrir (0.5μm), ce qui permet une isolation électrique parfaite.

4.2.4 Epaisseur des pistes en cuivre

La dispersion sur l'épaisseur des pistes en cuivre a été évaluée à 10%. On conserve toutefois des épaisseurs de pistes supérieures à 3 μ m, épaisseur minimale à satisfaire pour s'assurer que les micro-brasures sont réalisables. L'interrupteur OFF-ON reste donc fonctionnel.

Concernant les performances électriques, la réduction de l'épaisseur conduit à une diminution du courant maximal autorisé. Pour les valeurs obtenues, on reste toutefois supérieur à 1A.

5. Bilan de fabrication et perspectives d'amélioration des procédés de fabrication

Différentes étapes du procédé de fabrications ont pu être vérifiées. On remarque que le bon respect des dimensions définies lors de la conception détermine :

- La bonne tenue mécanique des membranes qui est une des caractéristiques critiques pour la filière technologique que nous proposons.
- La qualité de réalisation de la brasure de l'interrupteur OFF-ON par l'obtention d'une épaisseur minimale de cuivre.
- La valeur des éléments résistifs, définissant le couple tension/courant à appliquer pour la commande.

Parmi ces trois points, le plus important est la tenue des membranes qui définit en fin de fabrication le rendement de fabrication du système. En l'occurrence pour nos réalisations nous avons obtenu plus de 95% de membranes utilisables. Toutefois le démonstrateur étant constitué de 4 membranes, pour une membrane cassée le système n'est plus utilisable donc virtuellement 4 membranes sont inutilisables. Le pourcentage système tombe donc à 80%, ce qui met en évidence la nécessité d'avoir des membranes robustes en particulier dans le cadre d'une intégration multiple dans un système.

Dans le procédé de fabrication qui a été détaillé, nous n'avons pas observé de points de défaillance. Le micro-initiateur sécurisé PYROSECURE présente toutefois quelques points identifiés comme limitant :

- Actuellement, n'ayant pas accès aux matériaux pyrotechniques, l'utilisation d'un propergol composite ne nous permet pas de tirer pleinement profit des capacités de nos initiateurs et de nos interrupteurs ON-OFF pyrotechniques. Il serait en l'occurrence intéressant d'étudier quels types de matériaux pyrotechniques,

générateurs de gaz, peuvent améliorer de manière significative les performances des interrupteurs ON-OFF pyrotechniques.

- Concernant les interrupteurs OFF-ON, la directive européenne RoHS⁴ impose une réduction des substances dangereuses, notamment le plomb, dans les systèmes manufacturés. Un remplacement de l'alliage utilisé (Sn/Pb) par un alliage de substitution doit être envisagé. Toutefois ces alliages ont l'inconvénient d'avoir des points de fusions plus élevées que le Sn/Pb. Pour garder des énergies de commutation faible, il faudra donc réduire le volume de l'élément d'apport. A terme, on pourra réaliser un dépôt en phase vapeur ou bien par croissance électrolytique de l'étain Sn pur. Sa température de fusion plus élevée (232°C) que le Sn/Pb eutectique ne constituerait pas un problème à ces faibles dimensions. Cela supprimerait aussi les étapes non collectives et donc coûteuses de report de l'élément d'apport actuellement du Sn/Pb.

Pour l'interrupteur ON-OFF ainsi que l'initiateur, la réduction des dimensions est limitée par le report du matériau pyrotechnique. Une alternative est de venir déposer des matériaux en phase vapeur et fonctionnant en couche mince tel que le PETN⁵ [11,12]. Pour augmenter encore le niveau d'intégration (taille <mm²), les nanotechnologies ouvrent des perspectives nouvelles en permettant l'élaboration de matériaux purs, dont on maîtrise la taille des grains, le rapport surface active/volume, l'homogénéité des composants, la pureté... [13-16]

6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons analysé les problèmes technologiques pour la réalisation du démonstrateur PYROSECURE : il se compose d'un micro-initiateur pyrotechnique, de deux micro-interrupteurs ON-OFF pyrotechniques et d'un micro-interrupteur OFF-ON. Le tout est intégré sur un substrat de moins de 1cm², surface qui pourrait encore être réduite si l'on doit faire face à des contraintes d'intégration extrême.

Dans un premier temps, nous avons dimensionné chaque constituant et réalisé des simulations aux éléments finis pour évaluer les performances de ces nouveaux interrupteurs. Ainsi, il faut appliquer aux alentours de 100mW pour réaliser la commutation des interrupteurs (65mW pour l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique et 170mW pour l'interrupteur OFF-ON). Pour

⁴ Reduction of Hazardous Substance

⁵ Pentaerythritoltetranitrate

l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique, ces résultats ont été complétés par des simulations dynamiques qui ont permises de conclure que les temps de commutation minimaux sont de 10ms.

Le procédé de fabrication du module complet a ensuite été exposé et a permis de :

- Préciser les procédés de fabrication de chaque composant à savoir le micro-initiateur pyrotechnique et les interrupteurs ON-OFF pyrotechnique et OFF-ON.
- De démontrer la compatibilité des différents composants en validant leur intégration au sein d'un même système.

Ce procédé ne nécessite que 4 niveaux de masques avec des opérations classiques de microtechnologie ainsi que quelques étapes d'assemblage, aujourd'hui manuelles mais pouvant devenir collectives. Ce procédé de fabrication permet d'envisager des systèmes peu coûteux et rapidement réalisables.

Le rendement de fabrication qui dépend fortement de l'état des membranes, qui est la base technologique des composants, est supérieur à 95% en terme de membrane utilisable. Ce rendement diminue à 80% lorsqu'on considère les démonstrateurs PYROSECURE utilisables.

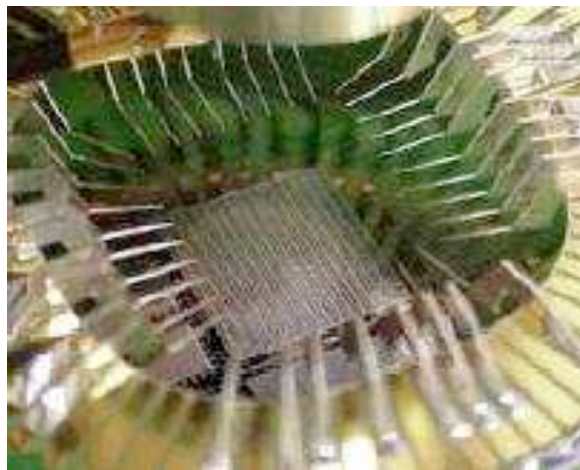
Un autre point important est la maîtrise de l'épaisseur des pistes en cuivre sur toute la surface de la plaque de silicium pour avoir une tenue en courant constante. Un écart de 10% entre le centre et la périphérie de notre plaque a été relevé mais l'épaisseur des pistes n'est jamais inférieure à 3µm qui est l'épaisseur minimale requise pour l'interrupteur OFF-ON. La vérification de ces points a permis de valider la faisabilité du système tel qu'il a été proposé.

Pour finir certaines étapes de fabrication peuvent être modifiées et des pistes d'amélioration du procédé ont été données en fin de chapitre en vue d'améliorer l'intégration du système.

Le chapitre suivant s'intéresse à la caractérisation du micro-initiateur sécurisé. Nous verrons que les performances de celui-ci en terme de sécurité sont totalement liées aux performances des interrupteurs pris individuellement qui seront donc évaluées.

Chapitre 4

Validation expérimentale des concepts PYROSECURE



1. Introduction

Le chapitre précédent a présenté le procédé de réalisation du système PYROSECURE intégrant un micro-initiateur ainsi que des interrupteurs ON-OFF et OFF-ON de technologie compatible. La faisabilité de la fabrication de chaque composant ainsi que de leur intégration au sein d'un même système a été validée. Logiquement, l'étape suivante concerne la caractérisation du démonstrateur complet en terme de performances, ce à quoi nous allons nous attacher tout au long de ce chapitre. L'architecture globale du démonstrateur PYROSECURE, un initiateur entouré d'interrupteurs assurant les fonctions sécuritaires, revient à étudier les performances globales de chaque constituant.

Dans ce chapitre, nous commencerons par étudier les performances du micro-initiateur en terme d'initiation. Bien sûr le choix du matériau pyrotechnique PAG/PA ne permettra pas de valider le comportement de l'initiateur dans l'application finale qui mettra en jeu un matériau pyrotechnique de type explosif, beaucoup plus sensible, mais les résultats donneront des niveaux de puissance et temps d'initiation accessibles avec les initiateurs sur membrane $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$.

Ensuite, la caractérisation des interrupteurs intégrés autour de l'initiateur sera présentée en terme de résistance de contact et d'isolation, puissance et temps de commutation. La validation expérimentale du concept d'interrupteur ON-OFF thermique alternatif à celui ON-OFF pyrotechnique intégrée dans le démonstrateur est présenté en annexe 1 pour ne pas alourdir ce chapitre.

Enfin le concept de PYROSECURE sera validé : nous vérifierons que chacune des fonctions à réaliser (armement, désarmement, stérilisation) sont opérationnelles.

2. Caractérisation de l'initiateur pyrotechnique

Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre 3, lors de la conception de l'initiateur, nos limitations sur le choix du matériau pyrotechnique, nous ont conduits à choisir un propergol composite PAG/PA mis au point pour des applications de micro-propulsion. Ce matériau génère une grande quantité de gaz mais est peu sensible et réactif. Il n'est donc pas adapté à l'initiation de charges explosives. Les tests effectués sur l'initiateur pyrotechnique ont donc pour objectif de mettre en avant sa capacité d'initier une charge pyrotechnique avec un point chaud sur membrane diélectrique et de donner des niveaux de puissances et des temps d'initiation.

2.1. Description de l'expérimentation

Les tests d'initiation consistent à appliquer un courant compris entre 1 et 80mA à la résistance, de mesurer la tension résultante et noter le temps qui correspond à l'initiation du matériau énergétique.

Les tests ont été réalisés sur un banc de test, spécialement développé pour la caractérisation de micropropulseurs, par le service instrumentation (2I) du LAAS et qui assure à la fois la commande en courant de la résistance et l'acquisition des données expérimentales (tension, temps). Ce banc de test est constitué d'un générateur de courant : courant maximum en continu de 80mA et temps de montée de 1.3µs. Ce générateur de courant est piloté par un logiciel réalisé sous Labview CVI⁶ et l'interfaçage se fait grâce à une carte PCI 6052E de National instrument. Le logiciel permet de définir des profils d'initiation et de fixer la puissance et la durée de l'initiation. Les profils de la commande d'initiation peuvent prévoir un préchauffage et sont de forme rampe ou créneau (cf Figure 61). Pour nos tests seuls les profils en créneaux ont été choisis en faisant varier la puissance d'initiation P_{init} .

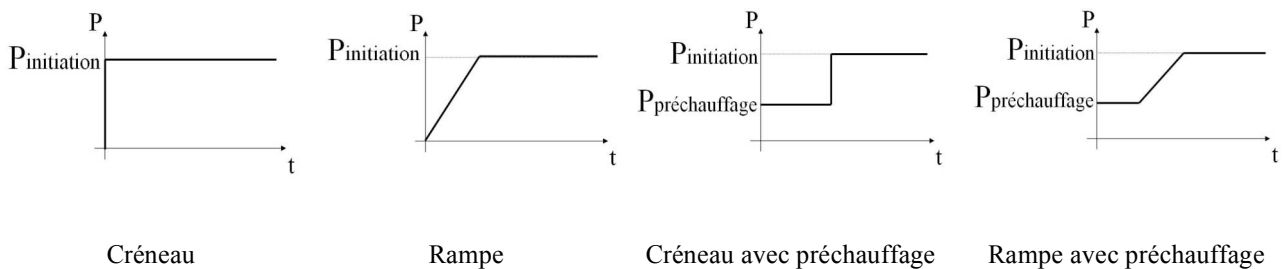


Figure 61. Différents profils d'initiation accessibles.

A partir de la valeur de puissance choisie et par mesure de la résistance de chauffage, le logiciel commande le générateur de courant pour qu'il fournisse le courant adéquat. Le logiciel mesure en temps réel, avec une fréquence d'acquisition de 20kHz, le courant et la tension aux bornes de la résistance en polysilicium pour identifier le moment de l'initiation. L'application du courant chauffe par effet Joule le polysilicium qui, lorsqu'il atteint 250°C, initie le matériau pyrotechnique. Sous l'effet des gaz de combustion, la membrane se brise entraînant la rupture de la résistance. Le courant mesuré aux bornes de la résistance devient alors nul. Cela définit le temps d'initiation.

La Figure 62 indique l'interface graphique du logiciel de commande, avec zone de définition de la commande, d'acquisition des résultats...

⁶ Logiciel de programmation de National Instrument

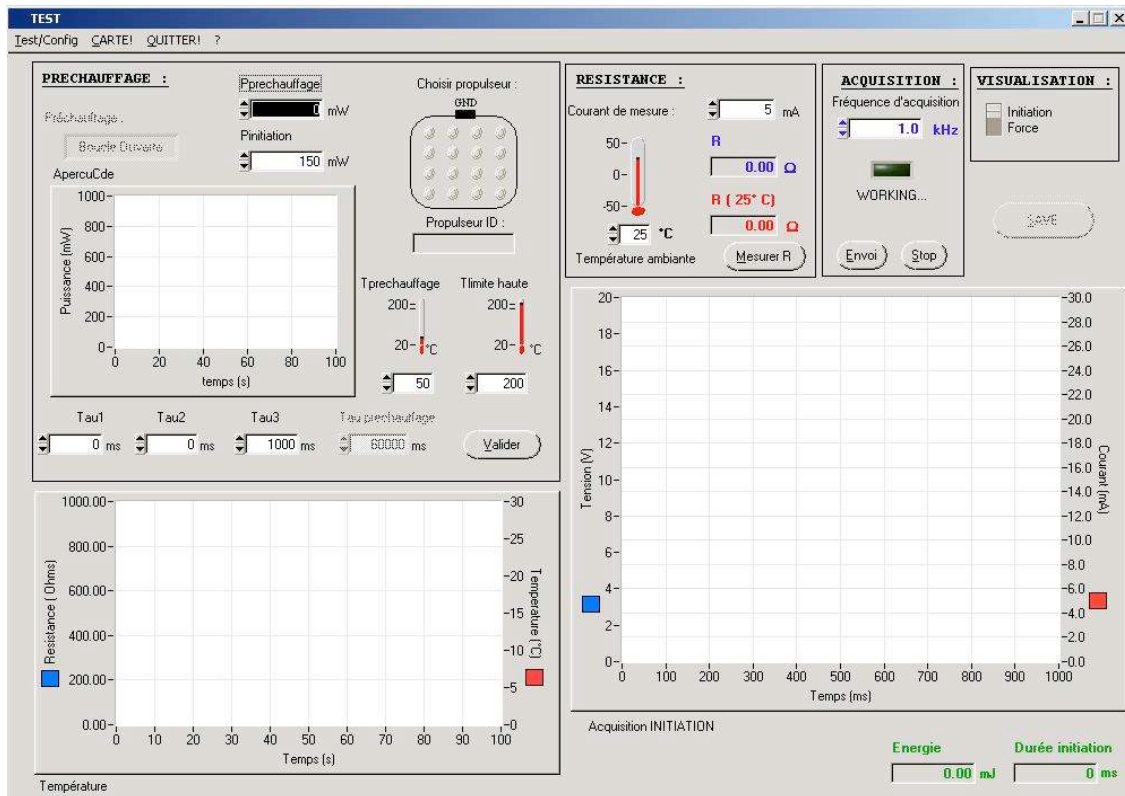


Figure 62. Interface graphique du logiciel de pilotage utilisé.

2.2. Résultats obtenus et analyse

Les résultats des tests décrits dans le paragraphe précédent sont exposés dans le Tableau 12.

Puissance (mW)	65	150	200	300	500
$R_{\text{initiateur}} (\Omega)$	950	980	925	970	890
Courant appliqué (mA)	8.3	12.4	14.7	17.6	23.7
Temps d'initiation (ms)	inf	97	65	39	24
Temps d'initiation théorique (ms)	120	72	44	32	14
Energie (mJ)	inf	14.5	13	11.7	12
Initiations réussies(%)	0	20	40	60	60

Tableau 12. Récapitulatif des tests d'initiation pour le micro-initiateur sur membrane $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ rempli avec du PAG/PA.

La gamme de puissance étudiée a été choisie en fonction des résultats de simulations obtenues pour l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique qui présente la même structure et pour lequel le même matériau pyrotechnique est utilisé. Pour une puissance de 65mW qui a été identifiée lors des simulations comme la puissance minimale d'initiation, l'initiation n'est jamais

réalisée. Il faut appliquer expérimentalement au moins 150mW, pour initier le matériau pyrotechnique au bout de 97ms. Pour une puissance de 500mW le temps d'initiation est réduit à 24ms et le rendement d'initiation obtenu est de 60% (3/5).

Ces résultats sont toutefois à prendre avec précaution au vu des faibles rendements d'initiation obtenus (<60%). Ces problèmes d'initiation sont très certainement liés au matériau pyrotechnique utilisé qui n'est pas adapté à l'initiation mais aussi à la méthode de remplissage. En effet la colle epoxy utilisée est une bicomposants et des bulles d'air sont créées lors du mélange. Ces bulles d'air empêchent le bon contact thermique entre l'élément chauffant et le matériau pyrotechnique. Pour s'affranchir au maximum de ce problème, la solution a été d'intégrer une phase de dégazage au procédé de remplissage, après mélange des deux composants et avant le report du matériau pyrotechnique dans la cavité. La méthode de remplissage, choisie manuelle, n'est pas adaptée à des performances optimales et devra être remplacée à terme par une technique de remplissage par sérigraphie, déjà utilisée dans des projets antérieurs et donnant de meilleurs résultats [1]. Notons que, de manière générale, dans les initiateurs à fil chaud, le dépôt du matériau pyrotechnique pour assurer le bon contact thermique avec l'élément chauffant reste un problème majeur. Il faut une méthode de remplissage assurant un contact de qualité, et même avec ces précautions, les gaz présent à l'interface au début de la combustion peuvent désolidariser complètement le fil du matériau, avant que celui-ci ne soit complètement initié. Actuellement, les procédés que nous avons pu testés, ne nous ont pas donné entière satisfaction et des études devront encore être menées.

3. Caractérisation des interrupteurs ON-OFF pyrotechniques

La caractérisation des interrupteurs ON-OFF pyrotechniques a pour objectif de valider le concept d'une commutation par interruption de piste sous l'effet des gaz de combustion. Nous avons donc validé les interrupteurs en termes de :

- Capacité à conduire le courant dans son état initial ON.
- Puissance et temps nécessaires à la commutation de l'état ON à l'état OFF.
- Capacité d'isolation après commutation dans l'état OFF.

3.1. Description des échantillons de test

Pour la caractérisation des interrupteurs ON-OFF pyrotechniques, nous n'avons pas utilisé les démonstrateurs PYROSECURE réalisés, dans lequel les différents composants sont interconnectés ce qui rend les tests individuels plus difficiles. Des échantillons ont été utilisés intégrant un seul interrupteur en série avec une résistance de test (cf Figure 63). La résistance de test (R_{test}) correspond à l'élément chauffant de l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique. Ces cellules tests ont été réalisées sur le même substrat que le démonstrateur PYROSECURE pour s'assurer qu'elles ont subi les mêmes conditions de réalisation.

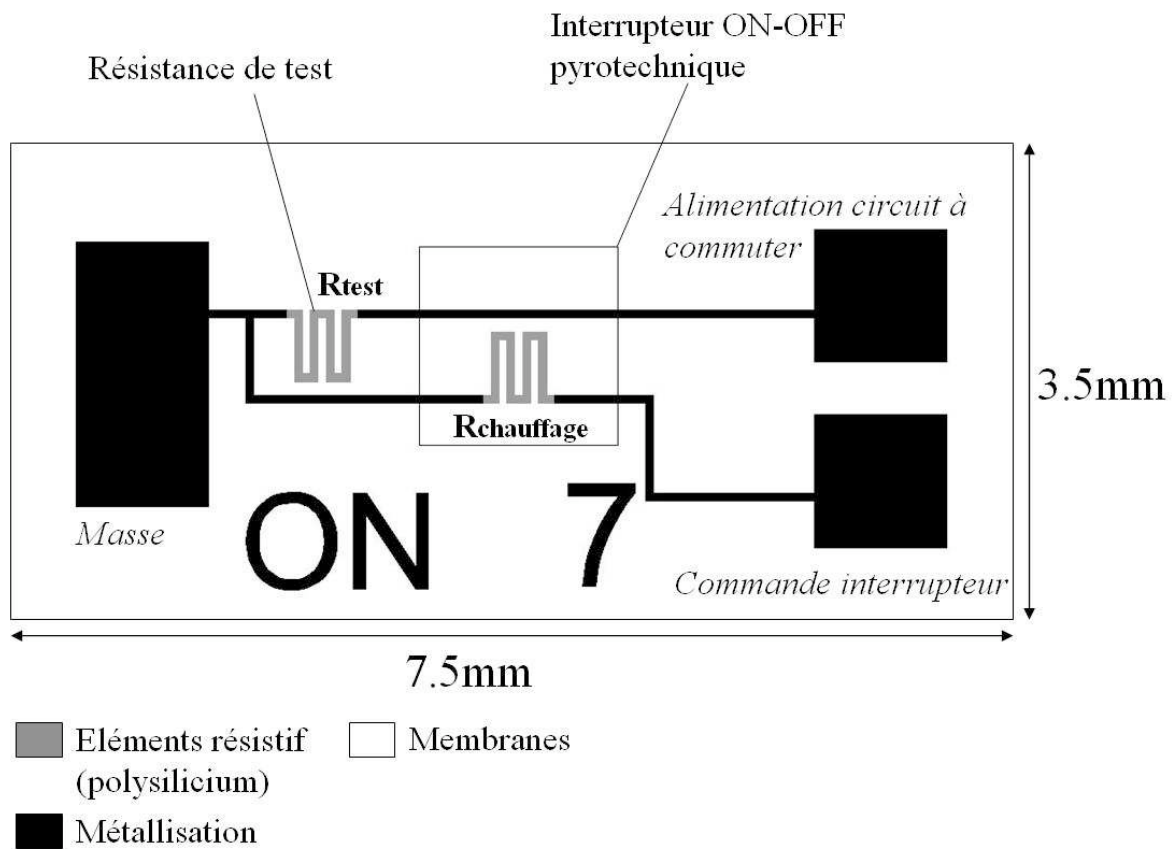


Figure 63. Schéma de la cellule test de l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique : l'interrupteur est placé sur la ligne d'alimentation d'une résistance de test.

3.2. Caractérisation de l'état initial ON

La première étape de caractérisation est de valider l'état passant ON. Le principe retenu a l'avantage de n'avoir aucun contact donc aucune résistance de contact qui est généralement le point sensible de tout interrupteur. On n'est limité en terme de performance en courant que par la géométrie des pistes. Pour la géométrie choisie à savoir des pistes de 60 μm de large et 5 μm d'épaisseur, nous avons appliqué 1A pendant 5min sans noter de dégradation. La dégradation de la piste intervient lorsque plus de 1.7A sont appliqués ce qui correspond à une

densité de courant de $0.57 \cdot 10^6 \text{ A/cm}^2$. Cette valeur est inférieure à la valeur de 10^6 A/cm^2 qu'on retrouve généralement dans la littérature [2]. Cette différence s'explique par l'utilisation de la membrane qui réduit l'évacuation de chaleur créée dans la piste par effet Joule. L'augmentation de température qui en résulte, accélère les phénomènes de dégradation, par électromigration notamment. Cela ne constitue pas une limitation dans notre application car la limite en courant reste supérieure à 1A. Toutefois il conviendra dans les futurs dimensionnement de prendre une marge de sécurité par rapport à la densité de courant maximale de 10^6 A/cm^2 qui est donné pour les conducteurs déposés sur substrat [2].

3.3. Performances de commutation de l'interrupteur

3.3.1 Description de l'expérimentation

L'interrupteur ON-OFF pyrotechnique est à actionnement thermique ce qui implique que ces performances en terme de temps de commutation sont liées à la puissance de chauffage appliquée. Plusieurs puissances ont été appliquées et les temps de commutation mesurés. Ceux-ci correspondent aux temps d'initiation du matériau pyrotechnique.

Ces tests sont effectués à l'aide du banc de test utilisé pour la caractérisation du micro-initiateur intégré au démonstrateur PYROSECURE. Celui-ci n'est pas totalement adapté à l'étude des interrupteurs pour lesquels il faudrait un circuit de commande permettant de contrôler la résistance chauffante et un circuit de mesure de la résistance de test indépendants. Dans la configuration actuelle, le montage ne permet que de commander et mesurer la résistance de chauffage. N'étant pas en mesure de détecter le passage de l'état ON à l'état OFF directement, nous avons adapté le protocole expérimental :

- Pour chaque échantillon, on fixe une puissance d'alimentation P appliquée pendant un temps t . Le couple (P,t) initial est issu des résultats de simulation.
- La valeur de la résistance de test est mesurée pour s'assurer du bon fonctionnement dans l'état passant ON.
- On applique le couple (P,t) à la résistance chauffante.
- On mesure la résistance de test pour savoir s'il y a eu commutation ou non. Si la commutation n'a pas eu lieu le temps t est incrémenté de 1ms et le test refait. Si la commutation a eu lieu le temps t est décrémenté de 1ms et le test refait.

Ainsi de proche en proche, on définit la valeur du temps de commutation pour plusieurs puissances à la milliseconde près. Les résistances sont évaluées par mesure $I(V)$ à l'aide d'un

Keithley 2400 sourcemeter pour des tensions allant de 1V à 20V. Le protocole expérimental est résumé sur la Figure 64.

Pour chaque valeur de puissance choisie, une moyenne est réalisée sur 5 essais. La gamme de puissance, choisie en fonction des résultats de simulation, est de 65mW-500mW. Au-delà de 500mW, l'initiation ne se fait plus correctement : le matériau pyrotechnique s'échauffe très localement mais ne s'initie pas. Il génère des gaz qui cassent la membrane très localement n'assurant donc plus l'échauffement du matériau qui permettrait son initiation.

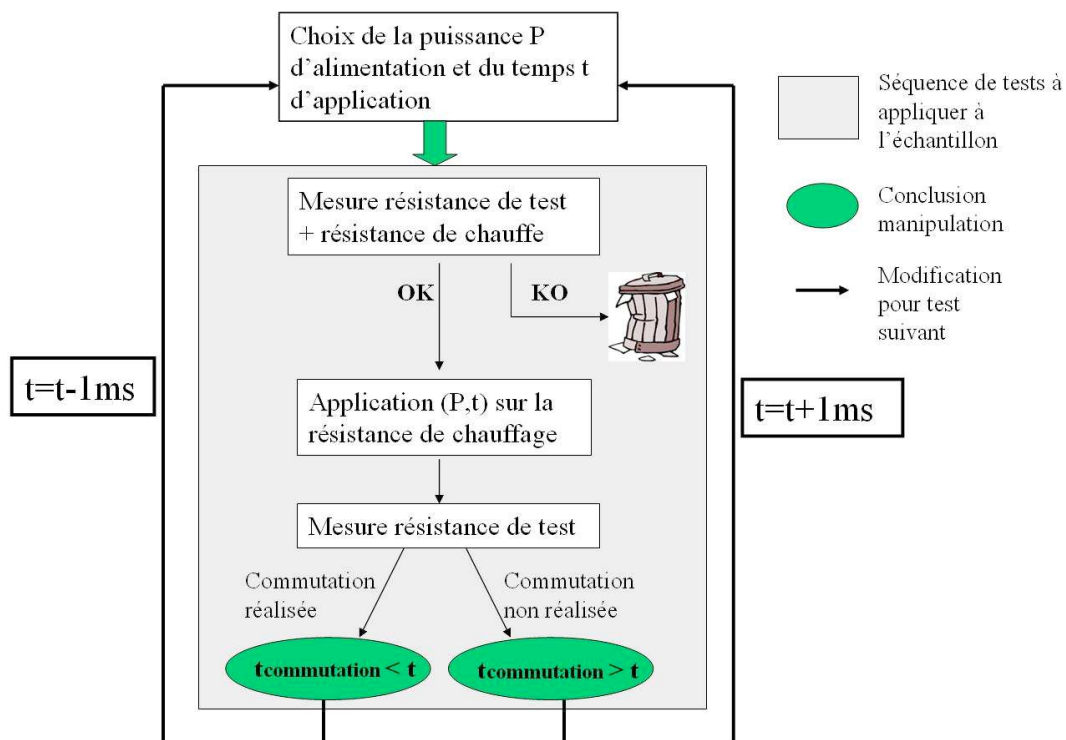


Figure 64. Schéma du plan d'expérience permettant d'acquérir pour chaque puissance le temps de commutation.

3.3.2 Résultats et analyse

Les résultats des tests décrits dans le paragraphe précédent sont exposés dans le Tableau 13.

Puissance (mW)	65	150	200	300	500
$R_{\text{chauffage}} (\Omega)$	950	980	925	970	890
Courant appliqué (mA)	8.1	12.6	14.1	17.7	21.7
Temps de commutation (ms)	inf	100	65	45	25
Temps de commutation théorique (ms)	120	72	44	32	14
Energie (mJ)	inf	15	14	13.5	12.5
$R_{\text{test avant}}$	860	907	870	953	925
$R_{\text{test après}}$	860	Inf	Inf	Inf	Inf
Commutations réussies	0/5	1/5	1/5	3/5	3/5

Tableau 13. Récapitulatif des tests de commutation pour l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique.

Les puissances ont été choisies à partir des résultats de simulations obtenues pour l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique présenté lors de son dimensionnement. Pour une puissance de 65mW, la puissance minimale d'initiation par calcul, la commutation n'est jamais réalisée. Il faut appliquer au moins 150 mW, pour initier le matériau pyrotechnique et donc réaliser la commutation. Les raisons de ce décalage entre expérience et simulation sont les mêmes que celles évoquées pour le micro-initiateur.

Les temps de commutation de l'interrupteur pyrotechnique sont les temps d'initiation du matériau pyrotechnique donc très proches de ceux obtenus lors de la caractérisation du micro-initiateur. On obtient des temps de commutation de 25ms pour des puissances de 500mW, ce qui correspond aussi au minimum d'énergie consommée (12.5mJ), alors qu'il faut 100ms avec une puissance de 150mW pour commuter. L'énergie consommée est alors de 15mJ.

Les pourcentages de succès sont aussi faibles que lors de la caractérisation du micro-initiateur pour les raisons évoquées au paragraphe 2.2.

3.4. Caractérisation de l'état final OFF

Après commutation il convient de vérifier la qualité de l'interruption de piste. Cette vérification se fait de manière électrique et visuelle.

Le test électrique consiste à appliquer une tension sur la piste sectionnée et à mesurer s'il y a un courant de fuite. Pour des tensions continues comprises entre 0 et 100V, nous n'avons noté aucun courant de fuite sur les échantillons testés.

Chaque échantillon est aussi observé sous microscope optique avant et après commutation pour observer si la rupture de piste est bien réalisée (Figure 65).



Figure 65. Interrupteur ON-OFF pyrotechnique avant (a) et après (b) commutation.

La photographie prise après commutation (cf Figure 65 (b)) montre que la piste à interrompre est sectionnée sur toute la longueur de la cavité à savoir 1.5mm. On note par rapport à la configuration initiale (cf Figure 65 (a)) que la plus grande partie de la membrane a éclaté. Cela confirme qu'il n'y a aucune contrainte sur la position de la piste à interrompre sur la membrane ainsi que sur ses dimensions, comme nous l'avons évoqué lors de la conception. Ce comportement est conforme à nos attentes. Evidemment, il faut encore étudier une solution de protection pour éviter que les fragments de la membrane et de la piste ne soient dispersés dans l'ensemble du circuit.

4. Caractérisation de l'interrupteur OFF-ON

La caractérisation des interrupteurs OFF-ON a pour objectif de valider le concept d'une commutation dans l'état ON par réalisation d'une micro-brasure. Nous avons suivi la même démarche que l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique en vue d'obtenir les caractéristiques électriques de l'interrupteur. La caractérisation est donc divisée en trois étapes visant à connaître :

- Sa capacité d'isolation dans son état initial OFF.
- La puissance et le temps nécessaire à la commutation de l'état OFF à l'état ON.
- Sa capacité de conduction après commutation dans l'état ON.

4.1. Description des échantillons tests

La caractérisation des interrupteurs OFF-ON a été effectuée sur des cellules tests intégrant un seul interrupteur en série avec une résistance de test (cf Figure 66) qui ont été réalisés, comme pour l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique, sur le même substrat que le démonstrateur PYROSECURE. La résistance de test (R_{test}) reprend la même géométrie que pour les cellules test de l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique.

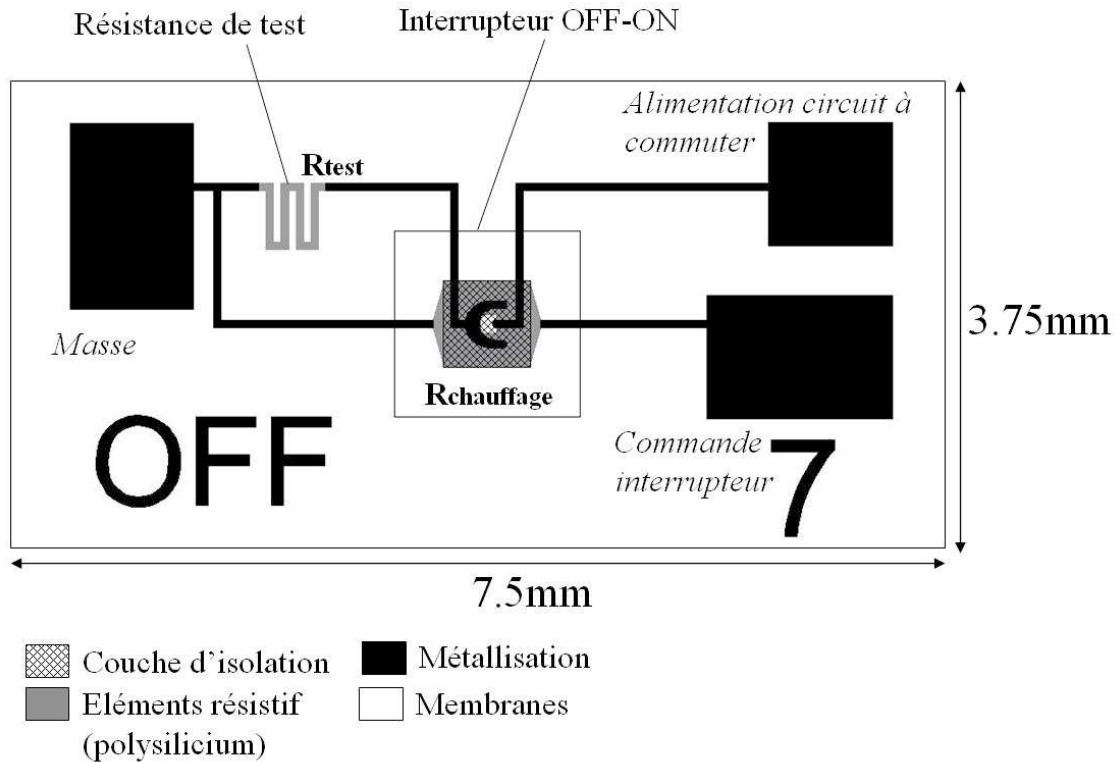


Figure 66. Schéma de la cellule test de l'interrupteur OFF-ON : l'interrupteur est placé sur la ligne d'alimentation d'une résistance de test.

4.2. Caractérisation de l'état initial : état OFF

Une tension continue comprise entre 0 et 100V est appliquée entre les deux pistes à connecter et nous venons mesurer s'il y a un courant de fuite avec une précision du μA .

Jusqu'à 100V, aucune fuite de courant et aucune dégradation sur l'isolant colophane n'ont été détectées. Le fonctionnement de l'interrupteur OFF-ON n'est donc pas altéré.

Le contrôle visuel, qui a été réalisée au paragraphe 3.4 pour l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique, ne peut donner d'indication, à savoir s'il y a ou non contact entre la bille Sn/Pb et les deux pistes à connecter, car la bille recouvre toute la zone de brasure.

4.3. Performances de commutation de l'interrupteur

4.3.1 Description de l'expérimentation

Ces tests de commutation de l'état ON à l'état OFF sont effectués avec le même banc de test et la même procédure expérimentale que pour l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique. La gamme de puissances de commutation, choisie en fonction des simulations par éléments finis, s'étale de 200 à 400mW. Au-delà de 400mW, la résistance chauffante casse. Pour chaque puissance choisie, 10 tests sont effectués avec les temps de commutation trouvés, ce qui permet de donner une reproductibilité préliminaire de fonctionnement.

4.3.2 Résultats et analyse

Les résultats des tests décrits dans le paragraphe précédent sont résumés dans le Tableau 14.

Puissance (mW)	200	225	250	275	300	350	400
$R_{\text{chauffage}} (\Omega)$	64	72.5	80	78.5	84.7	74.2	74.6
Courant appliqué (mA)	55.9	55.7	55.9	59.2	59.5	68.6	73.2
Temps de commutation (ms)	3000	1300	900	600	500	370	320
Energie (mJ)	600	292.5	225	165	150	129.5	128
$R_{\text{test avant}}$	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
$R_{\text{test après}}$	960	850	925	963	896	992	980
Commutations réussies (%)	100	100	100	100	100	100	100

Tableau 14. Récapitulatif des tests de commutation pour l'interrupteur OFF-ON.

La puissance minimale mesurée permettant d'assurer la commutation est 200mW. Les simulations électrothermiques prévoyaient une puissance minimale de 170mW à appliquer pour atteindre la température de fusion de la bille Sn/Pb. Cet écart peut être expliqué par l'incertitude sur l'épaisseur de colophane déposée ou bien plus probablement par l'énergie absorbée par la colophane et la bille lors du changement de phase qui n'ont pas pu être pris en compte dans notre modèle.

Le temps commutation obtenu est de 3s pour 200mW et diminue pour atteindre 320ms pour 400mW. Des puissances de commutation élevées permettent de réduire l'énergie consommée : 600mJ pour 200mW et 128mJ pour 400mJ.

La fiabilité de la commutation est excellente car, pour toutes les puissances supérieures à la puissance minimale, on obtient une commutation dans 100% des cas testés ont commuté. Cette excellente reproductibilité nous donne la possibilité de tracer la courbe de

fonctionnement expérimentale de l'interrupteur OFF-ON. Cette courbe, présentée dans la Figure 67, donne les couples (P,t) de commutation pour obtenir 100% de réussite. Elle montre aussi que le temps minimal de commutation est d'environ 300ms. Ce temps est relativement long, probablement à cause de :

- La dynamique du mécanisme de commutation qui nécessite un changement de phase de la colophane et de la bille de Sn/Pb, un rapprochement de la bille ainsi qu'une interdiffusion avec le métal des pistes.
- La taille du système en particulier le volume de la bille à chauffer.

Toutefois nous n'avons pas été en mesure d'évaluer la part de chacun de ces phénomènes dans le temps de commutation obtenu pour l'interrupteur OFF-ON.

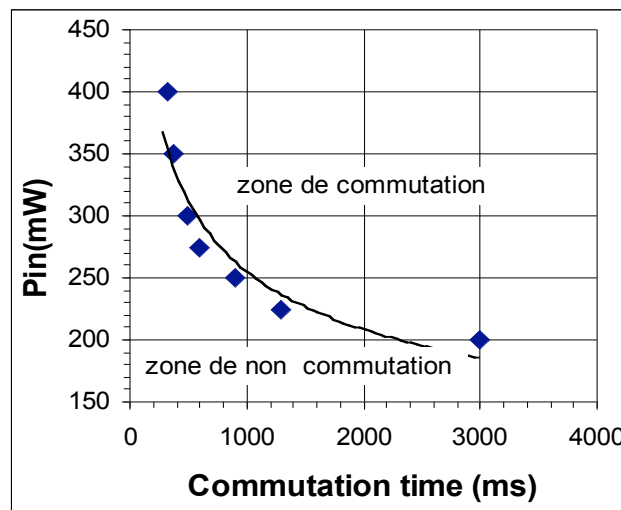


Figure 67. Courbe de fonctionnement expérimentale de l'interrupteur OFF-ON.

4.4. Caractérisation de l'état final ON

La caractérisation de l'état final de l'interrupteur OFF-ON prend deux orientations.

D'une part s'assurer qu'il y a bien eu réalisation d'une micro-brasure. En effet le mécanisme de commutation est tel que pour des températures trop faibles (supérieure à la température de fusion de la colophane mais inférieure à celle de la bille de Sn/Pb), la bille à l'état solide peut très bien se rapprocher des pistes à connecter et réaliser un court circuit sans qu'il y ait brasure. Cette vérification est notamment importante dans l'évaluation de la puissance minimale et des temps de commutation, évalué dans la partie précédente.

Une fois la réalisation de la brasure vérifiée, il convient de la caractériser en évaluant la résistance de contact résultante et vérifier sa capacité à soutenir un courant minimum de 1A.

4.4.1 Vérification du contact formé entre Cu et Sn/Pb

a. Vérification électrique

S'il y a réalisation d'une brasure, le contact est ohmique et la courbe $I(V)$ est donc une droite. Par contre, s'il n'y a pas eu brasure mais seulement court-circuit par contact de la bille Sn/Pb avec les pistes à connecter, le contact n'est plus ohmique et courbe $I(V)$ n'est plus une droite. La mesure $I(V)$ est incluse dans le protocole expérimental que nous avons suivi pour caractériser le contact formé lors de la commutation.

b. Vérification visuelle

La vérification visuelle permet de se rendre compte s'il y a eu fusion et étalement de la bille de Sn/Pb entre les deux pistes. L'une des méthodes est d'observer en face avant s'il y a eu étalement de la brasure sur les pistes de part et d'autre de la bille (Figure 68). Toutefois comme la bille recouvre l'ensemble de la zone de brasure il est parfois difficile de l'observer.

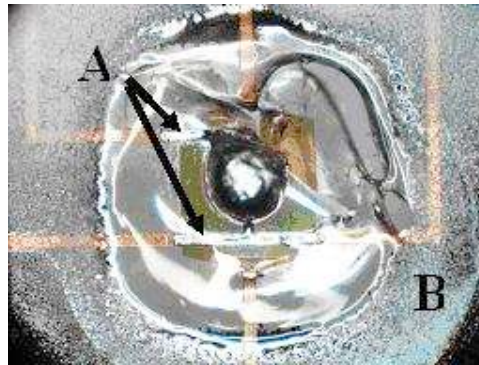


Figure 68. Photographie de l'interrupteur OFF-ON après brasure : on observe la brasure étalée sur les pistes à connecter (A) et des marques de colophane (B).

L'autre solution consiste donc à réaliser l'observation en face arrière grâce à la transparence de la membrane. La Figure 69 montre des photographies de l'interrupteur OFF-ON réalisées avec un microscope pour différents cas de figure :

- Figure 69 (a) : positionnement de la bille avant brasure. La bille éloignée du plan focal par la présence de la colophane est plus sombre. Le point lumineux est un reflet de l'éclairage du microscope.
- Figure 69 (b) : allure du système lors d'un contact entre la bille et les pistes métalliques intervenant pour des puissances de chauffe insuffisantes. La bille garde sa forme d'origine et apparaît plus près du plan focal du fait de la fusion de la colophane.

- Figure 69 (c) : étalement de la bille en fusion sur les deux pistes. La zone d'étalement est cerclée est identifiable par une zone lumineuse étendue entre les deux pistes. La bille n'a plus sa forme d'origine, ce qui montre qu'il y a eu fusion et étalement sur les pistes. On identifie l'étalement par une surface de réflexion plus étendue qui fait apparaître une surface à l'aspect rugueux. Ces observations de l'étalement des pistes ont permis de valider les résultats obtenus lors de l'étude de la commutation.

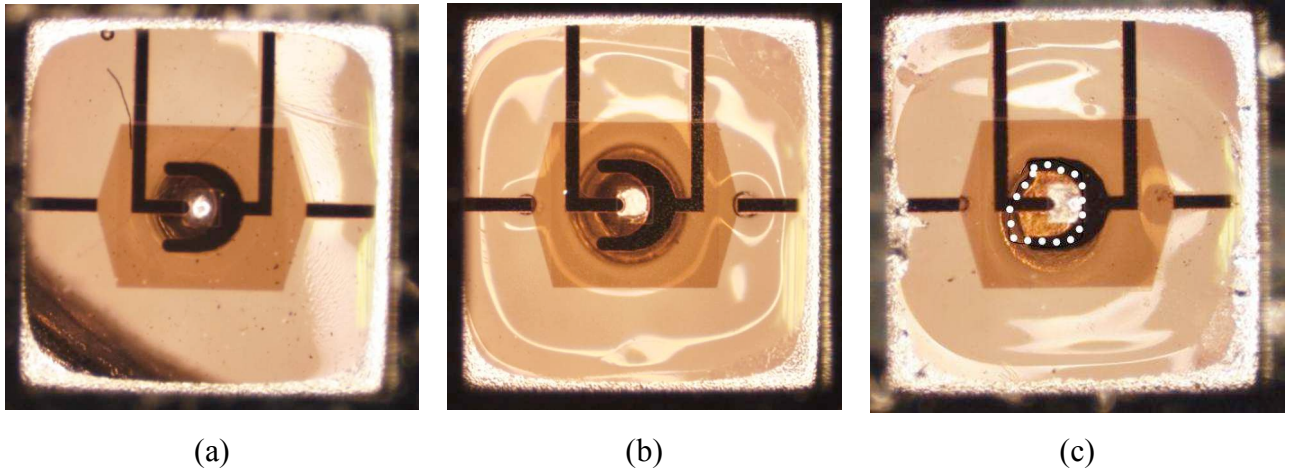


Figure 69. Photographies de l'interrupteur OFF-ON prises par transparence à travers la membrane montrant: position de la bille avant brasure (a), un contact bille-pistes après échauffement insuffisant (b) et un étalement de la bille sur les deux pistes lorsque la brasure est réalisée (c).

L'observation visuelle montre que l'étalement de la bille suit bien les contours de la piste en forme de demi-lune (cf Figure 69 (c)). Sur certaines cellules tests l'étalement ne s'effectue pas sur toute la surface. Cela peut s'expliquer par le fait que nos durées de brasure de quelques centaines de ms, faibles en regard des temps généralement utilisés lors de brasure industrielles, laissent peut de temps à la bille de brasure pour se recentrer sur le motif de brasure et donc s'étaler complètement. Nous n'avons toutefois pas noté de dépendance linéaire entre la durée de brasure et la surface d'étalement. L'étalement sur la piste en demi-lune, même incomplet, amène la bille Sn/Pb en fusion à recouvrir l'autre piste et établir le contact électrique comme nous l'attendions. La surface ainsi recouverte, qui est la plus faible, va établir la limite de l'interrupteur en terme de transport du courant. A partir des photographies de brasure réussies nous avons considéré que le recouvrement s'arrête en moyenne au niveau des extrémités de la piste en demi-lune et la surface recouverte a été évaluée à $6400\mu\text{m}^2$ (cf Figure 70).

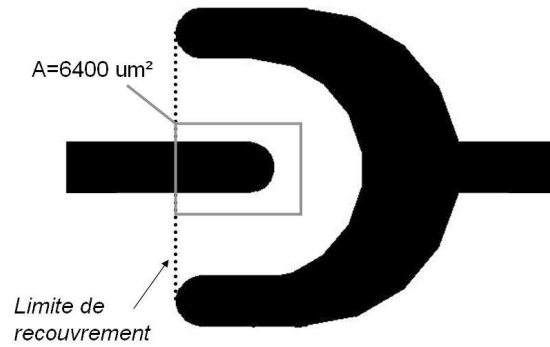


Figure 70. Limite de recouvrement de la bille de brasure en fusion et évaluation de la surface recouverte.

4.4.2 Evaluation de la résistance de contact engendrée par la brasure

Nous cherchons à évaluer la résistance de contact que nous considérons être la résistance de la bille de Sn/Pb et des deux intermétalliques se créant entre les deux pistes à connecter et la bille Sn/Pb. En effet ces éléments sont plus résistifs que le cuivre (Tableau 15) et devraient donc engendrer une résistance supplémentaire en comparaison d'une piste en cuivre continue.

Matériau de l'interrupteur OFF-ON		Résistivité ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)
Cu		1.7
Sn/Pb		14.5
intermétallique	Cu ₆ Sn ₅	17.5 [3]
	Cu ₃ Sn	8.8 [3]

Tableau 15. Résistivité des éléments conducteur de l'interrupteur OFF-ON.

a. Description de l'expérimentation

La mesure de résistance se fait avec un testeur sous pointe Summit Cascade 12K et un testeur paramétrique Keithley 4200-SCS pouvant fournir et mesurer des courants de 100mA avec une précision de 0.1fA et des tensions de 100V avec une précision de 100μV.



Figure 71. Station de test sous pointe Summit Cascade 12K.

On réalise un montage 4 pointes, qui est schématisé sur la Figure 72. Les deux pointes les plus éloignées permettent d'appliquer le courant tandis que celles placées au plus près de la bille de la brasure relèvent la tension. On en déduit alors la valeur de la résistance de la brasure. L'intérêt d'un montage 4 pointes est de séparer le circuit d'alimentation et le circuit de mesure. Ainsi les pointes assurant la mesure ne sont pas traversées par un courant ce qui évite d'avoir une résistance supplémentaire de contact des pointes de mesure sur la piste métallique.

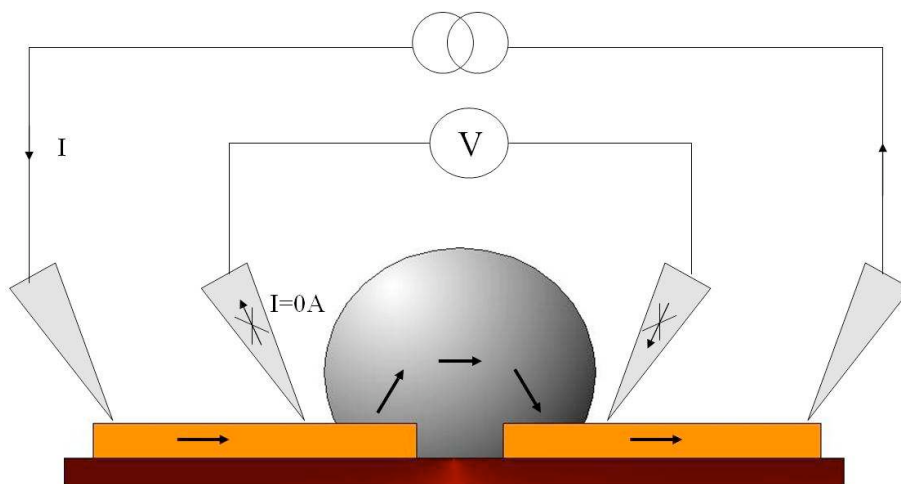


Figure 72. Schématisation du montage 4 pointes.

Pour nos tests, une rampe de courant de 1 à 100mA est appliquée et on relève les tensions associées. La résistance obtenue inclue à la fois la résistance de la brasure mais aussi la résistance des pistes en cuivre entre les pointes et la brasure qu'il faut évaluer et retrancher.

La Figure 73 est une photographie indiquant la position des pointes de mesure par rapport à la bille. Les longueurs L_{Cu_1} et L_{Cu_2} sont évaluées par comparaison avec la largeur des pistes qui est de $60\mu m$ et permettent de calculer la part de résistance de piste dans la mesure.

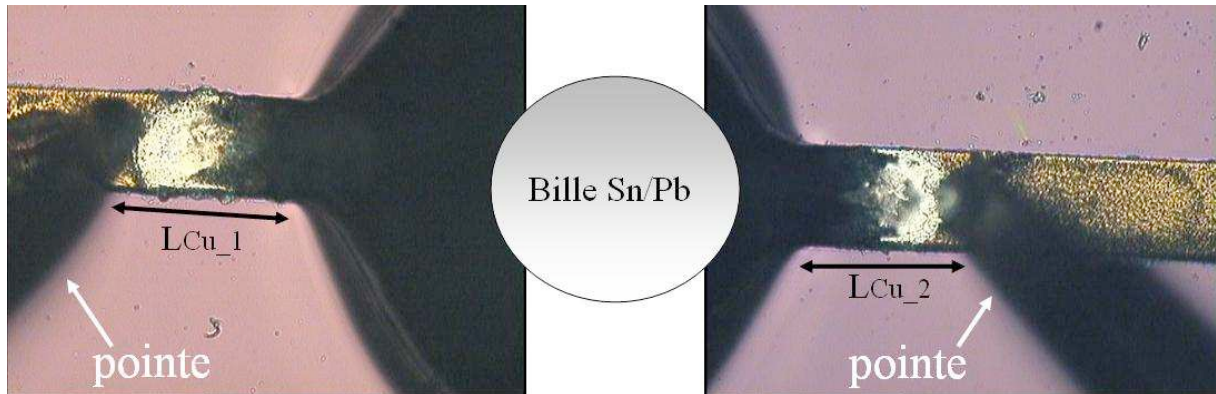


Figure 73. Position des pointes par rapport à la bille de brasure : l'écart défini par L_{Cu_1} et L_{Cu_2} engendre une résistance supplémentaire qu'il faudra retrancher à la mesure.

b. Résultat et analyse

Les tests ont été effectués pour des brasures réalisées avec une puissance de 200mW appliquée pendant 15s. La résistance de brasure obtenue est $7.05m\Omega$ avec une dispersion de $\pm 20\%$. Cet écart important peut s'expliquer par l'étalement de la bille Sn/Pb sur les pistes à connecter n'est pas toujours la même, ce qui entraîne des variations de section et donc de résistance. Nous n'avons toutefois pas été en mesure de quantifier ce phénomène. Ces tests mettent toutefois en avant la qualité du contact par rapport à des micro-interrupteurs à contact solide-solide caractérisés par des résistances de contact égales à quelques dizaines de $m\Omega$ [4].

4.4.3 Tenue en courant

La tenue en courant est un paramètre important que doit satisfaire l'interrupteur OFF-ON dans le cadre de notre application. La faible résistance de contact qui a été mesurée permet d'envisager une capacité de transport du courant importante. Nous avons ainsi appliqué 1A pendant 5min sans noter de dégradation. Nous avons aussi cherché à connaître le courant maximal admis par l'interrupteur sans dégradation. Nos tests montrent, que pour la géométrie choisie, il est possible de passer jusqu'à 1.4A sans dégradation. L'interrupteur présente deux surfaces de contact entre la bille de Sn/Pb et chacune des pistes. La surface la plus faible, limitant le niveau de courant, a été évalué au paragraphe 4.4.1 à $6400\mu m^2$, ce qui donne une densité de courant au niveau du contact de $0.02 \cdot 10^6 A/cm^2$. Au niveau des pistes en cuivre la densité de courant est comme pour l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique, de $0.57 \cdot 10^6 A/cm^2$,

ce qui nous laisse penser que ce sont les pistes en cuivre qui limitent la tenue en courant et non pas la brasure. La valeur plus faible de courant de 1.4A contre 1.7A pour l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique, s'expliquerait par l'absence de matériau pyrotechnique qui dissipe une partie de la chaleur.

Pour vérifier ces hypothèses, nous avons fait de tests de tenue en courant avec un interrupteur ON-OFF pyrotechnique non rempli de matériau pyrotechnique. On retrouve une valeur maximale de courant de 1.4A.

Ainsi, nous pouvons conclure que la limite en courant qui a été observée pour l'interrupteur OFF-ON est due à l'échauffement des pistes et non pas au contact de la brasure. On peut ainsi avoir une tenue en courant beaucoup plus importante par un dimensionnement adéquat des pistes. Il conviendrait toutefois d'acquérir la limite en courant du contact électrique par brasure pour connaître la limite de fonctionnement de l'interrupteur.

5. Vérification fonctionnelle du démonstrateur

PYROSECURE

Les différents composants du démonstrateur ont été caractérisés. Les performances des interrupteurs sont en accord avec les spécifications requises pour des essais de système complet:

- Ils acceptent en position de veille le passage d'un courant d'au moins 1A sans dégradation comme l'exige la norme 1A/1W/5min [5]. En fait, le concept de protection par un interrupteur ON-OFF pyrotechnique ou bien OFF-ON après commutation autorise des courants plus élevés par un choix judicieux de la géométrie des pistes.
- Les puissances d'actionnement sont de quelques centaines de mW. Cela correspond à des énergies de l'ordre de 10mJ pour l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique et 100mJ pour l'interrupteur OFF-ON. Nos interrupteurs sont donc compatibles avec les contraintes énergétiques des microsystèmes qui sont au maximum de 100 mW/cm².
- Les temps de commutation des interrupteurs sont inférieurs à 1s qui est la durée maximale pour l'armement et par extension des fonctions sécuritaires assurées par les interrupteurs [6].

En ce qui concerne le micro-initiateur les performances ne sont pas celles attendues et cela pour des problèmes de fiabilité d'initiation et de maîtrise des temps d'initiation. Toutefois ce problème a été identifié comme étant lié au matériau pyrotechnique non adapté car peu réactif et à la méthode de remplissage qui pourra être améliorée en utilisant des technologies de type sérigraphie par exemple. Il s'agit toutefois d'un problème général des initiateurs à fil chaud, qui nécessitent un long travail expérimental d'optimisation.

Ces différents tests valident la faisabilité de ces composants et leur compatibilité avec une intégration dans le démonstrateur PYROSECURE.

Pour compléter l'étude nous nous sommes donc assuré que l'intégration des interrupteurs autour de l'initiateur permettait bien d'assurer les fonctions sécuritaires définies lors de la conception. La validation a été réalisée en activant successivement les différents états sécurisés du système :

- état initial sécurisé (cf Figure 74 (a)),
- état armé (cf Figure 74 (b)),
- état désarmé (cf Figure 74 (c)),
- état stérilisé (cf Figure 74 (d)),

Pour chaque état, on a vérifié que la configuration du système est bonne : court-circuit à la masse ou non, rupture de la piste d'alimentation.

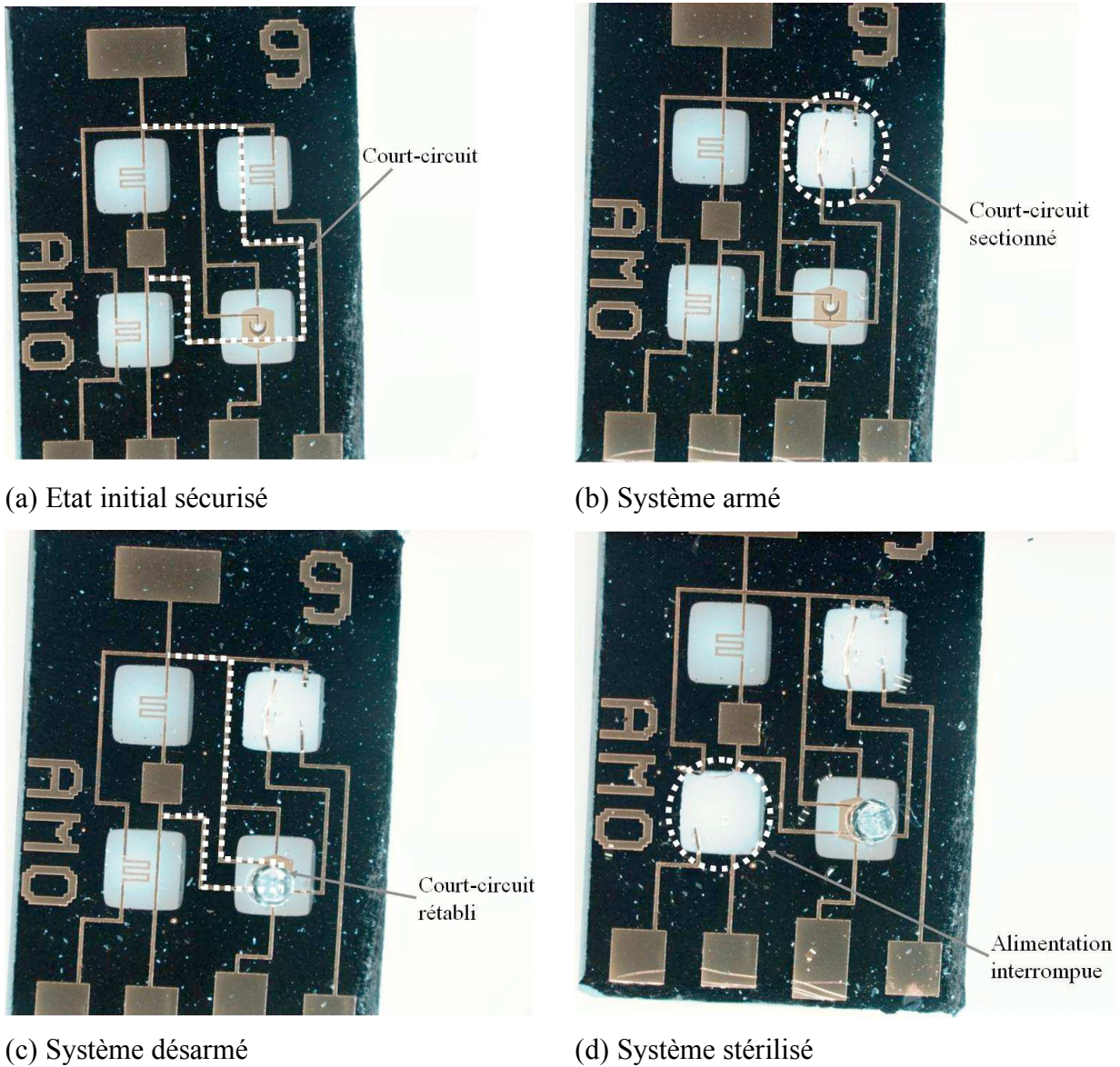


Figure 74. Différents positions sécurisées du démonstrateur PYROSECURE.

La valeur de résistance du court-circuit a ainsi été mesurée dans la configuration initiale puis désarmé. Elle est respectivement de 0.7 et 0.6Ω , la différence étant dû principalement à la différence sur la longueur des pistes. A partir de ces valeurs et en prenant la valeur théorique de la résistance de l'initiateur ($R_{initiateur} = 500\Omega$), on peut calculer à partir des équations (1) et (2) le courant $I_{initiateur}$ traversant l'initiateur lorsqu'on applique $1A$ sur le circuit sécurisé :

$$I_{circuit} = I_{cc} + I_{initiateur} = 1A \quad (2)$$

$$V = R_{cc} \leq I_{cc} = R_{initiateur} \leq I_{initiateur} \quad (3)$$

On obtient un courant traversant l'initiateur de 1.4 mA si le système est dans l'état sécurisé initial ou bien de 1.2 mA s'il a été désarmé. Ceci correspond dans les deux cas à une

puissance dissipée inférieure au mW qui est largement insuffisante pour initier le matériau pyrotechnique.

Les résultats obtenus montrent donc que les différentes fonctions définies sont assurées ce qui valide notre architecture de micro-initiateur sécurisé PYROSECURE.

6. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la caractérisation de chacun des composants (initiateur, interrupteurs ON-OFF et OFF-ON) du démonstrateur PYROSECURE ainsi qu'à la validation des fonctions sécuritaires intégrées (armement, désarmement, stérilisation). Dans un premier temps, nous avons caractérisé le fonctionnement de chaque composant de manière individuelle :

- micro-initiateur pyrotechnique,
- interrupteur ON-OFF pyrotechnique,
- interrupteur OFF-ON.

Les tests d'initiation ont été effectués pour le micro-initiateur avec un matériau de type PAG/PA qui n'est pas adapté à l'application mais qui permet de mettre en évidence la capacité de l'initiateur à initier une charge pyrotechnique. Nous avons trouvé qu'il fallait appliquer un minimum de 150mW pour initier le matériau placé dans la cavité sous la membrane et des temps d'initiation de 20ms ont été mesurés pour des puissances de 500mW. Nous avons noté une très faible reproductibilité que nous avons imputée au matériau utilisé, peu réactif, et à la méthode de remplissage utilisée.

L'interrupteur ON-OFF pyrotechnique, qui reprend la même base technologique que l'initiateur, a donné les mêmes résultats en terme de puissance minimale et de temps d'initiation qui correspond dans notre cas au temps de commutation. Le concept d'interruption électrique par rupture d'une piste a pu être validé malgré les problèmes de reproductibilité d'initiation qui ont été encore une fois rencontrés. Avec la géométrie choisie (section de piste de $300\mu\text{m}^2$), nous avons pu passer dans l'état ON un courant de 1.7A avant de noter une dégradation. Après commutation, l'intervalle d'interruption de la piste est de la taille de la cavité (1.5mm) ce qui assure une isolation parfaite.

L'interrupteur OFF-ON commute dans l'état ON avec une puissance minimale de 200mW. Le temps de commutation minimum que nous avons pu mesurer est de 320ms sous 400mW. L'isolation dans l'état OFF initial a été vérifiée et après commutation la résistance de la brasure a été évaluée à $7\text{m}\Omega$. Le courant maximal passant à l'état ON est de 1.4A avant de

noter une dégradation. La différence avec l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique est due à l'absence de matériau pyrotechnique sous la membrane et donc une moins bonne dissipation thermique.

Ces tests ont montré que ces nouveaux concepts d'interrupteurs répondaient aux spécifications qui ont été donnés lors de l'exposition des concepts, en terme électrique notamment : faible résistance de contact dans l'état ON, isolation mécanique dans l'état OFF, capacité à conduire de forts courants...

Nous avons ensuite validé le fonctionnement global du démonstrateur PYROSECURE : les différentes fonctions ont été activées avec succès. Pour le dimensionnement réalisé et qui n'est pas optimal, la résistance du court-circuit est inférieure à l'ohm, et nous avons calculé que seulement 1mW traversait l'initiateur lorsque le circuit sécurisé est traversé par 1A. Cette valeur est suffisant faible pour s'assurer que l'initiation n'aura pas lieu et que le matériau énergétique ne se dégradera pas.

L'étape suivante sera d'étudier plus en détail la fiabilité de fonctionnement notamment après plusieurs années de stockage. Les études devront prendre en compte :

- Les effets de vieillissement des membranes, surtout en présence de contraintes thermiques cycliques.
- Les effets du vieillissement des isolants colophane qui ne sont pas connus de ce point de vue.
- Les effets de délaminage qui peuvent intervenir notamment sur la membrane et dans la chambre de combustion, par rapport au matériau énergétique.

Il sera aussi nécessaire d'étudier le fonctionnement du système soumis à diverses vibrations et chocs, et identifier sa gamme de température de fonctionnement. Actuellement, il apparaît naturel de considérer que la limite supérieure est la température de fusion de la colophane, qui est de 83°C dans le système réalisé mais qui peut être plus élevée. Il conviendra de vérifier cette hypothèse et d'identifier la limite inférieure.

Ces tests n'ont pas été réalisés dans le cadre de mes travaux de thèses qui visaient à une validation de nouveaux concepts, à savoir les interrupteurs et l'architecture PYROSECURE, mais ils feront l'objet d'une étude ultérieure.

Conclusion générale

Le développement qui a été conduit durant ces trois années de thèse a porté sur la conception et la réalisation d'un système d'initiation miniature sécurisé. Les travaux ont été réalisés en réponse à la problématique générale de sécurisation de systèmes d'initiation miniaturisés à priori, donc de plus en plus sensibles à des perturbations externes.

Le système proposé se compose d'un micro-initiateur pyrotechnique sur silicium dérivé des développements antérieurs réalisés dans l'équipe micropyrotechnie du groupe MIS (Microsystème et Intégration des Systèmes) au LAAS-CNRS. Nous y avons associé des fonctions sécuritaires complémentaires intégrées sur le même substrat. Toutes les étapes du processus de développement ont été conduites à terme, de la recherche de solution, qui a permis la conception, puis la réalisation d'un démonstrateur, jusqu'aux premières caractérisations.

Dans le premier chapitre, nous avons rappelé les applications, en pleine évolution, de la pyrotechnie et présenté la composition habituelle des systèmes d'amorçages existants. Dans les applications militaires de type obus et missiles, ceux-ci prennent la forme de systèmes complexes et autonomes, incluant outre la fonction initiation, des modules d'alimentation, des capteurs, une commande et des fonctions sécuritaires. La sécurité est primordiale dans les systèmes pyrotechniques et est assurée par des protections mécaniques de type désalignement de chaîne et des protections électriques. Ces dernières appliquent un concept de désensibilisation volontaire par une augmentation du seuil de déclenchement qui répond à la norme 1A/1W/5min non feu [1]. Aujourd'hui, l'orientation donnée à la conception de ces systèmes d'amorçage est de réduire les dimensions et les coûts. Dans les différents initiateurs qui ont été présentés nous avons vu que les plus adaptés sont les initiateurs à faible énergie : simplicité des concepts, faible niveau de consommation énergétique, flexibilité dans la forme d'apport de cette énergie...

Le concepteur que nous sommes s'est donc trouvé confronté à un double problème: **proposer un système à faible niveau d'énergie, compatible avec les technologies microsystèmes, assurant un niveau de sécurité conforme aux normalisations existantes**. Pour répondre à ce défi, nous avons défini une architecture nouvelle de micro-initiateur sécurisé basée sur l'intégration d'interrupteurs commandables placés autour d'un initiateur, à base de fil chaud sur membrane, réalisé sur silicium, que nous avons appelé **PYROSECURE**.

Dans le chapitre 2, les détails de cette architecture ont été présentés. Nous avons commencé par fixer les spécifications auxquelles le système devait répondre notamment le respect des normes de sécurité et défini les fonctions sécuritaires assurées par le système :

- armement,
- désarmement,
- stérilisation.

Notre proposition conserve l'idée d'un initiateur basé sur l'effet Joule, initialement positionné en **veille sécurisée par un court-circuit intégré entre les deux contacts de la résistance de chauffe**. Sur cette base, les fonctions **armement** et **désarmement** vont consister à **supprimer ou rétablir ce court-circuit** tandis que la fonction **stérilisation** consiste à **interrompre la piste d'alimentation**. L'ensemble de ces fonctions doit être réalisé par l'intégration d'interrupteurs autour de l'initiateur, comme le représente la Figure 75.

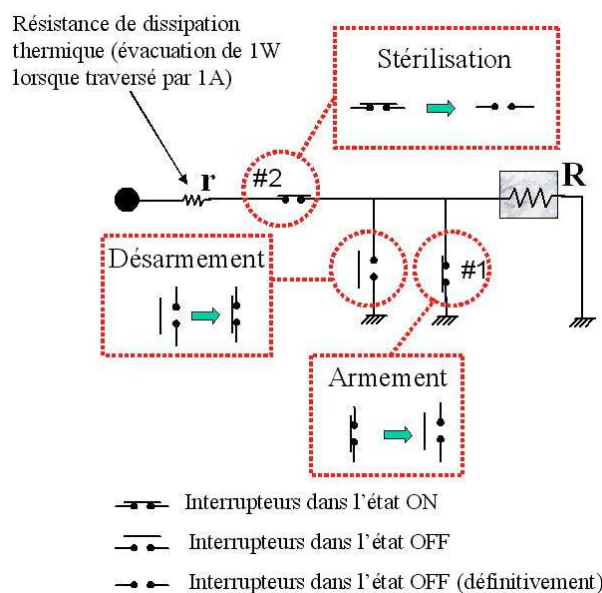


Figure 75. Schématisation de la micro-amorce (en position de veille sécurisée) avec ses fonctions sécuritaires.

Pour que le système puisse, selon la norme, dissiper 1W lorsqu'il est traversé par 1A, nous proposons d'associer au système précédent une résistance de dissipation thermique, qui doit être l'élément le plus résistif du circuit lorsque celui-ci est en veille sécurisée de manière à dissiper toute la puissance. Il faut aussi que cette résistance ne perturbe pas l'initiation lorsque le système est armé : pour ce faire elle doit être choisie de valeur négligeable par rapport à la résistance de chauffe de l'initiateur.

La suite du chapitre a été consacrée à l'exposé des concepts des nouveaux composants qui devront être intégrés dans PYROSECURE : l'initiateur pyrotechnique a été réalisé sur la base des travaux antérieurs effectués au LAAS et **les fonctions sécuritaires sont réalisées par des interrupteurs électrothermiques monocoup d'un genre nouveaux inaugurant une nouvelle filière micropyrotechnique** :

- Le micro-interrupteur ON-OFF pyrotechnique consiste à sectionner une piste qui traverse un micro-actionneur pyrotechnique. L'initiation du matériau pyrotechnique amène une rupture de la membrane et donc de la piste conductrice. Une filière alternative, appelé interrupteur ON-OFF thermique, consistant à utiliser directement l'énergie thermique d'un élément résistif pour faire fondre la piste conductrice a été présentée.
- Un micro-interrupteur OFF-ON, qui consiste à réaliser une micro-brasure commandable entre les deux pistes à connecter. Les faibles surfaces de brasure mise en jeu ne nécessitent pas l'apport énergétique d'un matériau pyrotechnique, nous nous sommes donc contentés d'un apport d'énergie par plateforme chauffante.

Dans le chapitre 3, nous nous sommes attachés à la réalisation du démonstrateur pour valider la faisabilité de notre proposition. **Ce démonstrateur intègre un micro-initiateur pyrotechnique, deux interrupteurs ON-OFF pyrotechniques ainsi qu'un interrupteur OFF-ON, le tout sur un substrat de moins de 1 cm².**

Dans un premier temps, les différents composants ont été dimensionnés comme suit:

- L'initiateur consiste en un élément chauffant de $540 \times 540 \mu\text{m}^2$ sur une membrane diélectrique de $1.5 \times 1.5 \text{ mm}^2$ sous laquelle est placé le matériau à initier
- L'interrupteur ON-OFF pyrotechnique reprend la géométrie de l'initiateur avec la piste à interrompre qui traverse la membrane
- L'interrupteur OFF-ON consiste en un élément chauffant sur membrane fournissant l'énergie nécessaire pour la fusion de la bille de brasure Sn/Pb de $350 \mu\text{m}$ de diamètre. Des tests ont dû être fait pour définir la meilleure forme des pistes à connecter (type doigts interdigités) et leur épaisseur ($5 \mu\text{m}$).

Des simulations effectuées pour les interrupteurs ont permis de voir qu'il faut une puissance minimum de 65mW et 170mW pour faire fonctionner respectivement l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique et l'interrupteur OFF-ON. En outre des temps de commutation de 10ms sont envisageables pour l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique.

La suite du chapitre a été consacrée à la présentation du procédé de fabrication du système. Ce procédé fait appel à des techniques classiques de microtechnologie et ne nécessite que 4 masques. L'étape la plus délicate reste la libération des membranes qui définit le rendement de fabrication. Nous avons réussi à obtenir 95% de membranes utilisables, ce qui équivaut à un rendement de 80% pour le démonstrateur fonctionnel. Des améliorations potentielles visant à réduire les étapes d'assemblages manuelles et coûteuses ont été envisagées : dépôt du matériau pyrotechnique et de l'élément de brasure par des techniques de microtechnologie.

Le chapitre 4 a eu pour objectif de valider le fonctionnement du démonstrateur PYROSECURE. Ses performances sont évidemment intimement liées aux performances de chacun des composants intégrés. Nous avons donc commencé par caractériser le comportement de ces composants (initiateur et interrupteurs) et transposé les résultats au cas du démonstrateur. A cette occasion, les différentes fonctions sécuritaires ont été testées et les résultats positifs obtenus ont permis de valider notre proposition.

Concernant les performances des composants :

- L'initiateur a été testé avec un matériau de type PAG/PA, beaucoup moins réactifs que les matériaux explosifs qui seront utilisés à terme. Nous avons toutefois vérifié qu'il était possible d'initier des matériaux pyrotechniques dans des cavités à l'échelle millimétrique. Nous avons mis en évidence des problèmes de reproductibilité de l'initiation liés au matériau utilisé mais aussi à la méthode de remplissage. Les tests effectués ont permis de voir qu'il était possible d'initier un matériau avec un minimum de 150mW et des temps de 24ms ont été obtenus pour une puissance de 500mW.
- Pour l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique, nous avons utilisé le même matériau pyrotechnique que pour l'initiateur ce qui nous a donné à peu près les mêmes performances, à savoir une puissance minimale de commutation de 150mW et un temps de commutation minimum de 25ms obtenu pour 500mW. Nous avons, malgré les problèmes de reproductibilité déjà évoqués, pu observer que l'interruption d'une piste électrique était possible et ainsi parfaitement validé le concept. Les mesures mettent en évidence l'avantage de n'avoir initialement aucune résistance de contact puis, après commutation dans l'état OFF, un espacement entre les pistes interrompues de la taille de la cavité, soit de 1.5mm.
- L'interrupteur OFF-ON nécessite une puissance minimale de 200mW et des temps minimum de 320ms ont été atteints avec 400mW. Ces temps de commutations sont

encore importants et devront être réduits en réduisant par exemple le volume de la bille Sn/Pb. Toutefois, le mécanisme de la commutation qui nécessite la mise en fusion de la bille, un rapprochement et un étalement de celle-ci sur les pistes, comporte des limites de temps de réponse intrinsèque.

Finalement les travaux effectués ont permis de répondre à la problématique initiale de sécurisation de systèmes d'initiation miniatures de plus en plus sensibles même si le démonstrateur actuel ne représente pas complètement un produit final. Des améliorations sont encore à apporter, notamment au niveau du procédé de fabrication en vue de le rendre totalement collectif. Ajoutons que le système a été conçu pour résister aux vibrations et chocs inhérents à toute application embarquée (pas d'éléments mobile source de défaillance) et pouvoir être stocké un grand nombre d'années sans dégradation (utilisation d'éléments stables). Des tests supplémentaires devront être réalisés pour évaluer précisément dans quelle mesure le système répond à toutes les attentes.

L'innovation de notre proposition réside dans le fait d'intégrer dans un même substrat plusieurs fonctions imbriquées. On franchit ainsi une étape par rapport aux développements antérieurs de microsystème focalisés sur les niveaux composants alors que nous avons travaillé dans un esprit microsystème. La simplicité du procédé de fabrication permet en outre d'envisager l'intégration sur ce même substrat de capteurs divers, des circuits électroniques de commande... On pourra aussi envisager d'intégrer, par des techniques d'assemblage multiplaques, une protection mécanique venant bloquer la propagation de l'onde de choc en cas d'initiation parasite.

En ce sens, les travaux effectués pendant cette thèse s'inscrivent parfaitement dans les orientations prises par les industriels de l'armement, qui visent à la réalisation d'une amorce en technologie microsystème de taille réduite, intégrant l'ensemble des fonctionnalités des amorces conventionnelles. Ces travaux, qui ont donné lieu à un dépôt de brevet [2], devraient donc se prolonger au cours d'une nouvelle thèse en s'orientant vers des intégrations plus poussées avec éventuellement des systèmes de protection mécanique.

Sur le plan de l'innovation, l'étude menée a aussi été l'occasion de **développer de nouveaux concepts d'interrupteurs** ayant de très bonnes caractéristiques de conduction à l'état ON ou d'interruption dans l'état OFF et dont l'application peut être étendue à d'autres domaines que l'armement. Leur caractère monocoup les rend parfaitement adaptés aux systèmes sécuritaires en général, à usage unique : airbag, système d'éjection... Ils peuvent aussi intervenir dans la reconfiguration de systèmes, par exemple dans des applications de redondance pour les

systèmes embarqués. Dans ce cas là on cherche lorsqu'un module est défaillant à basculer sur un nouveau module fonctionnel et ceci de manière définitive et avec une grande fiabilité. **La poursuite de ces travaux serait aussi l'occasion de développer une véritable filière de dispositifs sécuritaires à base de composants pyroélectriques** assurant les fonctions d'actionnement mais aussi de logique de commande.

ANNEXES

ANNEXE 1 : Etude de l'interrupteur ON-OFF thermique, solution alternative à l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique.

L'objectif de cette annexe est de reprendre toutes les étapes de développement de l'interrupteur ON-OFF thermique réalisé en parallèle du démonstrateur PYROSECURE qui n'intègre que les interrupteurs ON-OFF pyrotechnique et OFF-ON.

Les points abordés sont :

- rappel du concept,
- dimensionnement,
- fabrication,
- caractérisations.

Dans ces différentes parties nous verrons que des points communs avec les autres interrupteurs apparaissent. Pour ces points, explicités dans le manuscrit de thèse, nous ne referons pas un développement détaillé.

1. Concept de l'interrupteur ON-OFF thermique

La solution envisagée pour s'affranchir de l'utilisation de matériau pyrotechnique est d'utiliser directement l'énergie thermique dégagée par l'élément chauffant pour faire évaporer la piste conductrice placée au contact (cf Figure 27).

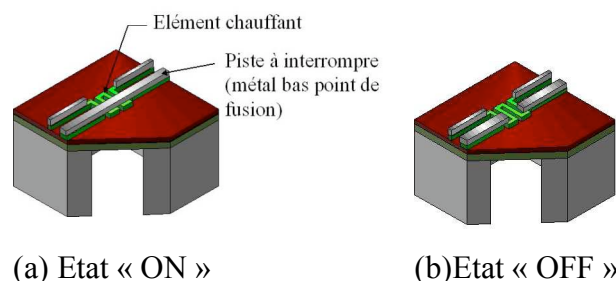


Figure 76. Concept de l'interrupteur ON-OFF thermique : la piste électrique à interrompre est placée sur l'élément chauffant (a) et fond lorsque la commutation est demandée (b).

L'interrupteur développé reprend la structure d'un micro-actionneur pyrotechnique non rempli avec une piste conductrice en aluminium traversant l'élément chauffant. Le choix de l'aluminium a été justifié dans le chapitre 2 par sa faible résistivité électrique ($2.7 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$) et son bas point de fusion (660°C).

2. Dimensionnement de l'interrupteur ON-OFF thermique

L'interrupteur reprend la géométrie des plateformes chauffantes des micro-initiateurs et interrupteurs ON-OFF pyrotechnique, qui ont été exposées au chapitre 2 : résistance en polysilicium de $0.5\mu\text{m}$ d'épaisseur en serpentin occupant une surface de $540 \times 540 \mu\text{m}^2$ et déposée sur une membrane diélectrique $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ ($1.4\mu\text{m}/0.6\mu\text{m}$).

La piste à interrompre est déposée directement sur la résistance chauffante et une couche d'oxyde PECVD de $0.7\mu\text{m}$ d'épaisseur assure l'isolation électrique. Le dimensionnement de la piste en aluminium n'a pas été réalisée dans l'optique de passer un courant supérieur à 1A comme l'exige la norme. L'objectif est, pour valider le concept, d'avoir une épaisseur de piste qui puisse assurer un bon recouvrement de marche tout en étant assez réduite pour avoir un volume à mettre en fusion réduit et ainsi ne pas atteindre les limites de fonctionnement de la plateforme chauffante. Nous avons donc réalisé des pistes en aluminium de $0.7\mu\text{m}$ d'épaisseur avec une largeur de $60\mu\text{m}$.

La Figure 77 présente l'interrupteur ON-OFF thermique avec ses principales côtes.

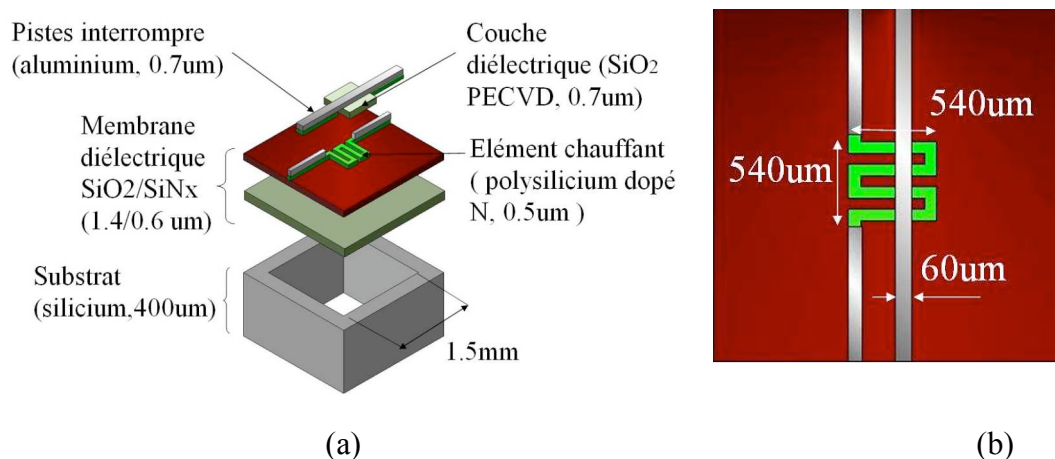


Figure 77 Schéma de l'interrupteur On-OFF thermique: vue éclatée indiquant les couches et leurs épaisseurs (a), et vue de dessus avec les côtes (b).

Comme pour les interrupteurs ON-OFF pyrotechniques et OFF-ON, nous avons validé le fonctionnement de l'interrupteur ON-OFF thermique par des simulations aux éléments finis réalisées avec le logiciel MEMCAD. L'objectif est de connaître la puissance minimale à appliquer pour atteindre la température de fusion de l'aluminium ainsi que le temps nécessaire. La structure étudiée est la structure complète telle qu'elle a été développée (Figure 77). Le substrat occupe une surface de $2.5 \times 2.5 \text{ mm}^2$ avec la cavité de $1.5 \times 1.5 \text{ mm}^2$ centrée.

Les propriétés physiques des matériaux importantes pour les études thermiques sont la conductivité thermique, la chaleur spécifique, la densité des matériaux de structure. Ces caractéristiques sont présentées dans le Tableau 4 pour l'aluminium, les caractéristiques des autres matériaux ayant déjà été exposées au cours du chapitre 3.

	Conductivité thermique (W/m.K)	Chaleur Spécifique (J/kg.K)	Densité (g/cm ³)
Aluminium	1.4	1000	2.27

Tableau 16. Récapitulatif des propriétés physiques de l'aluminium nécessaire aux simulations thermiques.

Les conditions aux limites choisies pour l'étude de l'interrupteur ON-OFF visent à définir son environnement et restent proches de celles des autres interrupteurs. On applique ainsi une différence de potentiel sur le bord des pistes d'alimentation en cuivre. Une température constante de 22°C est appliquée sur le bord des pistes métalliques. Le dessous de la structure est fixé à une température constante de 22°C. Comme le silicium est fortement conducteur thermique et pour que cette condition ne soit pas trop contraignante sur la répartition thermique, un substrat de pyrex est rajouté au-dessous, de même dimension que celle de l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique. Enfin des pertes par convection ($h=125 \text{ W/m}^2.\text{K}$) sont appliquées sur les surfaces supérieures de la structure.

La Figure 40 reprend la géométrie de l'interrupteur ON-OFF thermique qui a été simulé ainsi que les conditions aux limites appliquées.

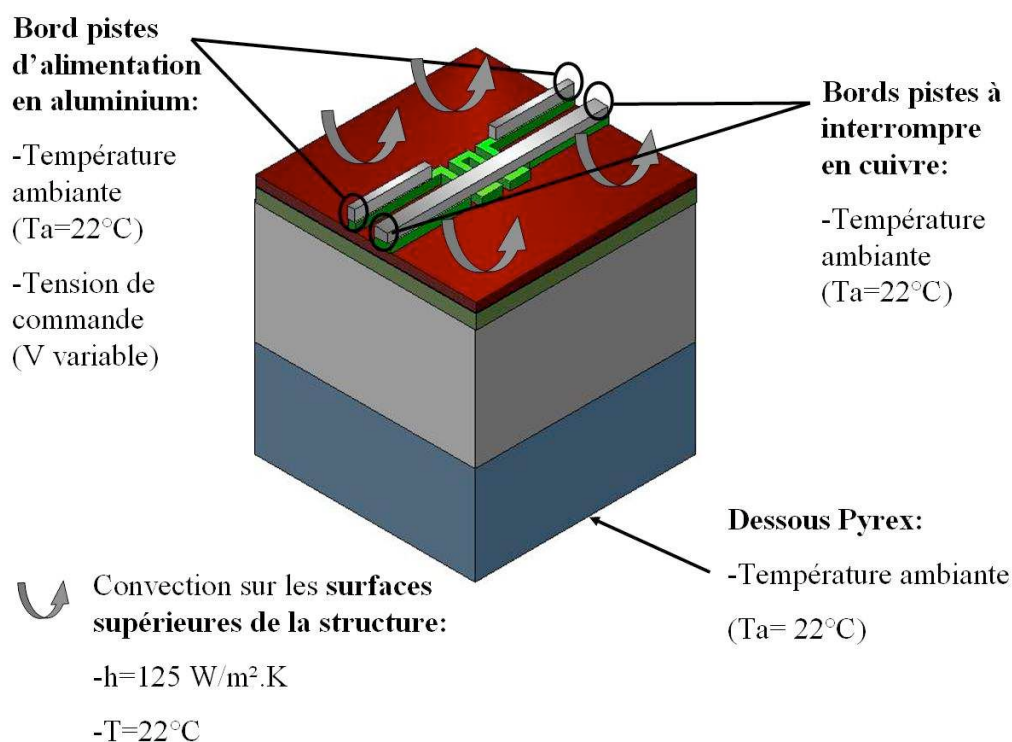


Figure 78. Géométrie et conditions aux limites utilisées pour la simulation de l'interrupteur ON-OFF thermique.

Les résultats des simulations de l'interrupteur ON-OFF thermique sont présentés à la Figure 34. Pour atteindre la température de fusion de la piste en aluminium, il faut au minimum appliquer une puissance de 150mW (Figure 34(a)). En dessous de cette valeur la commutation ne peut être réalisée. Les temps de commutation diminuent lorsque la puissance appliquée augmente (Figure 34(b)) : ils passent de 50ms à 5ms lorsque la puissance varie de 150 à 400mW.

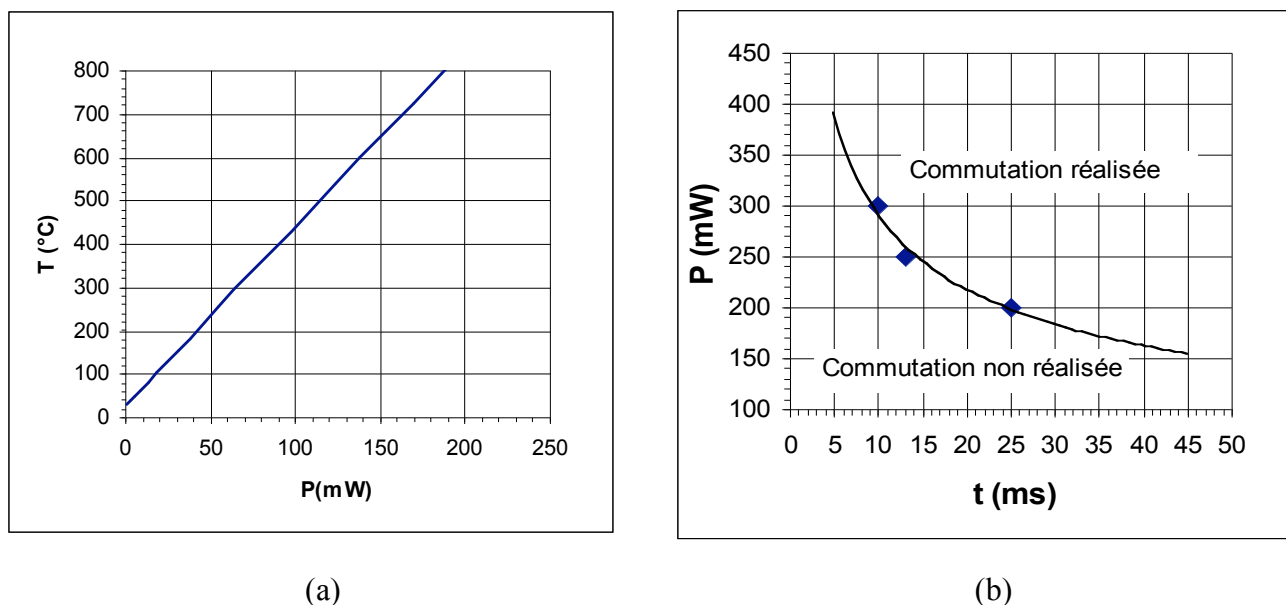


Figure 79. Résultat des simulations de l'interrupteur ON-OFF thermique : température maximale au niveau de l'élément chauffant (a) et temps de commutation (b) en fonction de la puissance appliquée.

3. Réalisation de l'interrupteur ON-OFF thermique

3.1. Géométrie de la cellule test intégrant l'interrupteur ON-OFF thermique

Pour valider son fonctionnement l'interrupteur ON-OFF thermique est positionné sur une cellule test en série avec une résistance de test dont la mesure permettra de déduire l'état ON ou OFF de l'interrupteur. La Figure 80 schématise la cellule test avec ses principales dimensions.

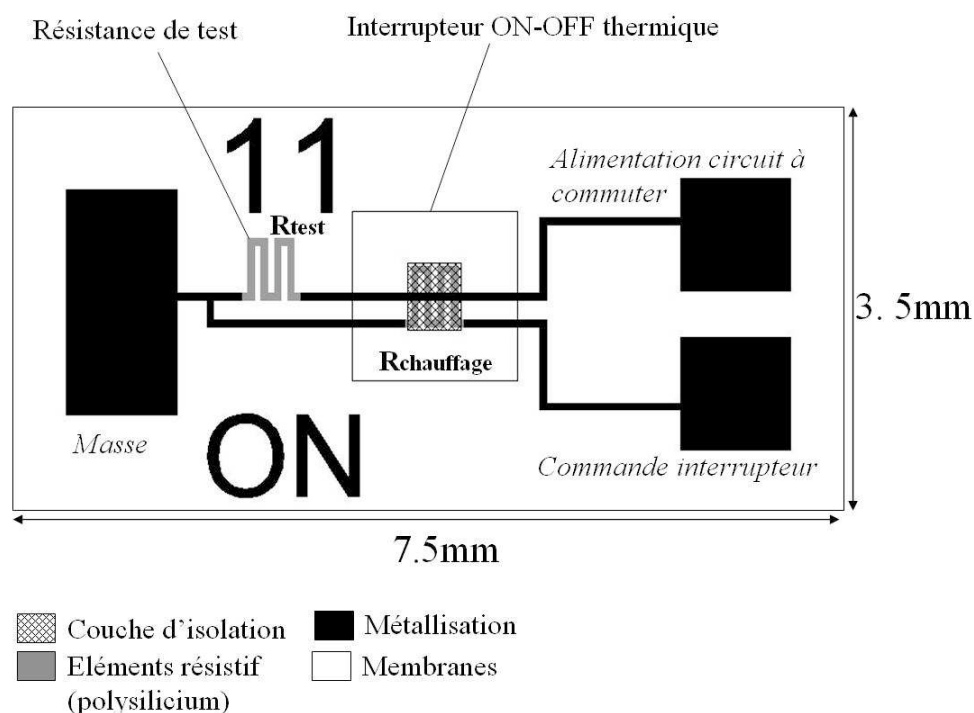


Figure 80. Schématisation de la cellule test de l'interrupteur ON-OFF thermique : l'interrupteur est placé sur la ligne d'alimentation d'une résistance de test.

3.2. Procédé de fabrication de l'interrupteur ON-OFF thermique

Le procédé de fabrication de l'interrupteur ON-OFF thermique reprend les mêmes premières étapes que celui du démonstrateur PYROSECURE :

- Etapes d'oxydation thermique et de dépôt LPCVD de SiN_x .
- Dépôt LPCVD de polysilicium puis dopage de type N avec du phosphore.
- Gravure RIE du polysilicium pour réaliser les éléments résistifs.
- Dépôt d'une couche de SiO_2 PECVD sur la résistance en polysilicium de l'interrupteur ON-OFF thermique pour l'isolation électrique

Ensuite un dépôt d'aluminium en phase vapeur par lift-off à l'aide d'une résine 5214^E est réalisé. La cible d'aluminium est en fait un alliage AlSi ayant une part de silicium de 1%. L'utilisation de cet alliage permet de limiter la diffusion de l'aluminium au niveau des contacts.

Les étapes qui suivent visant à libérer les membranes sont les mêmes que pour le procédé de fabrication du démonstrateur PYROSECURE :

- Gravure RIE pleine plaque en face arrière des couches de polysilicium, de SiN_x et d'oxyde thermique.

- Gravure DRIE du silicium pour réaliser des cavités.

Après ces étapes, il suffit de cliver la plaque en cellule individuelle pour avoir un système fini. En effet le concept ne nécessite aucune étape particulière d'assemblage pour être fonctionnel et son procédé de fabrication est totalement collectif. Outre les aspects coûts, cela permet d'atteindre une très bonne reproductibilité du procédé de fabrication.

4. Caractérisation de l'interrupteur ON-OFF thermique

On reprend la même logique de caractérisation que les interrupteurs ON-OFF pyrotechniques et OFF-ON :

- Caractérisation de l'état initial ON.
- Caractérisation de la commutation de l'état ON vers OFF.
- Caractérisation de l'état final OFF.

4.1. Caractérisation de l'état initial : état ON

Le concept de l'interrupteur ON-OFF thermique basé sur une commutation dans l'état OFF par rupture d'une piste, ne présente aucune résistance de contact. Les performances en terme de tenue en courant dépendent de la géométrie de la piste à interrompre. N'étant pas intégré sur le démonstrateur PYROSECURE, ses performances en courant n'ont pas été un critère de conception.

4.2. Commutation de l'interrupteur dans l'état OFF

Pour caractériser la commutation le même protocole expérimental que celui exposé au paragraphe 3.3 du chapitre 3 a été suivi. Pour chaque couple (P,t) obtenus, 10 essais ont été réalisés pour vérifier leur validité et la reproductibilité. Les résultats obtenus sont exposés dans le Tableau 17.

Puissance (mW)	100	105	110	125	200	400	500
R _{chauffage} (Ω)	1000	975	945	961	1055	1086	998
Courant appliqué (mA)	10	10.4	10.8	11.4	13.7	19.2	22.4
Temps de commutation (ms)	inf	65	65	40	17	10	7
Energie (mJ)	inf	6.8	7.15	5	3.4	4	3.5
R _{test avant} (Ω)	1000	880	865	870	955	983	904
R _{test après} (Ω)	860	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
Fiabilité de commutation (%)	0	100	100	100	100	100	100

Tableau 17. Récapitulatif des tests de commutation pour l'interrupteur ON-OFF thermique.

La puissance minimale à appliquer est 105mW, qui est bien inférieure à la valeur de 150mW prévue par les simulations. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'aluminium pur utilisé lors de nos simulations est remplacé par un alliage $\text{AlSi}_{0.01}$, qui lorsque sa température atteint 600°C fond comme illustré sur le diagramme de phase AlSi de la Figure 81.

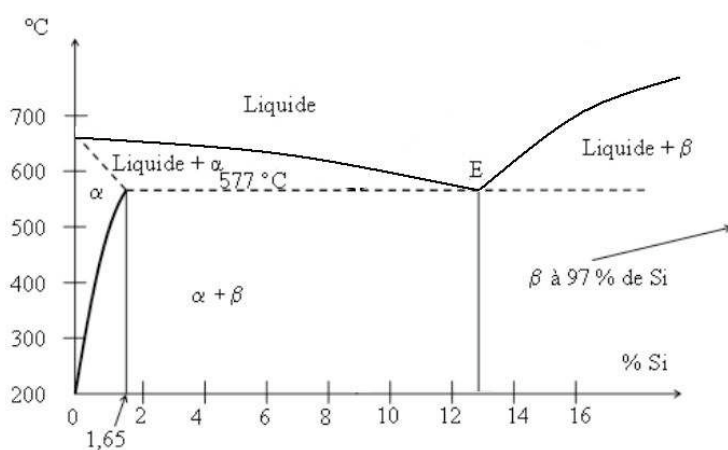


Figure 81. Diagramme de phase de l'alliage AlSi .

Le mécanisme d'interruption a été identifié comme suit : dès que l'aluminium présente une phase liquide, ne mouillant pas le SiO_2 , il a tendance à réduire sa surface de contact en se mettant en boule ou en se rapprochant des zones d'aluminium solide à chaque extrémité de la zone de chauffe. C'est la tension qui se crée entre les deux extrémités sur la piste en fusion qui entraîne l'interruption.

Les temps de commutation obtenus sont en accord avec nos résultats de simulation : ils s'échelonnent de 65ms pour les plus faibles puissances à 7ms pour 500mW. Quelque soit la puissance appliquée l'énergie consommée est inférieure à 10mJ et la valeur minimale de 3.5mJ est obtenue pour une puissance de 500mW.

Pour toutes les puissances testées, la reproductibilité de la commutation est très bonne ce qui nous a conduit à réaliser la courbe de commutation (cf Figure 82) qui permet d'identifier les zones de commutation ou de non commutation.

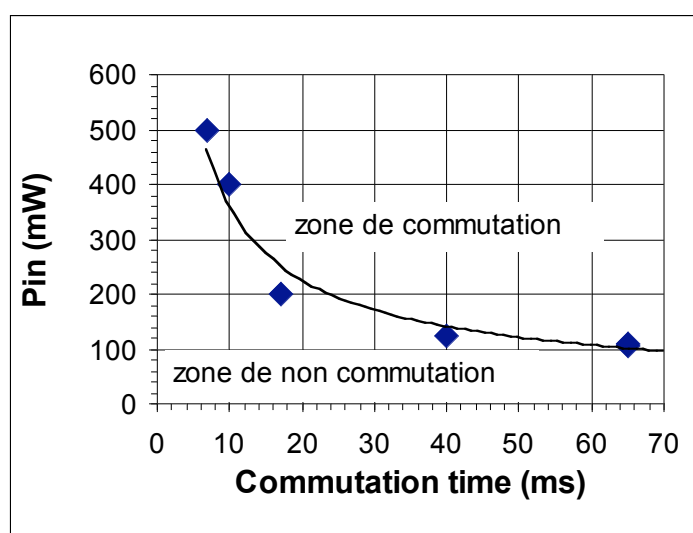


Figure 82. Courbe de fonctionnement de l'interrupteur ON-OFF thermique.

4.3. Caractérisation de l'état OFF

L'état OFF de l'interrupteur ON-OFF thermique est vérifié lors des tests de commutation du paragraphe précédent en réalisant des mesures $I(V)$ pour des tensions échelonnées de 1 à 20V. Pour s'assurer de la stabilité de l'état OFF, nous avons appliqué sur la piste interrompue jusqu'à 100V. Les mesures de courant avec un multimètre Keithley 4200 sourcemeter montrent qu'il n'y a aucun courant de fuite.

Nous réalisons aussi une observation visuelle de la fusion de la piste en aluminium. Les photographies de la Figure 83 montrent des photographies de la zone de fusion réalisées

avant et après commutation. On remarque que la zone de fusion est localisée sur l'élément chauffant, ce qui valide notre choix de conception, consistant à placer la piste à interrompre directement sur l'élément chauffant. L'intervalle d'interruption de piste est donc de la taille de la résistance chauffante, à savoir $540\mu\text{m}$.

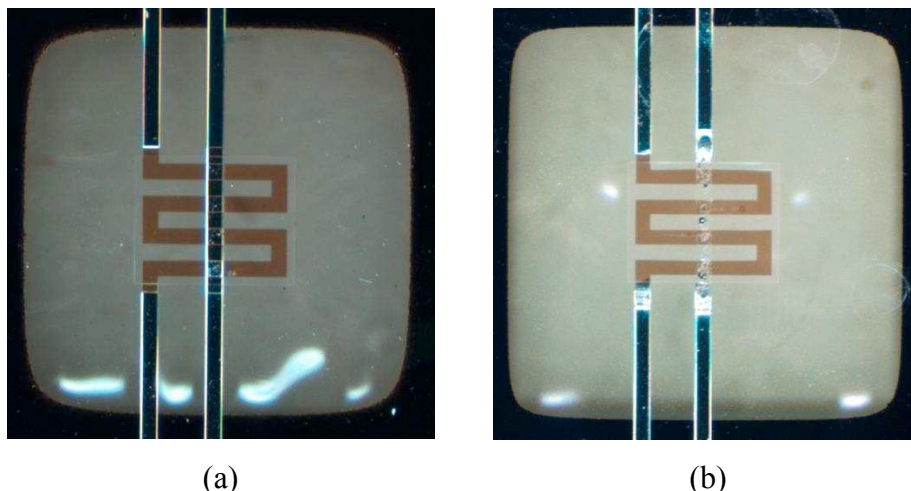


Figure 83. Photographie de l'interrupteur ON-OFF thermique avant (a) et après (b) commutation : l'aluminium recouvrant l'élément chauffant a été supprimé.

Lorsque la commutation est réalisée nous avons noté deux cas :

- Pour les points (P,t) situés à la frontière de la zone de commutation (Figure 84 (a)), la séparation n'est pas nette et il reste de l'aluminium qui n'entraîne toutefois aucune fuite de courant.
- Pour des puissances ou des temps plus élevés qui permettent de sortir de la zone de transition on a une zone d'interruption sans aluminium (Figure 84 (b)).

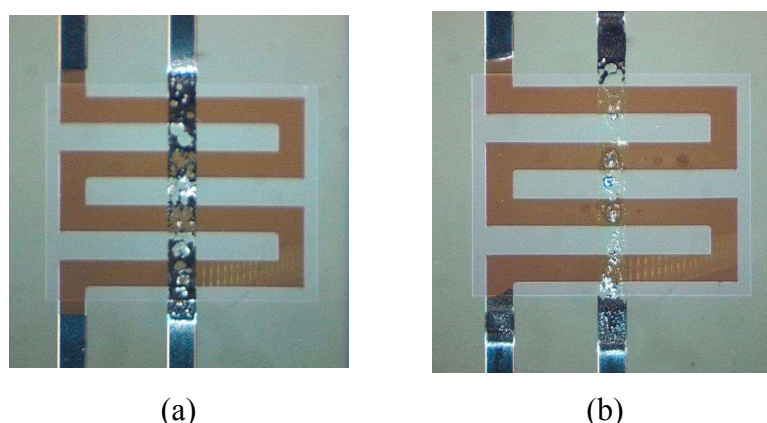


Figure 84. Photographies de la zone de fusion après commutation pour des couples (P,t) situés à la frontière(a) ou bien dans (b) la zone de commutation.

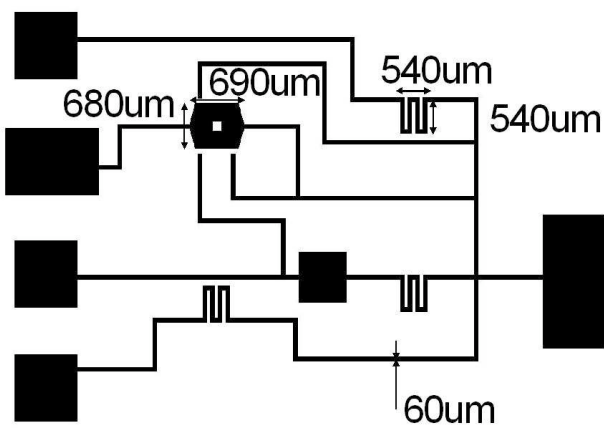
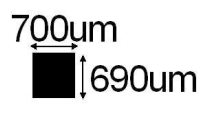
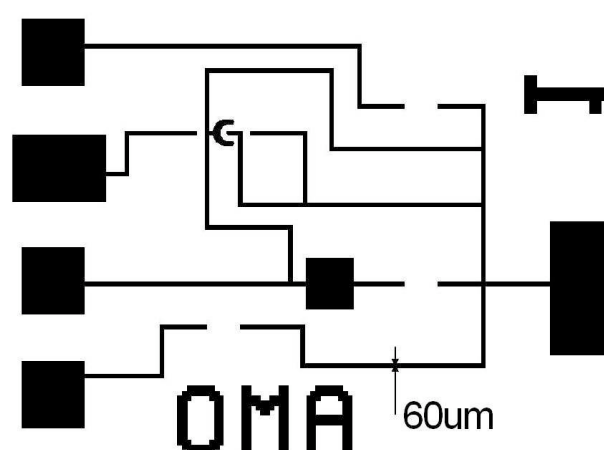
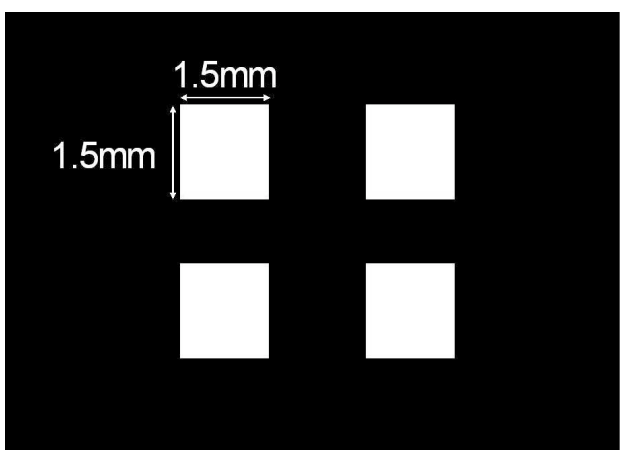
Les temps de commutation étant relativement courts, le fonctionnement du système se fait en transitoire. Durant l'échauffement, il apparaît des zones de température différentes, phénomène qui tend à se limiter une fois le régime statique atteint du fait de l'homogénéisation de la température. Ainsi pour les couples (P,t) à la limite de la zone de commutation, la fusion se fait sur les zones localement les plus chaudes de la zone de chauffe. Pour des puissances plus élevées qui permettent à toute la zone de chauffe de dépasser la température de fusion ou bien des temps plus long qui permettent à la zone de chauffe de s'homogénéiser, on arrive à avoir une interruption sur toute la zone de chauffe.

Il faut aussi noter que pour les faibles puissances, nous avons vu que nous étions dans une phase pâteuse, qui présente des zones solides et d'autres liquides, ce qui peut expliquer les marques d'aluminium qui seraient en fait les parties solides n'ayant pas bougées.

5. Conclusion sur le concept d'interrupteur ON-OFF thermique

Nous avons proposé une alternative à l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique dans le cas où des applications spécifiques n'autorisent pas l'utilisation de matériau pyrotechnique. Le concept proposé permet d'interrompre une piste par fusion commandable. **Le système est basé sur la même filière technologique que les interrupteurs ON-OFF pyrotechnique et OFF-ON à savoir un élément chauffant en polysilicium sur une membrane diélectrique $\text{SiO}_2(1.4\mu\text{m})/\text{SiN}_x(0.6\mu\text{m})$. En ce sens, son intégration avec ces interrupteurs est facilement envisageable. Il possède en outre l'avantage de ne nécessiter aucune étape d'assemblage.** La contrainte principale est d'utiliser un métal bas point de fusion pour rester dans des domaines de puissances de fonctionnement limitées. L'aluminium a été identifié comme le métal adéquat du fait de son bas point de fusion (660°C) et de sa faible résistivité électrique ($2.7 \cdot 10^{-6} \Omega.\text{cm}$). Les tests pour valider le concept ont été réalisés pour des pistes en aluminium de $0.7\mu\text{m}$ d'épaisseur et $60\mu\text{m}$ de large, ce qui équivaut à un volume sur la zone de chauffe de $22680\mu\text{m}^3$. Pour ce volume il faut compter un minimum de 105mW pour faire fondre la piste et réaliser la commutation. Cette puissance est inférieure aux résultats des simulations qui prévoyaient une puissance minimale de 150mW. Les temps de commutation obtenus peuvent atteindre des valeurs inférieures à 10ms pour des hautes puissances : 7ms pour 500mW notamment. Ces résultats sont en accord avec les résultats de simulation.

ANNEXE 2 : Masques utilisés pour la réalisation du procédé de fabrication du démonstrateur PYROSECURE

	
<i>Masque 1 : gravure polysilicium</i>	<i>Masque 2 : gravure PECVD</i>
	
<i>Masque 3 : métallisation</i>	<i>Masque 4 : gravure DRIE</i>

ANNEXE 3 : Séquences de photos illustrant le fonctionnement des interrupteurs développés

Cette annexe présente des séquences de photos qui ont été prises lors du fonctionnement des interrupteurs que nous avons développés. L'objectif est de mettre en avant les points clefs du fonctionnement de chaque interrupteur, et les défaillances qui ont pu être observées notamment pour l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique.

1. Interrupteur ON-OFF pyrotechnique

Des problèmes d'initiation ont été observés lors des caractérisations. Les séquences qui suivent, issues d'une même vidéo, ont pour but de mettre en évidence ces défaillances. On applique à $t=0\text{ms}$ une puissance de 500mW et ceci pendant toute la durée de la manipulation.

1.1. Première étape : Initiation incomplète

L'échauffement de la résistance entraîne l'échauffement du matériau pyrotechnique. Celui-ci est relativement long (de l'ordre de la seconde) du fait de la mauvaise qualité du matériau pyrotechnique ainsi que du contact avec la résistance. Le gaz de décomposition s'accumule et entraîne une rupture partielle de la membrane avant même l'initiation complète du matériau. Ceci explique l'extinction du matériau qui n'atteint pas le régime d'auto-combustion caractéristique de l'initiation et donc l'échec de la commutation.

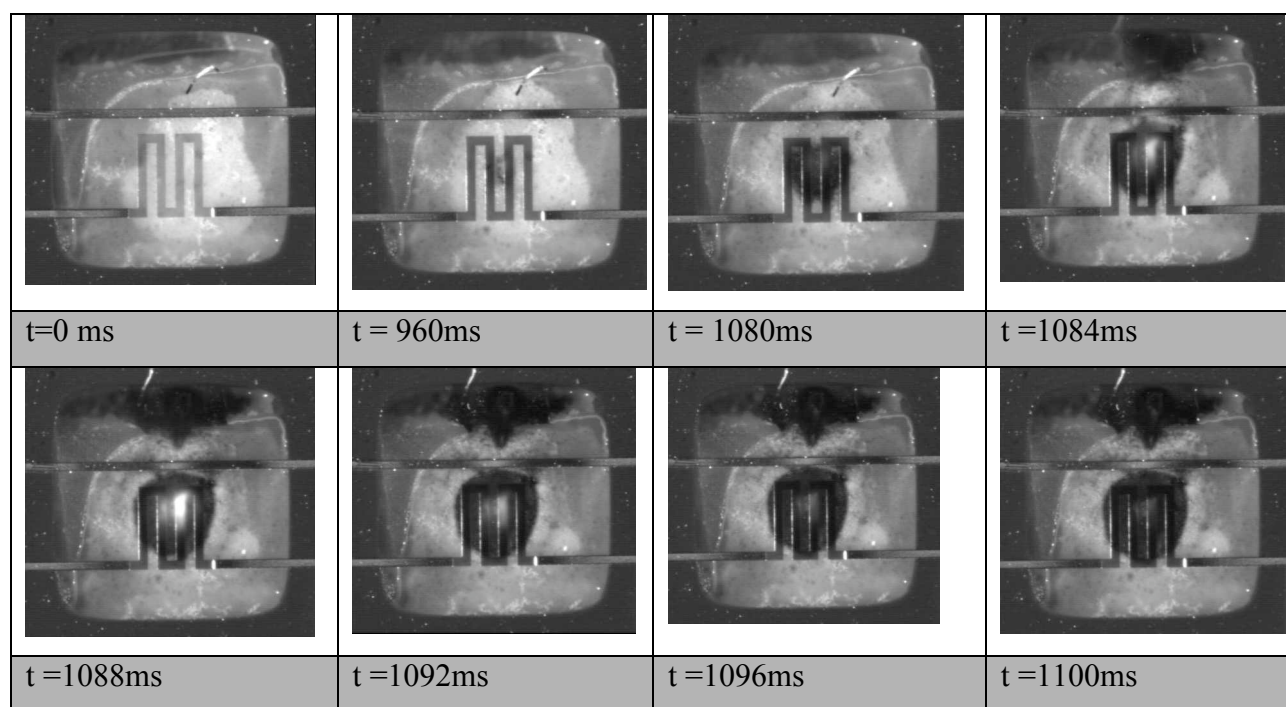


Figure 85. Séquence de photos prises lors de la commutation de l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique : initiation incomplète du matériau pyrotechnique insuffisante pour éclater la totalité de la membrane.

1.2. Deuxième étape : Présence de points chauds

Une partie du matériau pyrotechnique (au plus près de la membrane) a brûlé, la résistance chauffante est donc isolée par un gap d'air. La chaleur dissipée par effet Joule s'accumule et on voit l'apparition de points chauds caractéristiques.

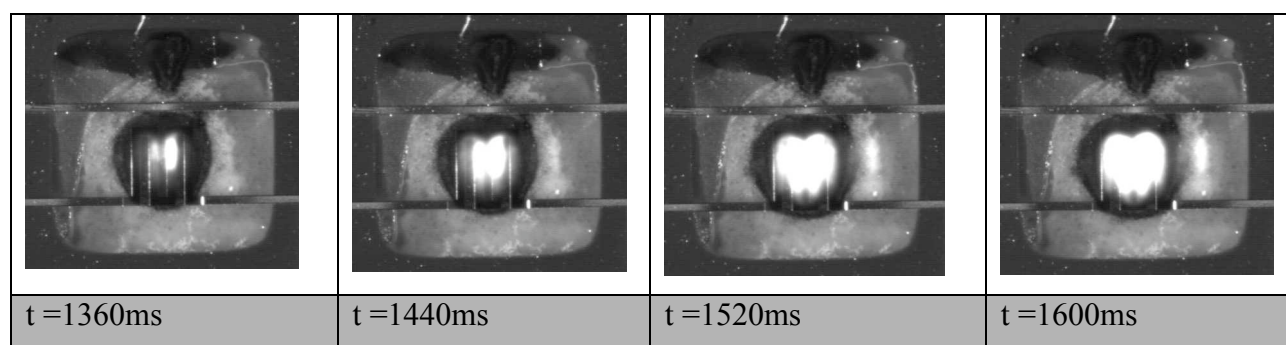


Figure 86. Séquence de photos prises lors de la commutation de l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique : apparition de points chaud sur la résistance qui n'est plus au contact du matériau pyrotechnique.

1.3. Troisième étape : combustion résiduelle

Malgré le gap d'air sous la résistance, une partie de la chaleur est récupérée par le matériau pyrotechnique qui fini par brûler. Les gaz de combustions ne sont pas suffisants pour casser la membrane entièrement et s'évacuent par la fissure créée lors de la première étape.

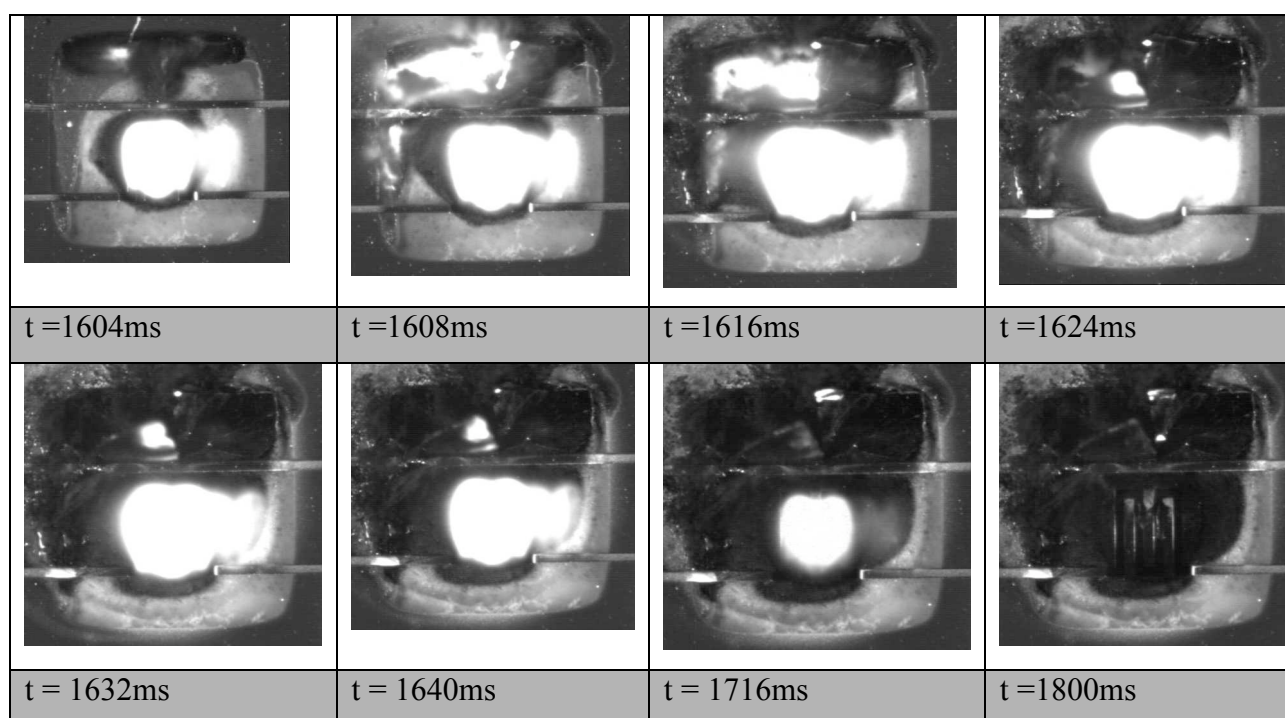


Figure 87. Séquence de photos prises lors de la commutation de l'interrupteur ON-OFF pyrotechnique : combustion résiduelle du matériau pyrotechnique.

2. Interrupteur ON-OFF thermique, solution alternative

L'objectif du séquençage vidéo est de mettre en évidence le mécanisme d'interruption évoqué dans l'annexe 1, dans laquelle est exposé l'étude de cet interrupteur.

L'échauffement de la résistance chauffante entraîne la fusion de la piste en aluminium. Celle-ci ne mouille pas le SiO_2 sur lequel, la piste est déposée. L'aluminium se met en boule et a tendance à se rapprocher par capillarité des extrémités encore solide de la piste aluminium. Les efforts exercés entraînent l'interruption de la piste. La séquence vidéo présentée est réalisée pour une puissance de 125mW et la piste à interrompre est constituée de 3 branches parallèles de 20 μm de large chacune.

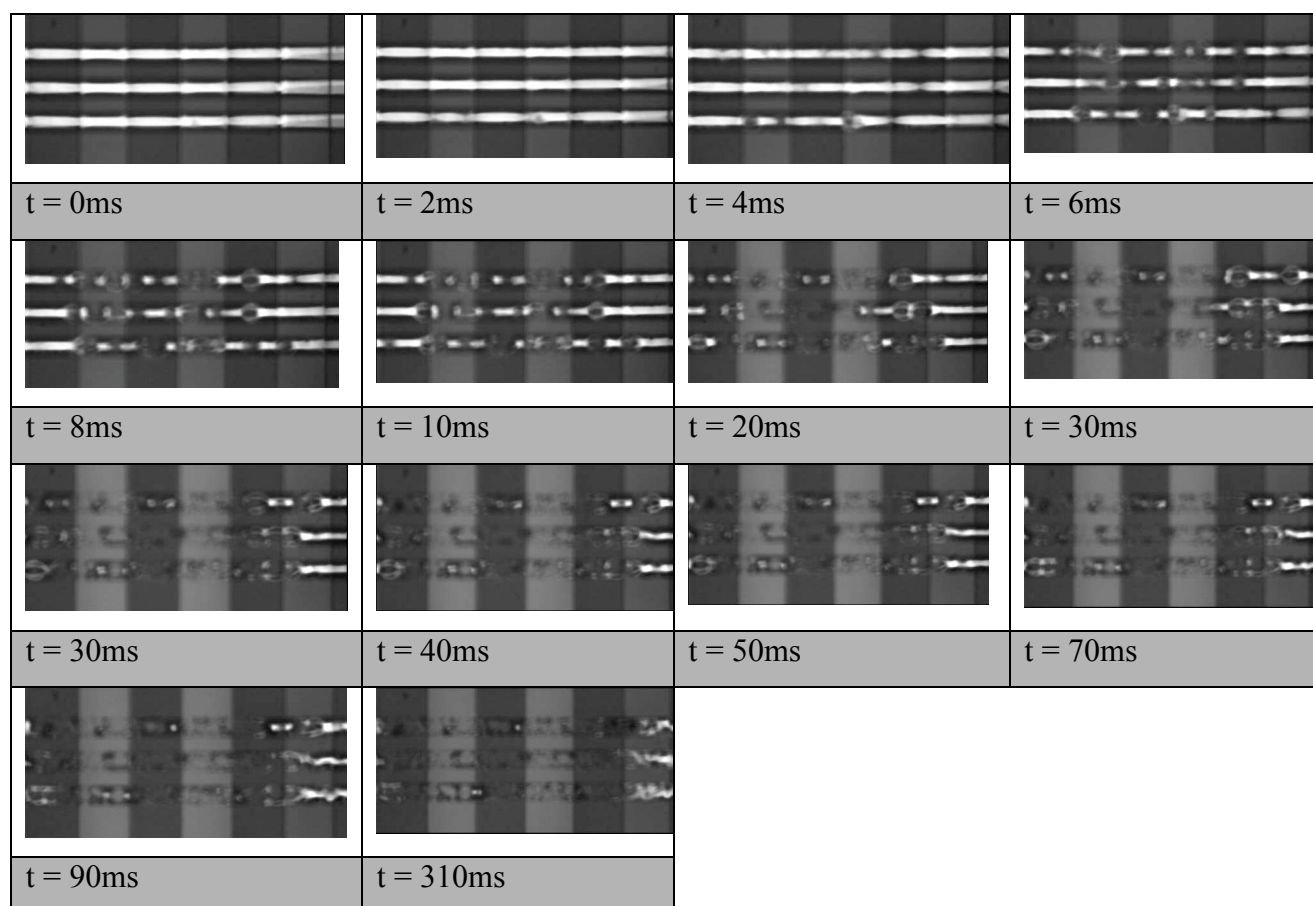


Figure 88. Séquence de photos prises lors de la commutation de l'interrupteur ON-OFF thermique.

3. Interrupteur OFF-ON

L'objectif du séquençage qui a été réalisé est de mettre en avant le mécanisme de brasure. Cette séquence a été réalisée pour une puissance de 300mW appliquée sur la résistance chauffante. On note une fumée blanche, résultat de la fusion de la colophane, tandis que la bille de brasure, sous l'effet des forces de capillarité, se déplace et se recentre sur le motif de brasure pour réaliser la connexion.

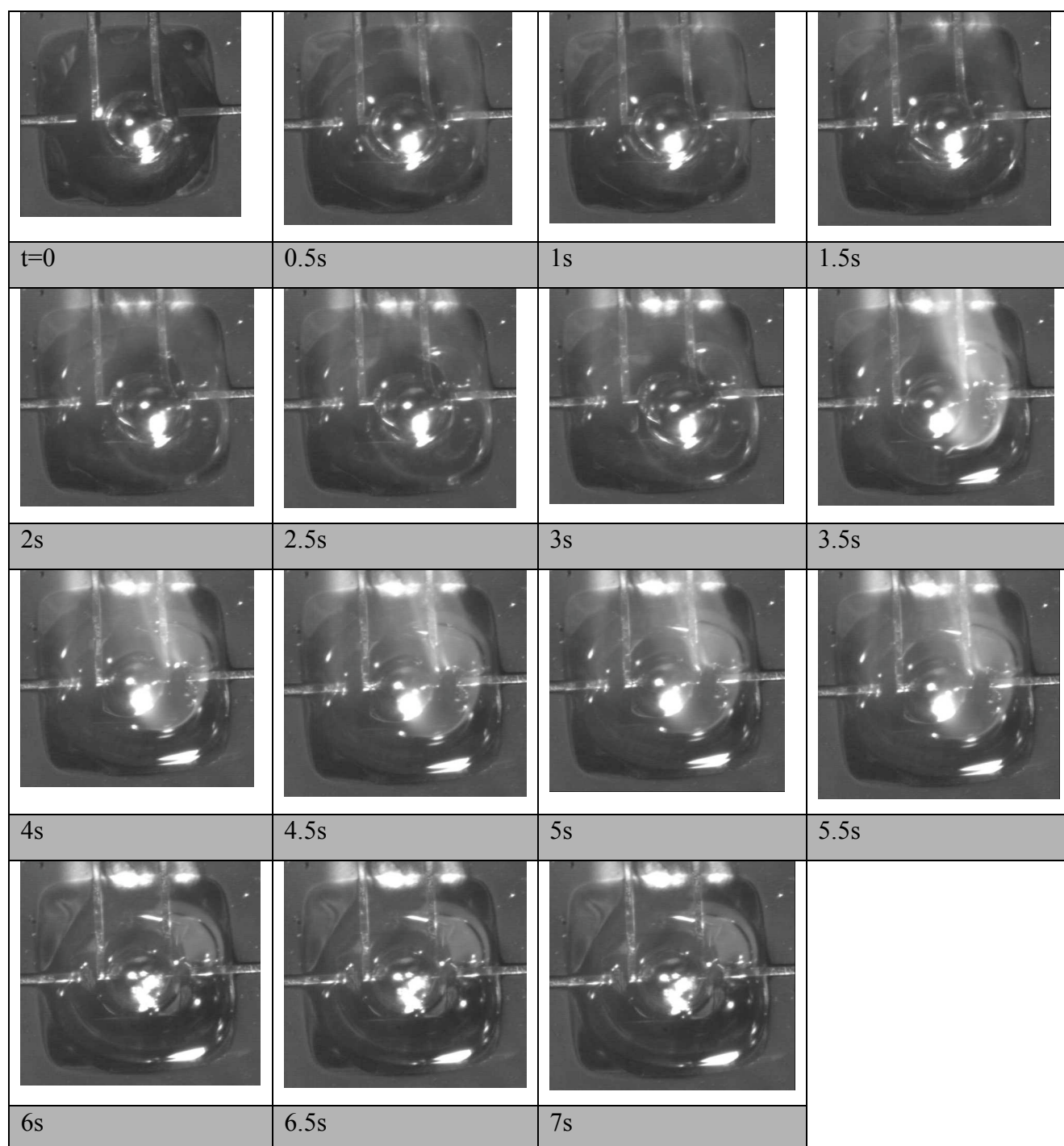


Figure 89. Séquence de photos prises lors de la commutation de l'interrupteur OFF-ON.

ANNEXE 4 : Publications

Revues internationales

- « Design, fabrication and characterization of a MEMS safe pyrotechnical igniter integrating arming, disarming and sterilization functions », P. Pennarun, C. Rossi, D. Estève, D. Bourrier, Journal Micromechanics and Microengineering, Vol.16, N°1, pp. 92-100, 2006.
- « Single used, robust, MEMS based electro-thermal micro switches for redundancy and system reconfiguration », P. Pennarun, C. Rossi, D. Estève, D. Colin, Sensors & Actuators, *accepted*.

Congrès internationaux

- « Development of a safe electro-thermal pyrotechnic igniter for a new generation of microfuze », P. Pennarun, C. Rossi, D. Estève, V. Conedera, Microtechnologies Conference for the New Millenium 2005, Smart Sensors, Actuators, and MEMS II, Seville (Spain), May 9-11, 2005, Vol.5836, pp.558-569. *invited oral presentation*.
- « Development of safe electro-thermal pyrotechnic igniter on silicon », P. Pennarun, C. Rossi, D. Estève, V. Conedera, Actuator2006 conference, Bremen (Germany), June 14-16, 2006.
- « MEMS based one-shot electro-thermal microswitch for systems reconfiguration », P. Pennarun, C. Rossi, D. Estève, D. Lagrange, CANEUS2006 Conference : micro and nano technology for aerospace applications, Toulouse (France), Aug. 27-Sept.1, 2006.

Congrès nationaux

- « Développement d'une micro-amorce pyrotechnique sécurisée intégrée sur silicium », P. Pennarun, journée GEET (Journées Annuelle de l'Ecole Doctorale Génie Electrique, Electronique, Télécommunication), Toulouse (France), March 8, 2006, pp.157-159.
- « Développement d'une micro-amorce pyrotechnique sécurisée intégrée sur silicium », P. Pennarun, C. Rossi, JNRDM'2005 (Journées Nationales du Réseau Doctoral de Microélectronique), Paris (France), May 10-12,2005, pp.100-102.

BIBLIOGRAPHIE

Introduction générale

- [1] C. Rossi, D. Estève, Pyrotechnic micro actuators, EUROSENSORS XI, Varsovie (Pologne), 21-24 Septembre 1997.
- [2] C. Rossi, D. Estève and C. Mingués, Pyrotechnic actuator: a new generation of Si integrated actuator, Sensors and Actuators A: Physical, Volume 74, Issues 1-3, 20 April 1999, pp 211-215.
- [3] A. Berthold, C. Rossi, Générateur thermoélectrique basé sur la combustion d'un propergol solide, Journées Nationales du réseau de Recherche en Micro et Nano Technologies, Lille (France), 3-4 Novembre 2003.
- [4] C. Rossi, D. Estève, N. Fabre, T. Do Conto, V. Conédéra, D. Dilhan, Y. Guélou, A new MEMS based microthrusters for microspacecraft applications, Proceedings of the Micro/Nanotechnology for Space Applications (MNT'99), Pasadena (USA), 10-15 April 1999
- [5] C. Rossi, D. Lagrange, B. Larangot, A. Chaalane, Final characterizations of millimeter scale pyrotechnical microthrusters, Sensors and Actuators, Vol 121/2, pp 508-514, 2005
- [6] G. A. Ardila Rodríguez, C. Rossi, D. Estève, V. Conedera, H. Granier, Développement d'une micro-source de pression pour des applications microfluidiques, 9eme édition des Journées Nationales du Réseau Doctoral en Microelectronique (JNRDM), Rennes 10-12 Mai, 2006.
- [7] D. Teasdale, V. Milanovic, P. Chang, K. Pister, K. Bohringer, Microrocket for smart dust, Smart Materials and structure, 10 (6), 2001, pp1145-1155.
- [8] H. H. DiBiaso, B. A. English and M. G. Allen, Solid-phase conductive fuels for chemical microactuators, Sensors and Actuators A: Physical, Volume 111, Issues 2-3, 15 March 2004, pp 260-266.
- [9] A. Tappan et al, Patterning of regular porosity in PETN microenergetic material thin film, 36th International Conference of the ICT, Karlsruhe Germany, June 28 – Jul 1, 2005.
- [10] K.L. Zhang, S.K. Chou, S. S. Ang, Development of a solid propellant microthruster with chamber and nozzle etched on a wafer surface, J. Micromech. Microeng. 14, 2004, pp 785-792.
- [11] B. S. Tanaka, R. Hosokawa, S. Tokudome, K. Hori, H. Saito, M. Watanabe and M. Esashi, MEMS-Based Solid Propellant Rocket Array Thruster with Electrical Feedthroughs, Transactions of The Japan Society For Aeronautical and Space Sciences, Volume 46, 2003, pp 47-51.

- [12] P.Q. Pham, D. Briand, C. Rossi, N.F. De Rooij, Downscaling of solid propellant pyrotechnical, 12th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS'2003), Boston (USA), 8-12 Juin 2003, Vol.2, pp.1423-1426.
- [13] Conception d'une "amorce intelligente" par couplage magnétique HF et compatible douille 9 mm. Réalisation d'une maquette de validation de concept, Rapport LAAS No03309, Contrat SMART INIT, Juin 2003, 25p.
- [14] Hodge K., Lewis D. Jr., Nelson S., Ruwe V, MEMS arm fire and safe and arm devices, brevet US 6,431,071 B1, Aug. 2002.
- [15] D. Combes, D. King., Electronic safety and arming unit, brevet WO 2004/079290 A1, Sept. 2004.
- [16] STANAG (standardization agreement) 4187 : Fuzing systems-safety design requirement.

Chapitre 1 : Les micro-amorces pyrotechniques : état de l'art et problématique

- [1] <http://www.crossject.com>
- [2] <http://www.auto123.com/en/info/news/news.view.spy?artid=61200&pg=1>
- [3] C. Rossi, La micropyrotechnie sur silicium et l'intégration microsystèmes, mémoire Habilitation à Diriger les Recherches, 2006.
- [4] C. Rossi, D. Estève, Pyrotechnic micro actuators, EUROSENSORS XI, Varsovie (Pologne), 21-24 Septembre 1997.
- [5] C. Rossi, D. Estève and C. Mingués, Pyrotechnic actuator: a new generation of Si integrated actuator, Sensors and Actuators A: Physical, Volume 74, Issues 1-3, 20 April 1999, pp 211-215.
- [6] B. Larangot, C. Rossi, T. Camps A. Berthold, P.Q. Pham, D. Briand, N.F. de Rooij, M. Puig-Vidal, P. Miribel, E. Montané, E. López, J. Samitier, Solid propellant micro-rockets – towards a new Type of power MEMS, Proceedings of the AIAA Nanotech 02 conference, Houston, USA, September 9-11, 2002.
- [7] C. Rossi, D. Lagrange, B. Larangot, A. Chaalane, Final characterizations of millimeter scale pyrotechnical microthrusters, Sensors and Actuators, Vol 121/2 (2005) pp 508-514.

- [8] D. Teasdale, V. Milanovic, P. Chang, K. Pister, K. Bohringer, Microrocket for smart dust, *Smart Materials and structure*, 10 (6), 2001, pp1145-1155.
- [9] B. S. Tanaka, R. Hosokawa, S. Tokudome, K. Hori, H. Saito, M. Watanabe and M. Esashi, MEMS-Based Solid Propellant Rocket Array Thruster with Electrical Feedthroughs, *Transactions of The Japan Society For Aeronautical and Space Sciences*, Volume 46, 2003, pp 47-51.
- [10] G. A. Ardila Rodríguez, C. Rossi, D. Estève, V. Conedera, H. Granier, Développement d'une micro-source de pression pour des applications microfluidiques, 9eme édition des Journées Nationales du Réseau Doctoral en Microelectronique (JNRDM), Rennes 10-12 Mai, 2006.
- [11] C. Rossi, A. Berthold, Générateur thermoélectrique basé sur la combustion d'un propergol solide Journées Nationales du Réseau de Recherche en Micro et Nano Technologies, Lille (France), 3-4 Novembre 2003.
- [12] A. Carlos, F. Pello, MicroPower Generation Using Combustion: Issues and Approaches, Topical Review at the 29th International Symposium on Combustion, Sapporo, Japan, July 21-26, 2002.
- [13] B.A. English, Microcombustor based on controllable solid fuel element, *Proceedings of IMECE'03*, 2003.
- [14] G. A. Ardila Rodríguez, C. Rossi, D. Esteve, Design, Fabrication and Operation of a Wireless and Miniature Ignition System, *Sensors and actuators*, novembre 2005, sous presse.
- [15] C. Rossi, G. A. Ardila Rodríguez, D. Esteve, Conception d'une "amorce intelligente" par couplage magnétique HF et compatible douille 9 mm. Réalisation d'une maquette de validation de concept, Rapport LAAS No03309, Contrat SMART INIT, Juin 2003.
- [16] STANAG (standardization agreement) 4187: Fuzing systems-safety design requirement.
- [17] http://en.wikipedia.org/wiki/Blasting_cap#History
- [18] R.W. Bickes, A.C. Schwarz, Semi-conductor bridge (SCB) igniter, patent number US4708060.
- [19] D.A. Benson, M.E. Larsen, A.M. Renlund, W.M. Trott, R.W. Bickes, semiconductor bridge : a plasma generator for the ignition of explosives, *J. Appl. Phys.* 62 (5), 1 Septembre 1987.
- [20] http://en.wikipedia.org/wiki/Exploding-bridgewire_detonator.

- [21] J. R. Stroud, A new kind of detonator : the slapper, UCRL-7739 Lawrence Livermore Laboratory.
- [22] D.A. Benson, M.E. Larsen, A.M. Renlund, W.M. Trott, R.W. Bickes Jr., Semiconductor bridge : a plasma generator for the ignition of explosives, J. Apl. Phys. 62 (5), 1 Septembre 1987.
- [23] J. M.Power, Electrically Detonated Explosive Device , Patent number US 4050382.
- [24] C. A.Bolle, Armament fuse arrangement, Patent number EP 1584889 A1.
- [25] J. Baricos, P.Thebault, Dispositif de sécurité pour organe sensible, notamment pour inflammateur à action pyrotechnique, Patent number EP 1524490 A1.
- [26] J-R Duguet, J-P Vedel, Electropyrotechnic initiation system protected against electrostatic discharge, Patent number US 6220163 B1.
- [27] J. Keith Hartman, C.B. McCampbell, Zener diode for protection of integrated circuit explosive bridge, Patent number 5309841.
- [28] K. Hodge, D. Jr Lewis, S. Nelson and V. Ruwe, MEMS arm fire and safe and arm devices patent number US 6,431,071 B1.
- [29] D. Combes and D. King, Electronic safety and arming unit patent number WO 2004/079290 A1.

Chapitre 2 : Conception d'un micro-initiateur pyrotechnique sécurisé sur silicium, PYROSECURE

- [1] STANAG (standardization agreement) 4187 : Fuzing systems-safety design requirement.
- [2] Plan d'étude amont micro-DSMF, 2003.
- [3] C. Kaiser, F. Bourrière, D. Estève, C. Rossi, P. Pennnarun, Système embarqué hautement sécurisé pour la mise à feu d'explosifs ou le déploiement d'organes, patent number FR05.03822.
- [4] C. Rossi, La micropyrotechnie sur silicium et l'intégration microsystèmes, mémoire Habilitation à Diriger les Recherches, 2006.
- [5] C.Rossi, P. Temple Boyer, D.Estève, Realization and performances of thin SiO₂/SiN_x membrane for microheater applications, Sensors and Actuators A, Vol.A64, pp.241-245, Janvier 1998.

- [6] P. Pennarun, Modélisation de micro-initiateurs pyrotechniques, comparaison de plusieurs technologies, rapport de stage DEA, Ingénieur INSA, rapport LAAS 05 296, Août 2003.
- [7] A. Tappan et al, Patterning of regular porosity in PETN microenergetic material thin film, 36th International Conference of the ICT, Karlsruhe Germany, 28 Juin-1 Juillet , 2005.
- [8] D. S. Stewart, Miniaturization of explosive technology and microdetonics, XXI ICTAM, 15-21 August 2004, Varsaw, Poland.
- [9] N.E. McGruer, G.G. Adams, L. Chen, Z.J. Guo, Y. Du, Mechanical, thermal, and material influences on ohmic-contact-type MEMS switch operation, Proceedings of MEMS 2006, Istanbul, Turquie, 22-26 Janvier 2006, pp. 230-233.

Electrostat :

- [10] L.L. Mercado, S-M Kuo, T-Y T. Lee, L. Liu, Mechanics-based solutions to RF MEMS switch stiction problem, IEEE transactions on components and packaging technologies, Vol.27, No. 3, September 2004, pp. 560-567.
- [11] S . Majumber, J. Lampen, R. Morrison, J.Maciel, MEMS switches :a newly developed surface micromachined direct metal to metal microswitch can be used in application from dc through microwave, IEEE instrumentation and measurement magazine, Vol.6, Issue 1, March 2003, p.12-15.
- [12] M-A Gretillat, F. Gretillat, N. F. de Rooij, Micromechanical relay with electrostatic actuation and metallic contacts, J. Micromech. Microeng. Vol.9, 1999, pp.324-331.
- [13] J. Oberhammer, G. Stemme, Design and fabrication aspects of an S-shaped film actuator based DC to RF MEMS switch, Journal of MEMS, Vol.13, No .3, Juin 2004, pp. 421-427.
- [14] I. Almeida, R. Ramadoss, R. Jackson, K. Ishikawa, Q. Yu, Study of electrical contact resistance of multi-contact MEMS relay fabricated using the metal MUMPS process, J. Micromech. Microeng., Vol.16, 2006, pp.1189-1194.
- [15] T. Seki, Y. Uno, K. Narise, T. Masuda, K. Inoue, S. Sato, F. Sato, K. Imanaka, S. Sugiyama, Development of a large-force low-loss metal-contact RF MEMS switch, Sensors and Actuators A, 2006
- [16] D.Girbau, A. Lazaro, L. Pradell, RF MEMS switches based on the buckle-beam thermal actuator, 33rd European microwave conference, Munich 2003, pp. 651-654.

-
- [17] V. Agrawal, A latching MEMS relay for DC and RF applications, Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts, 2004, pp.222-225.
- [18] Y. Wang, Z. Li, D. T. McCormick, N. C. Tien, A micromachined RF microrelay with electrothermal actuation, Sensors and Actuators A, Vol. 103, 2003, pp.231-236.
- [19] J. Qiu, J.H. Lang, A.H. Slocum, A.C. Weber, A bulk-micromachined bistable relay with U-shaped thermal actuators, Journal of MEMS, Vol.14, No.5, Octobre 2005, pp.1099-1109.
- [20] L. Que, K. Udeshi, J. Park, Y. B. Gianchandani, A bi-stable electrothermal RF switch for high power applications, 17th IEEE International Conference on MEMS 2004, pp. 797-800.
- [21] I-J Cho, T. Song, S-H Baek, E Yoon, A low voltage push-pull SPDT RF MEMS switch operated by combination of electromagnetic actuation and electrostatic hold, 18th IEEE International Conference on MEMS 2005, Février 2005, pp.32-35.
- [22] Y. Zhang, G. Ding, X. Shun, X. Li, B. Cai, Design and analysis of the micromechanical structure for an electromagnetic bistable RF MEMS switch, Microwave Conference Proceedings, 2005. APMC 2005. Asia-Pacific Conference Proceedings, Vol.1, 4-7 Décembre 2005, 4 pp.
- [23] J.D. Williams, R. Yang, W. Wang, Numerical simulation and test of a UV-LIGA-fabricated electromagnetic micro-relay for power applications, Sensors and Actuators A, Vol.120, 2005, pp.154-162.
- [24] H-C Lee, J-Y Park, J-U Bu, Piezo electrically actuated RF MEMS dc contact switches with low voltage operation, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol.15, No.4, Avril 2005, pp. 202-204.
- [25] D. S. Lee, S-W Jung, N-K Cho, W-H Kim, W-K Seong, H-D Park, PZT Actuated Seesaw SPDT RF MEMS Switch, J. of Physics : Conf. Series 34, 2006, pp.304-309.
- [26] J. Simon, S. Saffer, C-J Kim, A liquid-filled microrelay with a moving mercury drop, Journal of MEMS, Vol. 6, No. 3, Septembre 1997, pp.208-216.
- [27] Y. Kondoh, T. Takenaka, T. Hidaka, G. Tejima, Y. Kaneko, M. Saitoh, High-reliability, high performance RF micromachined switch using liquid metal, Journal of MEMS, Vol.14, No.2, Avril 2005, pp. 214-220.

- [28] L. Latorre, J. Kim, J.Lee, P-P de Guzman, H. J. Lee, P. Nouet, C-J Kim, Electrostatic actuation of microscale liquid metal droplets, Journal of MEMS, Vol.11, No.4, Août 2002, pp.302-306.
- [29] C-H Chen, D. Peroulis, Liquid metal droplets for RF MEMS switches, Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems, 2006. Digest of Papers. 2006 Topical Meeting on, 18-20 Janvier 2006, pp.28-31.
- [30] C. Rossi, D. Estève, Micropyrotechnics, a new technology for making energetic microsystems: review and prospective, Sensors and Actuators A, Vol.120, 2, pp297-310 (2005).
- [31] M. Scafer, R ; A. Fournelle, J. Liang, Theory for intermetallic phase growth between Cu and liquid Sn-Pb solder based on grain boundary diffusion control, Journal of Electronic Materials, Vol.27, No.11, 1998, pp.1167-1176.
- [32] <http://www.efunda.com/materials/solders>
- [33] K.N. Tu, K. Zeng, Tin-Lead (SnPb) solder reaction in flip chip technology, Materials science and engineering, R34, 2001, pp.1-58.
- [34] http://www.berotech.com/product1/solder_paste_prod.htm
- [35] http://www.anadigics.com/products/addrefs/Application_Note/SolderReflowReport.pdf
- [36] http://www.aimsolder.com/tds_page_paste.cfm

Chapitre 3 : Intégration du micro-initiateur sécurisé PYROSECURE sur silicium

- [1] B. Larangot, Conception, fabrication et caractérisation de matrices de micropropulseurs pyrotechniques sur silicium, Doctorat de l' Université Paul Sabatier, Toulouse, 23 Janvier 2004.
- [2] I. Simon, N. Bârsan, M. Bauer, U Weimar, Micromachined metal oxide gas sensors: opportunities to improve sensor performance, Sensors and Actuators B, Vol. B73, Août 2000, pp.1-26.
- [3] http://www.teledynersi.com/products/0products_8td_index.asp
- [4] STANAG (standardization agreement) 4187: Fuzing systems-safety design requirement.

- [5] J.R. Lloyd, Electromigration for Designers: An Introduction for the Non-Specialist, TechOnLine (<http://www.techonline.com/community/home/20421>).
- [6] P. Pennarun, Modélisation de micro-initiateurs pyrotechniques, comparaison de plusieurs technologies, rapport de stage DEA, Ingénieur INSA, rapport LAAS 05 296, Août 2003.
- [7] F. Bourrières, C. Kaiser, Technique de remplissage de zones ouvertes situées en creux par rapport à une surface, patent number FR 2845858
- [8] <http://www.polytec-pi.fr/EPOTEK-1/datasheets/H70E%20CFDS.PDF>
- [9] B. Larangot, Rapport stage D.E.A, Fabrication technologique d'initiateurs pour micropropulseurs et test de résistance à l'arrachement d'une résine epoxy, 2000.
- [10] P. Schmitt, F. Pressecq, X. Lafontan, Q.H. Duong, P. Pons, J.M. Nicot, C. Oudea, D. Estève, J.Y. Fourniols, H. Camon, Application of MEMS behaviorial simulation to physics of failure (PoF) modeling, 14th European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis (ESPREF'2003), Bordeaux (France), 6-10 Octobre 2003.
- [11] C.Rossi, P. Temple Boyer, D.Estève, Realization and performances of thin SiO₂/SiN_x membrane for microheater applications, Sensors and Actuators A, Vol.A64, pp.241-245, Janvier 1998.
- [12] A. Tappan et al, Patterning of regular porosity in PETN microenergetic material thin film, 36th International Conference of the ICT, Karlsruhe Germany, 28 Juin –1 Juil., 2005.
- [13] A Tappan et al, Micro energetic materials – microscale energetic material processing and testing, 41st AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno NV, 6-9 Janv. , 2003.
- [14] A.J. Gavens et al, Effect of intermixing on self-propagating exothermic reactions in Al/Ni nanolaminate foils, Journal of applied physics, vol 87, N° 3, 1 Fev. 2000.
- [15] D. S. Stewart, Miniaturization of explosive technology and microdetonics, XXI ICTAM, 15-21 Août 2004, Varsaw, Poland.
- [16] M. Tillotson, A.E. Gash, R.L. Simpson, L.W. Hrubesh, J.H. Satcher Jr, J.F. Poco, Nanostructured energetic materials using sol-gel methodologies, Journal of Non-Crystalline Solids 285 (2001) pp. 338-345.

Chapitre 4 : Validation expérimentale des concepts PYROSECURE

- [1] C. Rossi, S. Orioux, B. Larangot, T. Do Conto, D. Estève, Design, Fabrication and modeling of solid propellant microrocket-application to micropropulsion, Sensors and Actuators A99, 2002, pp 125-133.
- [2] J.R. Lloyd, Electromigration for Designers: An Introduction for the Non-Specialist, TechOnLine (<http://www.techonline.com/community/home/20421>).
- [3] C.N. Liao, C.T. Wei, Effect of intermetallic compound formation on electrical properties of Cu/Sn interface during thermal treatment, Journal of Electronic Materials, Vol. 33, No.10, 2004, pp 1137-1143.
- [4] Y. Kondoh, T. Takenaka, T. Hidaka, G. Tejima, Y. Kaneko, M. Saitoh, High-reliability, high performance RF micromachined switch using liquid metal, Journal of MEMS, Vol.14, No.2, Avril 2005, pp. 214-220.
- [5] STANAG (standardization agreement) 4187 : Fuzing systems-safety design requirement.
- [6] Plan d'Etude Amont « Démonstrateur DSMF », 2003.

Conclusion générale

- [1] STANAG (standardization agreement) 4187 : Fuzing systems-safety requirement.
- [2] C. Kaiser, F. Bourrière, D. Estève, C. Rossi, P. Pennnarun, Système embarqué hautement sécurisé pour la mise à feu d'explosifs ou le déploiement d'organes, patent number FR05.03822.

« Conception et intégration d'un micro-initiateur sécurisé à base de micro - interrupteurs pyrotechniques sur silicium »

Résumé

Les travaux de thèse, ont porté sur la conception et la réalisation d'un micro-initiateur sécurisé sur silicium. Le système intègre outre la fonction initiation, plusieurs fonctions sécuritaires répondant aux besoins militaires : armement, désarmement et stérilisation. Le système est initialement sécurisé par la mise en court circuit des deux contacts de l'initiateur.

L'initiateur consiste en un élément chauffant sur membrane diélectrique permettant d'initier des charges pyrotechniques avec 150mW. Les différentes fonctions sécuritaires sont assurées par des interrupteurs monocoups pyrotechniques que nous avons développés :

- L'interrupteur ON-OFF consiste à sectionner une piste qui traverse un micro-actionneur pyrotechnique. Il nécessite une puissance minimale de 150mW pour réaliser la commutation et des temps de commutation de 25ms ont été obtenus pour 500mW.
- L'interrupteur OFF-ON consiste à réaliser une micro-brasure commandable entre deux pistes à connecter. Il nécessite une puissance minimale de 200mW pour commuter et le temps minimum de commutation obtenu est 320ms avec 400mW.

Ces interrupteurs sont bistables, présentent l'avantage d'avoir une très bonne isolation électrique dans l'état OFF et une très bonne conduction dans l'état ON. Leur caractère monocoup les rend particulièrement adaptés aux applications sécuritaires.

Un démonstrateur du système appelé Pyrosecure a été réalisé. La fabrication utilise des techniques classiques de microtechnologies et nécessite seulement 4 masques, ce qui en fait un système peu coûteux, facilement réalisable et compatible avec les circuits microélectroniques.

Mots-clefs

Micropyrotechnie, Sécurité, Micro-interrupteurs pyrotechniques, Intégration, Microfabrication, Microsystème, Silicium.

« Conception and integration of a MEMS safe micro-igniter using pyrotechnical microswitches »

Abstract

The works of this PhD thesis concerns the conception and the fabrication of a safe micro-igniter on silicon. The system can achieve ignition function and several safety functions: arming, disarming, sterilization. Initially, in safe and unarmed mode, the igniter's pads are connected to the ground.

The igniter consists of a resistive element on a dielectric membrane that converts electrical energy into heat to initiate the pyrotechnic material with 150mW. The safety functions are achieved by two types of one-shot pyrotechnical micro-switches, we have developed:

- The ON-OFF microswitch concept consists of breaking an electrical connection thanks to a pyrotechnical micro-actuator. 150mW is required to realize commutation and a minimum commutation time of 25ms is achieved with 500mW.
- The OFF-ON microswitch concept consists in locally making a micro-soldering between two insulated electrical connections. Commutation is achieved with a minimum power of 200mW and minimum commutation time is of 320ms with 400mW.

These switches are bistable, have excellent isolation in the OFF-state and a good conductivity in the ON-state. Being one-shot, they suit safety applications.

One demonstrator of the system, called Pyrosecure, has been fabricated. Fabrication is done using classical microtechnology techniques and needs only 4 masks levels. Therefore, the system is cheap, easily fabricated and IC compatible.

Keywords

Micropyrotechny, Safety, Pyrotechnical microswitches, Integration, Microfabrication, MEMS, Silicon.