

Candidature à l'Habilitation à Diriger des Recherches

Carole Rossi

La micropyrotechnie sur silicium et l'intégration microsystèmes

Soutenu le 13 mars 2006 devant le jury

Jury : Daniel Hauden – rapporteur
Alain Bosseboeuf – rapporteur
Olivier Bonnaud – rapporteur
Gilles Delapierre – examinateur
Pascal Maigné – examinateur
Bruno Chaudret - examinateur
Daniel Estève – directeur de recherche
Medhi Djafari -Rouhani- président de jury

A mes deux enfants, Rébecca et Damien

A Cédric

A mes parents

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 les directeurs successifs du LAAS, J.C. Laprie et M. Ghallab de m'y avoir accueillie ainsi qu'Anne-Marie Gué qui a animé le groupe MIS avec beaucoup de talent.

Je souhaite en premier lieu, exprimer à Daniel Estève toute mon amitié et ma reconnaissance pour m'avoir d'abord accordé sa confiance en 94 dans le cadre de ma thèse de doctorat, et ensuite, depuis mon entrée au CNRS, pour m'avoir accompagné et conseillé dans mon activité de chercheur. Merci à lui qui m'a donné le goût et l'envie de faire de la Recherche, métier ô combien passionnant. Je me suis souvent demandée quelle tournure aurait eu mon existence si Daniel ne m'avait pas fait confiance en me prenant en thèse de doctorat en décembre 94 ?

Je tiens ensuite à remercier, Mehdi Djafari-Rouhani, notre éminent physicien, pour son support intellectuel et sa collaboration. Que son esprit, un brin oriental, inébranlable et oh combien, génial nous accompagne encore longtemps afin explorer et débattre de sujets divers et pas toujours scientifiques.

Je remercie ensuite, Alain Estève, mon cher collègue et ami avec qui je partage le bureau depuis ces longues années et qui donc, a essayé, patiemment, mes coups de cœur, de blues, de gueules aussi. Merci à l'homme humain, ouvert et passionné, un brin éclectique et même vagabond et un poil désorganisé pour ne pas dire effréné. Ainsi mon quotidien est une aventure permanente. Que ces années de collaboration et d'amitié durent et perdurent avec autant d'enthousiasme et de passion pour la recherche.

Bien sur, je voudrai exprimer toute mon amitiés à mes compagnons d'aventure qui jour après jours m'ont permis de construire mon projet de recherche dans des conditions particulièrement favorables :

L'équipe TEAM, dans son ensemble pour son support technique et amical tout au long de ces 10 années. Parmi eux, Véronique Conédéra dont le talent, l'esprit aiguisé et critique me séduit particulièrement et Norbert Fabre, collaborateur, un brin « sombre » mais ô combien précieux et inestimable.

L'équipe 2I et plus particulièrement Denis Lagrange, Médale, Xavier Dollat, Patrick Marcoul et MarieDo pour leur « coup de main ».

Les autres, comme Régine Duran, Christian Berty, Irène Pratviel et Marie France Foulquier pour avoir su gérer toujours gentiment et efficacement les aléas de notre métier et ses exigences.

Merci également à tous ceux qui ont, de près ou de loin contribué à la réussite de mes projets de recherche par leur conseil, compétences, savoirs qu'ils ont su partager au gré de discussions de couloir ou dans le cadre de projets : A.M. Gué, P. Pons, P. Temple, P. Ménini, T. Camps, A. Marty, B. Jammes, G. Landa...

Je terminerai par le meilleur :

Que mes enfants d'abord, Rébecca et Damien, sachent l'amour et la passion infinis que je leur porte.

Un clin d'œil affectueux et toujours amoureux à Cédric, ensuite, qui accepte gentiment et patiemment les exigences de mon activité professionnelle qui interfère souvent au quotidien ma vie privée. Cédric, que notre passion commune pour la vie et l'alpinisme perdure longtemps et avec autant d'intensité.

Et enfin, une pensée affectueuse va à mes parents et grands parents pour leur amour et soutien indéfectibles.

SOMMAIRE

I. BILAN DE MON ACTIVITE DE RECHERCHE.....5

Introduction et problématique générale.....7

Partie 1. La micropyrotechnie : état de l'art, enjeux scientifiques et technologiques.....15

1. ETAT DE L'ART	17
2. ENJEUX SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES	18
2.2. TECHNOLOGIE D'INITIATION SUR SILICIUM.....	19
2.2.1. <i>La plate-forme chauffante sur silicium</i>	19
2.2.1.1. Procédés de fabrication.....	20
2.2.1.2. Performances énergétiques par rapport aux autres options.....	22
2.2.2. <i>L'intégration du matériau énergétique sur la plate-forme</i>	25
2.2.3. <i>Modélisation de l'initiation</i>	26
2.2.3.1. Cas de contact thermique non intime – défaillance de l'initiation	29
2.3. LA MICRO COMBUSTION - RECHERCHE DU POINT CRITIQUE DE COMBUSTION.....	30
2.4. LES OPTIONS MATERIAUX ENERGETIQUES	33
2.4.1. <i>Les matériaux sûrs de type propergolique « sur étagère »</i>	33
2.4.2. <i>Les explosifs ou primaires (matériau classe 1 :1)</i>	34
2.4.3. <i>Les nouveaux matériaux « compatibles MEMS »</i>	34
2.4.3.1. Les matériaux macroscopiques aux performances « à la carte »	34
2.4.3.2. Les matériaux macroscopiques déposables en technologie microélectronique.....	35
2.4.3.3. Les matériaux nanostructurés pour des performances adaptées aux MEMS	36
2.5. TECHNOLOGIES DE FABRICATION ET MATERIAUX DE STRUCTURE	36
3. NOTRE ANALYSE ET LES PERSPECTIVES.....	38

Partie 2. De l'intégration composant à l'intégration système : exemples de concepts de pyroMEMS.....41

Exemple 1. Les microsystèmes d'injection de médicament micropyrotechnique.....45

1. INTRODUCTION.....	47
2. EXPRESSION DU BESOIN ET ETAT DE L'ART.....	47
3. NOUVEAU CONCEPT D'ACTIONNEUR ET DE MICROVANNE PYROTECHNIQUE	49
3.2. L'EJECTEUR PYROTECHNIQUE	49
3.2.1. <i>Modèle de fonctionnement</i>	50
3.3. LA MICROVANNE PYROTECHNIQUE.....	52
4. APPLICATION A L'INJECTION DE MEDICAMENT	53
4.2. EXEMPLE DE MICROSYSTEME D'INJECTION DE MEDICAMENT PYROTECHNIQUE - DRIP	54
4.2.1. <i>Eléments de design et modèle de conception</i>	55
4.2.2. <i>Fabrication et test d'un démonstrateur DRIP</i>	58
4.2.3. <i>Quelques conclusions</i>	59
5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	59

Exemple 2. La micropropulsion pyrotechnique intégrée sur silicium.....61

1. INTRODUCTION.....	63
2. LES BESOINS EN MICROPROPULSION	64
2.2. POUR LE SPATIAL.....	64
2.3. POUR LA STABILISATION DES PETITS DRONES	65
2.4. LES CONTRAINTES « MICRO » ET RESUME.....	65
3. ETAT DE L'ART DES OPTIONS DEVELOPPEES	66
4. LA MICROPROPULSION A PROPERGOL SUR SI	70
4.2. ETAT DE L'ART	71
4.3. LA TECHNOLOGIE MICROPROPULSION SUR SILICIUM LAAS	73
4.3.1. <i>Revue technologique des propulseurs à structure verticale</i>	75
4.3.2. <i>Revue technologique de propulseurs à structure planaire</i>	79
4.4. MODELISATION ET CONCEPTION DES MICROPROPULSEURS SUR SILICIUM.....	80
4.4.1. <i>Discussion</i>	83
5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	84

Exemple 3. Le micro amorçage sécurisé sur silicium.....87

1. INTRODUCTION.....	89
2. LE MICRO AMORÇAGE SECURISE SUR SILICIUM POUR LES APPLICATIONS MILITAIRES	90

2.2.	ETAT DE L'ART ET PRESENTATION DE NOTRE OPTION	91
2.3.	LA CONCEPTION SYSTEME DE L'INITIATEUR SECURISE SUR SILICIUM	92
2.4.	CONCEPTION DE MICRO RELAIS MONO COUPS ET BISTABLES	94
2.4.1.	<i>Le micro relais pyroélectrique « normalement ouvert »</i>	94
1.1.1.	<i>Le micro relais thermique « normalement fermé »</i>	96
2.5.	L'INTEGRATION MICROSYSTEME	97
2.6.	VALIDATION DU MICROSYSTEME INITIATEUR SECURISE SUR SILICIUM	101
2.7.	CONCLUSION	101
3.	LE MICRO AMORÇAGE « INTELLIGENT » POUR LES APPLICATIONS CIVILES	102
3.2.	LE SYSTEME D'AMORCE PROPOSE PAR LE LAAS	103
3.2.1.	<i>La conception système</i>	104
3.2.2.	<i>Le module de transfert de puissance</i>	106
3.2.3.	<i>La conception microsystème</i>	106
3.2.4.	<i>Principaux résultats</i>	107
3.3.	CONCLUSION	108
4.	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	108

Conclusion, stratégie générale et programme de travail..... ...111

II. CV, PRODUCTION SCIENTIFIQUE, FORMATION PAR LA RECHERCHE.....	123
---	------------

CURRICULUM VITAE.....	124
PRODUCTION SCIENTIFIQUE	126
REVUES SCIENTIFIQUES INTERNATIONALES A COMITE DE LECTURE.....	126
CONFERENCES INVITEES DANS DES CONGRES	127
CONFERENCES INTERNATIONALES A COMITE DE LECTURE - PROCEEDINGS	128
CONTRIBUTION À DES OUVRAGES.....	131
COLLOQUES SANS COMITE DE LECTURE.....	131
BREVETS	131
PARTICIPATION A DES ARTICLES DANS DES REVUES DE VULGARISATION.....	131
AUTRES - RAPPORTS DE CONTRATS.....	132
FORMATION PAR LA RECHERCHE / ACTIVITE D'ENCADREMENT.....	134
POST-DOCTORAT.....	134

DOCTORAT	134
DEA – MASTER DE RECHERCHE.....	135
DESS- MASTER PROFESSIONNEL.....	135
GESTION DE CONTRAT	136
Bibliographie.....	139
Table des illustrations.....	155

I. BILAN DE MON ACTIVITE DE RECHERCHE

La micropyrotechnie sur silicium : de
l'intégration composant à
l'intégration système

INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE

GENERALE

La diffusion des techniques de conception et de fabrication de la microélectronique a permis le développement de nouveaux dispositifs miniaturisés plus complexes et de plus en plus intégrés, appelés microsystèmes ou MEMS¹. Cette activité est née aux USA dans les années 80, à l'Université de Californie à Berkeley. Le concept d'origine visait à créer sur silicium, par micro usinage, des systèmes très miniaturisés comportant des fonctionnalités autres que l'électronique, mécanique notamment [1-4,7]. Fin des années 80, le « micromoteur rotatif sur puce » de R.S. Muller [7,8] constitue un fait marquant que beaucoup tenteront de reproduire comme un passeport pour entrer dans le domaine des MEMS. Ce travail a été décisif sur l'essor qu'allait prendre les microsystèmes [5] dans le monde. En effet très vite, le Japon et l'Europe se mobilisèrent autour des microsystèmes. En Europe, le LAAS a activement participé à cette dynamique depuis son origine : il a été le fondateur du réseau NEXUS et de l'association ADEMIS² en 1994.

Les années 80-90 ont été surtout consacrées au développement de micro capteurs intégrant le transducteur et l'électronique de traitement (Petersen, 1978) [6]. Ensuite, le champ d'études et de développement s'est étendu et diversifié par l'intégration de microactionneurs, micromoteurs, micropompes et microvalves, micro-instruments optomécaniques, éléments de base des microsystèmes.

Les années 90 ont été marquées par l'émergence des MEMS sur des marchés industriels de grands volumes comme l'automobile ou la péri-informatique. Des usines de semi-conducteurs dédiés à la production de MEMS furent construites par des entreprises telles que Bosch ou Motorola. Aujourd'hui, l'offre des MEMS concerne des domaines aussi variés que la défense, le médical, l'électronique, les communications et l'automobile et des marchés « niches » que sont les têtes d'imprimantes à jet d'encre, les capteurs automobiles et l'airbag, ... constituent encore 90% des marchés MEMS.

Les secteurs d'applications des microsystèmes s'étant fortement diversifiés, la déclinaison des modes d'intégration a donné lieu à nouveaux termes, tels que, les MOEMS, signifiant systèmes opto-électromécaniques, les bioMEMS pour les applications bio médicales, ou encore les MEMS-RF pour les dispositifs radio fréquence.

Il est à noter, qu'en 20 ans, l'évolution des MEMS a été extrêmement importante sur deux points essentiellement :

¹ Micro ElectroMechanical Systems

² Association for the Development of the Microtechnologies and the Integration of the Systems

- (i) les niveaux d'intégration sont de plus en plus poussés et les systèmes sont de plus en plus complexes et hétérogènes. La frontière entre micro-électronique et microsystèmes tend à s'estomper, l'industrie microélectronique s'enrichissant par des fonctions initialement dévolues aux microsystèmes.
- (ii) Les MEMS sont partout. 90% des marchés des MEMS sont dans l'automobile, les têtes d'injection d'imprimantes, la domotique... Mais d'autres secteurs très prometteurs pour les MEMS sont en cours d'émergence. Il faut citer la biologie où les MEMS révolutionneront très probablement l'analyse biologique en permettant des millions de tests unitaires en moins d'une seconde. Les sécurités civile et militaire sont concernées. D'autres secteurs d'applications sont incontournables comme le spatial, la surveillance industrielle...

Depuis la naissance de ces dispositifs miniaturisés appelés MEMS ou Microsystème, disposer d'une source d'énergie suffisante, intégrable, compatible, bas coût et dont l'énergie est disponible facilement est un challenge permanent. L'urgence et l'intérêt a encore grandi dans les années 90-95 avec le développement des microsystèmes embarqués [9-11], des microsystèmes répartis [18-21] de type « smartdust » [22], des systèmes de surveillance et bien sûr des constellations de petits satellites. Tous les experts s'accordent à dire que les années à venir consacreront la priorité « énergie » des systèmes distribués autonomes.

L'option la plus raisonnable et notre propre choix, pour les prochaines années, est de répartir les besoins énergétiques entre des sources multiples embarquées et adaptées à des besoins spécifiques. Par exemple, une architecture possible consiste à disposer d'une source d'énergie principale telle que des piles ou des cellules solaires et des sources d'énergie secondaires miniatures, sûres, adaptées à l'application qui permet d'améliorer la disponibilité et l'autonomie des systèmes. Il en résulte, donc, un besoin de plus en plus urgent de disposer de plusieurs *micro-sources d'énergie*. Ainsi, d'importants travaux ont été lancés sur les sources électriques miniatures [23-26]. Des travaux tous aussi importants s'orientent vers la résolution du problème de l'actionnement direct mécanique et/ou thermique embarqué.

L'approche traditionnelle de l'actionnement mécanique s'appuie sur l'usage de machines électromagnétiques. L'option a montré son efficacité mais apparaît difficile à intégrer aux échelles microscopiques [12-14]. A partir des années 90, est apparu l'actionnement électrostatiques [15-17] qui présente une avancée décisive pour les microsystèmes car il est très facilement intégrable, relativement puissant et simple à mettre en œuvre. Son utilisation reste toutefois limitée aux très petites dimensions et aux petits déplacements. **A l'évidence, tous les besoins ne sont pas couverts et il reste pour le moins un réel besoin dans le micro actionnement embarqué puissant.**

Selon cette analyse générale, nous avons considéré « stratégique », l'idée de nous intéresser aux micro actionneurs énergétiques sur silicium. Cet intérêt a considéré deux directions :

- celle des actionnements mécaniques directs,
- et celle des sources d'énergie embarquées en restant attentif à des exigences fortes de (i) réduction des dimensions tout en maintenant une autonomie et une puissance suffisantes, (ii) de coûts en gardant une fiabilité et des performances intéressantes.

Dans ce contexte, les matériaux énergétiques de notre point de vue, apportent une réponse attractive car ils sont une source très intéressante d'énergie embarquable³. Intégrer des matériaux énergétiques dans des micro systèmes fonctionnels doit permettre la réalisation de micro actionneur puissant et embarqué. De cette analyse est née notre idée de la micropyrotechnie.

Nous pouvons donc définir **la micropyrotechnie comme l'intégration, dans un microsystème, d'un matériau énergétique dont on va pouvoir exploiter les énergies thermiques, mécaniques et chimiques dégagées par sa décomposition**. Sa décomposition peut se faire en régime de sublimation, de combustion ou de détonation en fonction de l'application.

Cette proposition a, dès 1997, suscité un vif intérêt dans le monde. Elle reste une technologie prometteuse dans la mesure où :

1. Le concept est très simple : il suffit de savoir déposer une masse de matériau énergétique sur une plate-forme chauffante intégrée qui par effet Joule initie la décomposition du matériau.
2. L'actionnement est puissant et compact : si l'on compare les pressions d'actionnement qui est le rapport entre l'énergie et le volume de l'actionneur ($P_a = \frac{Fd}{V}$ (J/m³), le Tableau 1 montre que les matériaux énergétiques permettent aussi d'accéder à des pressions d'actionnement parmi les plus intéressantes.
3. Le système est flexible : l'énergie stockée et la pression générée sont fonction du volume de matériau énergétique ce qui permet de s'adapter à des applications diverses.
4. La libération de l'énergie ou la génération de la pression est déclenchée par commande électrique et donc totalement contrôlable par une électronique.
5. L'exploitation peut-être très diverse en fonction de l'application : on pourra par exemple utiliser les gaz de décomposition pour pousser ou utiliser directement les calories de la combustion pour chauffer localement et répondre à des besoins très énergétiques (soudure, décapage par exemple). On pourra aussi transformer l'énergie thermique en énergie électrique ou mécanique, ou encore générer des gaz spécifiques.

³ Typiquement, la combustion de composés hydrocarbonés produit 50MJ/kg, celle de propergol produit 5MJ/kg alors qu'une batterie chimique au Lithium moderne utilisée dans les nouveaux PC portables stocke à peine 0.4MJ/kg.

Tableau 1. Pression d'actionnement pour les différents mécanismes de micro actionnement

Type d'actionnement	Pression d'actionnement (J/m ³)
Piézo (PST)	10 ⁵
Electrostatique	10 ³
Electromagnétique	10 ⁵
Thermomécanique	~10 ⁵
Thermopneumatique	10 ⁶
Alliage à mémoire de forme (SMA)	10 ⁷
Changement de phase solide-liquide	10 ⁶ (acetimine) – 10 ⁷ (paraffine)
Combustion pyrotechnique	10 ⁷ – 10 ⁸

C'est dans ce contexte que s'est mise en place notre activité de recherche en 1994.

Durant les 10 années écoulées, nous nous sommes donnés pour mission de contribuer à l'émergence de cette nouvelle discipline qu'est la « micropyrotechnie » pour le développement du microactionnement de puissance embarqué. Nous avons bâti notre stratégie sur une démarche équilibrant la compréhension théorique des phénomènes et la maîtrise technologique. Nous avons mis en place les technologies pour intégrer les matériaux énergétiques solides dans des micro plates-formes chauffantes silicium.

Nous avons aussi essayé en permanence d'effectuer la transition de la technologie vers le système et d'explorer de nouveaux domaines d'applications. Concrètement, nos efforts se sont répartis suivant trois voies complémentaires :

- La modélisation : nous avons construit -à partir de modèles physiques (thermique, thermodynamique, fluide)- des outils de conception adaptés aux applications,
- Le développement technologique pour la fabrication d'actionneurs embarqués puissants et fiables,
- Et bien sûr, dans un souci de toujours répondre aux besoins sociétaux, la réalisation de démonstrateurs fonctionnels pour des applications spécifiques.

Nous avons souhaité dans ce document présenter un court bilan de notre activité de recherche, expliciter quelques résultats importants et identifier des axes porteurs pour ouvrir de nouvelles

perspectives de recherche de base et pour pointer quelques grandes applications pour les 5 ans à venir. Ce mémoire est alors organisé en trois parties :

La première partie, « **La micropyrotechnie, enjeux scientifiques et technologiques** » essaie de rassembler l'état des connaissances (procédés technologiques, modélisation et applications) de la micropyrotechnie. Elle vise – à partir de nos travaux et de ceux de la communauté internationale- de pointer les insuffisances et tente de dégager les axes les plus prometteurs.

Cette première partie a fourni la matière d'un article de synthèse publié dans la revue internationale *Sensors & Actuators* [27].

Comme nous l'avons déjà mentionné, notre activité de recherche s'est construite sur une démarche équilibrant les développements technologiques de base, la modélisation et la réalisation de micro systèmes pyrotechniques innovants pour des domaines d'application variés. Ainsi, la deuxième partie du mémoire illustrera cette démarche au travers d'exemples d'application. Dans un souci de clarté, nous avons considéré 3 exemples de systèmes innovants issus de la micropyrotechnie :

- *Les microsystèmes d'injection de médicament pyrotechnique.* Le médical est un domaine particulièrement moteur pour le développement des microsystèmes et la micropyrotechnie. Nous ferons un bilan de l'apport de la micropyrotechnie à l'injection de médicament. Après la description des fonctions de micro actionneur et micro valve pyrotechniques, ce chapitre présente les outils de conception et les technologies que nous avons mis en œuvre pour réaliser des microsystèmes d'injection de médicament pyrotechnique. Nous verrons en conclusion que c'est un domaine d'application riche scientifiquement qui a fortement contribué à la maîtrise de l'actionnement micro pyrotechnique, même si des verrous technologiques sont encore à lever pour accéder à des actionnements fins et mieux contrôlés. Des travaux complémentaires notamment sur les matériaux énergétiques et aussi sur les choix d'architecture des actionneurs semblent nécessaires.
- *La micropropulsion pyrotechnique intégrée sur silicium.* Cette activité a été initiée au LAAS et suscite depuis d'importants travaux en Europe, aux Etats-Unis et récemment en Asie. Après un état de l'art complet des microsystèmes de propulsion et de leurs caractéristiques respectives, nous présenterons les modèles, outils de conception et les technologies mis en œuvre pour réaliser des matrices de micropropulseurs à propergol solide pour le maintien à poste de petits satellites. Nous essaierons aussi de positionner notre contribution par rapport au contexte international en se référant aux options similaires développées par des équipes américaines, européennes et asiatiques. Nous verrons en conclusion que la micropropulsion solide sur silicium présente des atouts extrêmement intéressants et représente une option très prometteuse pour les manœuvres requérant des niveaux de poussées faibles (0.1mN-1mN) à moyens (10aine de mN). On

peut citer par exemple le maintien à poste de nano satellite ou la stabilisation de drone miniature.

- *La micro initiation sécurisée* sur silicium. Dans le domaine du militaire et civil, la sécurité est devenue un soucis permanent à tous les niveaux. Alors que pour les applications civiles la sécurité touche des domaines d'application et des formes très variés (sécurité automobile, surveillance médicale, inspection industrielle, sécurité bancaire...), la sécurité militaire est fortement liée à la capacité de sécuriser par l'intégration d'« intelligence » aux mises à feu pyrotechniques. Nous contribuons fortement à cette problématique assez récente. Ce dernier chapitre donnera les principales innovations microsystemes et systemes que nous avons mises en œuvre pour réaliser des microamorces sur silicium sécurisées et « intelligentes ».

Enfin, une dernière partie, « **Conclusions, Perspectives et programme de travail** », tentera de faire un bilan des acquis, discutera des axes porteurs pour les années à venir et proposera des objectifs de recherche pour les 5 ans à venir.

PARTIE 1 :

LA MICROPYROTECHNIE : ETAT DE L'ART, ENJEUX SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES

1. Etat de l'art

L'introduction générale a mis en évidence les motivations de l'actionnement de puissance embarqué pour répondre aux besoins suscités par la miniaturisation et l'autonomie des systèmes et l'accroissement de leur capacité à communiquer et traiter l'information. En 1995, la problématique s'est posée à nous en terme d'actionnement de fluide pour des applications d'injection de médicament [1]. En réponse, nous avons proposé un micro actionneur pneumatique basé sur la décomposition d'un matériau énergétique déposé sur un initiateur en silicium [2,3]. **Ce concept innovant d'actionnement est à l'origine de la micropyrotechnie.** Depuis les besoins suscités par des applications de plus en plus nombreuses et variées [4-6][8-21][23-28][38,42,44,54] alliés aux progrès réalisés en micro/nanotechnologies ont participé à l'émergence de la micropyrotechnie en tant que discipline.

En effet, initiée en France en 94 pour répondre à une problématique d'actionnement de fluide, elle a suscité l'attention d'équipes renommées aux USA puis en Europe, ensuite en Asie et même depuis quelques mois en Afrique [31]. On soulignera l'université de Berkeley (Californie, USA) [21], l'université de Tohoku (Japon) [18], Georgia Tech (USA) [9], Sandia National Laboratory [50], IMT de l'université de Neuchâtel [23] et le LAAS-CNRS en Europe.

Née d'un concept très simple (un film propergol sur initiateur silicium), la micropyrotechnie a pris des formes parfois différentes (utilisation d'explosif par exemple) et de plus en plus complexes : dans les années 97-04, les équipes américaines ont exploré l'intégration de propergols [9,21,22,28] et de primaire (explosifs) [16]. Stewart et al ont publié des travaux sur l'intégration d'explosifs et leur fonctionnement (initiation et détonation) aux faibles dimensions (<<millimètre) [27, 30]. En Europe (LAAS [33,38,48], IMT [23], Biomérieux/SME/LETI [41], CEA-LETI [54]) ont privilégié le développement des technologies d'intégration de matériaux énergétiques générateurs de gaz (principalement propergols) dans des structures millimétriques et la maîtrise des aspects de microinitiation et combustion à cette échelle. D'autres ont utilisé l'énergie thermique de ces actionneurs pour générer une puissance électrique [5,22,24]. A partir de 03, des équipes asiatiques, [8,18] ont, pour des applications de propulsion, rejoint la discipline en se positionnant plutôt sur des systèmes millimétriques à base de propergol très proches de nos travaux. Très récemment des équipes américaines ont utilisé le concept pour réaliser des microamorçages [36-38, 47,50] ou tout simplement pour altérer des surfaces, souder et chauffer [26-28,30].

En résumé, en 10 ans, la micropyrotechnie s'est diversifiée et enrichie :

- (i) dans ses applications : en plus de l'actionnement de fluide, le concept a été utilisé pour des applications de micropropulsion sur silicium, de génération de gaz, d'actionnement, de

micro amorçage ou tout simplement en tant que source d'énergie pour altérer des surfaces, chauffer et souder.

- (ii) dans la technologie et les matériaux intégrés : les premiers actionneurs intégraient des matériaux propergols « sur étagère », alors que la tendance actuelle est à la mise au point de matériaux énergétiques à performances contrôlées et compatibles avec les micro/nanotechnologies.
- (iii) dans les dimensions et l'intégration: les premiers actionneurs pyrotechniques avaient un volume de 6mm^3 [3], aujourd'hui pour des applications similaires, les dimensions sont réduites au mm^3 et la tendance de miniaturisation amorcée se poursuit en mettant en œuvre des matériaux énergétiques en couches minces [27-30,50,51]. Par exemple, Menon et al [28] et Tappan et al [50] ont mis au point des procédés basés sur les micro et nano technologies pour élaborer en couches très minces des composés très énergétiques. Les dépôts de Tappan et al ont une épaisseur d'une dizaine de μm alors que l'échelle de dimension de Lemon est plutôt quelques couches atomiques. Ces travaux sont très récents et extrêmement prometteurs.

L'historique de la micropyrotechnie met donc en évidence que de 1995-2005, cette discipline a été en pleine expansion. Le LAAS a fortement participé à cette dynamique après avoir contribué à l'émergence de la micropyrotechnie. Nous proposons ici de faire un bilan des connaissances et des acquis. Nous commençons par une revue des enjeux scientifiques et technologiques qui ont guidé nos travaux de recherche, et proposons ensuite une analyse qui pointe les insuffisances déjà flagrantes méritant des approfondissements rapides notamment en terme de développement de nouveaux matériaux et de nouveaux procédés d'intégration dans les microsystèmes.

2. Enjeux scientifiques et technologiques

Outre le matériau énergétique qui est par nature le cœur du système, l'élément central de la micropyrotechnie est la plate-forme chauffante qui permet d'initier et d'entretenir la décomposition du matériau énergétique. La réalisation de micropyrosystèmes embarqués fiables et performants pour des applications diverses sont étroitement liées à la capacité de trouver et de mettre au point de bons matériaux énergétiques, de pouvoir les initier avec des puissances compatibles avec les microsystèmes, d'en assurer la complète décomposition malgré les faibles dimensions. Le dernier point qui n'est pas le moindre lorsque les dimensions deviennent sub-millimétriques, est de pouvoir intégrer ces matériaux énergétiques dans le microsystème global selon les applications. Cela conduit aux enjeux suivants qui ont guidé nos travaux depuis mon entrée au CNRS :

- **La technologie d'initiation sur silicium** est un point crucial dans l'état d'avancement de cette technologie. Les enjeux sont doubles : tout d'abord, il faut rendre minimale l'énergie à fournir pour déclencher l'initiation de sorte que ces systèmes soient compatibles avec les contraintes microsystèmes. Et aussi, il faut s'assurer technologiquement de l'intimité totale entre le point chaud et le matériau afin d'optimiser le processus d'initiation. La recherche de performances thermiques toujours optimales pour nos plates-formes a focalisé et focalise encore nos efforts de conception, car les actionneurs pyrotechniques sont des systèmes embarquables. Ce point sera discuté dans la section *Technologie d'initiation sur silicium*.
- **La maîtrise de la réduction des dimensions** d'actionnement jusqu'aux limites de la micropyrotechnie pour toujours gagner en terme de niveau d'intégration, de masse, de coût, sans pénaliser la fiabilité de fonctionnement.... Ce point sera approfondi dans la section *La micro combustion*.
- **Le choix des matériaux** énergétiques à intégrer. Le matériau énergétique est un point central de la technologie. Il doit être choisi et formulé précisément en fonction de l'application choisie et des performances attendues en termes d'initiation et d'actionnement. Un grand nombre de matériaux énergétiques sont considérés en fonctions des applications et des niveaux d'intégration visés. Nous ferons un bilan et argumenterons ces choix dans la section *Les options matériaux énergétiques*.
- **Le choix de concepts innovants** répondants aux besoins applicatifs et le **développement de technologies d'intégration** simples, intégrables, robustes et fiables. Ces points seront discutés dans la partie *Technologies de fabrication et les matériaux de structure*.

2.2. Technologie d'initiation sur silicium

2.2.1. La plate-forme chauffante sur silicium

Pour limiter l'énergie d'initiation, problématique qui s'est posée à nous dès l'origine de la micropyrotechnie, il a fallu trouver un moyen de chauffer localement le matériau énergétique, faiblement conducteur thermique (0.25W/mK), en limitant au maximum les pertes dans l'environnement. Ceci a été possible en concevant et développant **une génération d'initiateurs sur membranes diélectriques suspendues sur lesquelles sont disposés la résistance chauffante et l'élément d'adressage si besoin**. La difficulté a reposé sur la réalisation d'une membrane, suffisamment fine pour limiter les pertes thermiques, mais en même temps suffisamment robuste pour supporter le matériau énergétique déposé dessus. Imaginées en 1996/1997 en collaboration avec les équipes travaillant sur les capteurs de gaz et de pression [43,44], les membranes diélectriques

$\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ répondent à ce besoin et ont constitué une avancée très importante pour la réalisation de **plates-formes chauffantes performantes**. La Figure 1 est un schéma de principe d'une plate-forme chauffante sur membrane diélectrique. Les épaisseurs respectives des couches de SiO_2 ($1.4\mu\text{m}$) et SiN_x ($0.6\mu\text{m}$) ont été calculées de sorte d'avoir une contrainte mécanique résultante du bicouche inférieure à 100MPa [45]. Ainsi, il est possible de réaliser des membranes suspendues de $500\mu\text{m}\times 500\mu\text{m}$ jusqu'à $2\text{mm}\times 2\text{mm}$ avec des rendements de fabrication de 99%. Pour des membranes de $2\text{mm}\times 2\text{mm}$ jusqu'à $5\text{mm}\times 5\text{mm}$, les rendements de fabrication sont encore très satisfaisants ($\sim 90\%$).

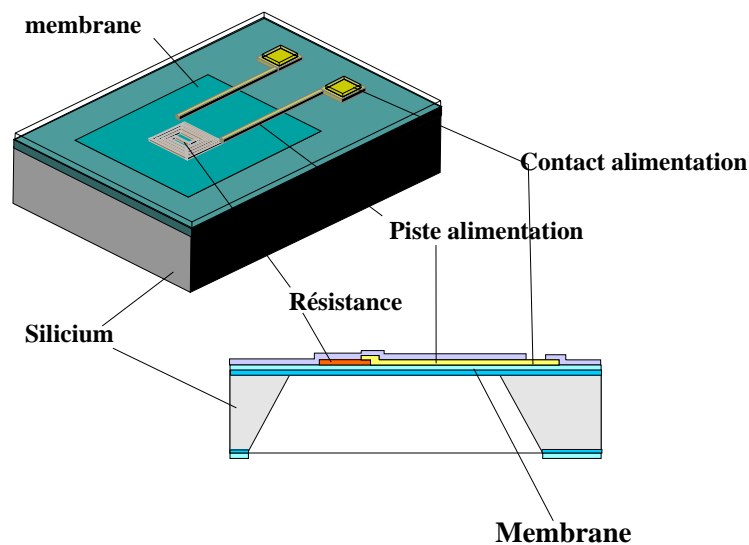


Figure 1. Schéma d'une plate-forme chauffante sur membrane diélectrique fine

2.2.1.1. Procédés de fabrication

Le procédé de fabrication des plates-formes a été reporté à plusieurs reprises [39,15, 48] et sera rapellé rapidement dans ce paragraphe.

Un substrat de silicium poli double face est oxydé sur $1.4\mu\text{m}$ d'épaisseur. Ensuite, une couche de SiN_x puis de polysilicium ($0.6\mu\text{m}$ et $0.5\mu\text{m}$ respectivement) sont déposées par LPCVD (Low Pressure Chemical Vapour Deposition). Le polysilicium est dopé par diffusion au phosphore et ensuite gravé au plasma (SF_6+O_2) pour dessiner la résistance. Les pistes d'alimentation sont recouvertes de chrome et d'or (0.2 et $0.8\mu\text{m}$ respectivement). La face arrière est préparée avant de procéder à la gravure finale du silicium (KOH ou DRIE⁴) qui libère alors la membrane. La gravure anisotrope KOH est privilégiée pour des raisons de coûts et temps de process lorsque les membranes ont des surfaces supérieures à $1.5\text{mm}\times 1.5\text{mm}$. Pour les membranes plus petites, les cavités sont réalisées par DRIE. Les rendements de fabrication obtenus sont de 99% pour des membranes de surface allant de $0.5\text{mm}\times 0.5\text{mm}$ jusqu'à

⁴ Deep Reactive Ion Etching

de 2mm×2mm. Ces étapes sont illustrées sur la Figure 2 et la Figure 3 montre des photos de plates-formes ainsi réalisées.

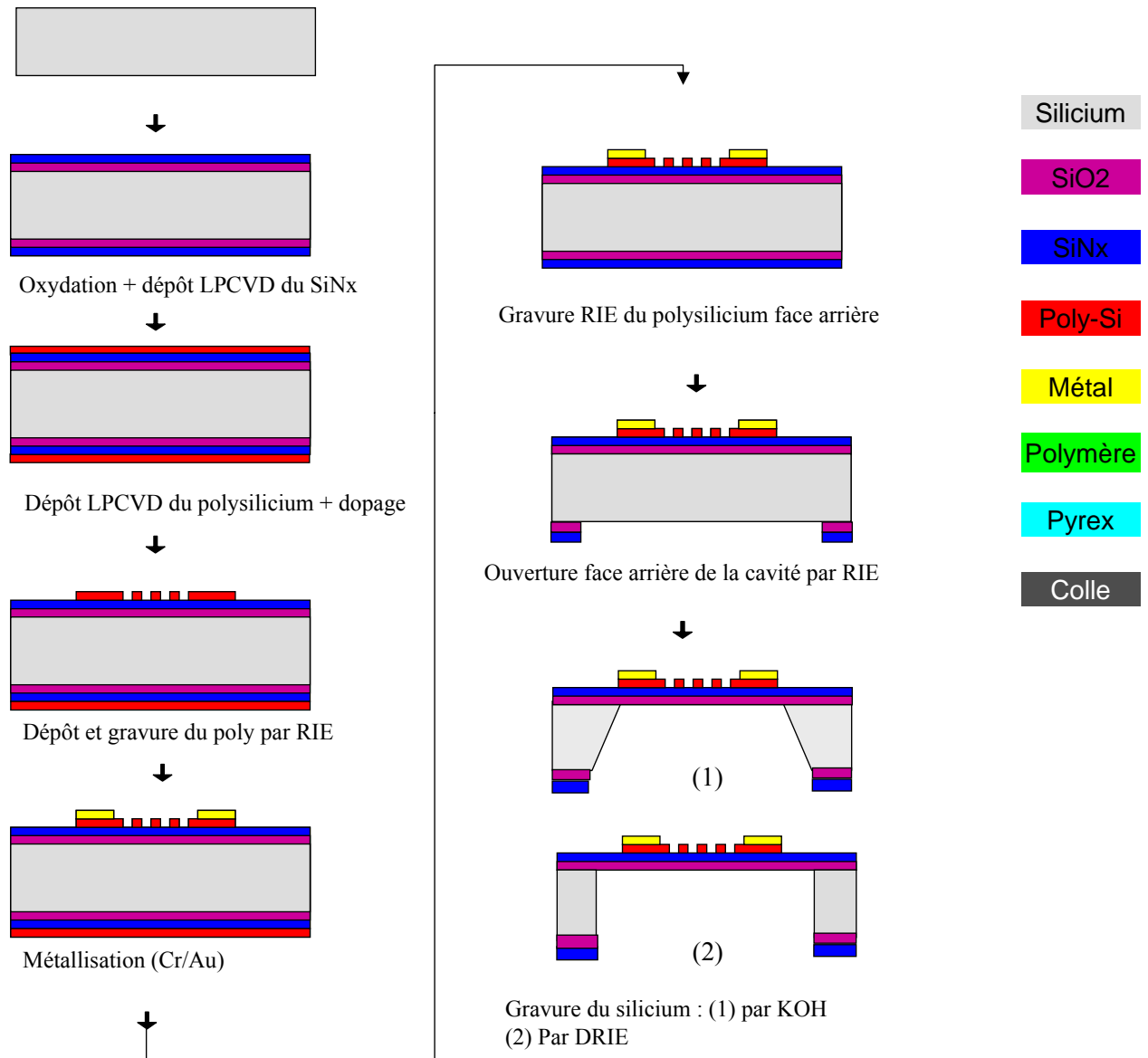


Figure 2. Etapes de fabrication des plates-formes chauffantes

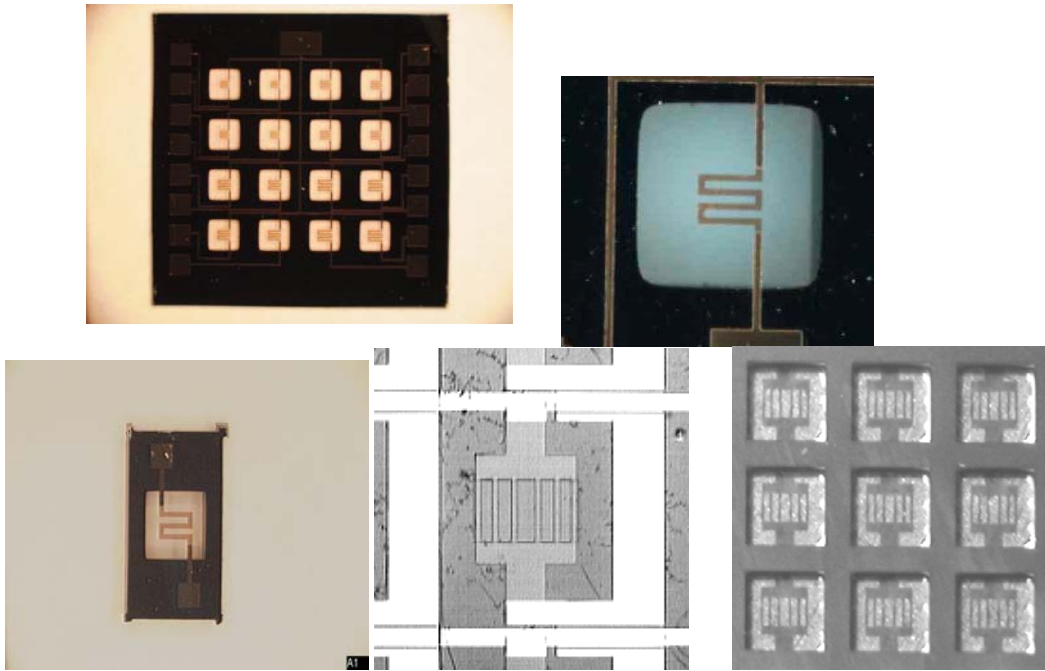


Figure 3. Photos de quelques plates-formes ainsi réalisées pour des applications micropyrotechnie

A température ambiante, de part leur faible niveau de contraintes résiduelles, ces plates-formes présentent une déformation (flèche au centre) de quelques μm en fonction de la taille de la membrane. La Figure 4 donne, pour illustration, le profil d'une plate-forme SiO_2 ($1.4\mu\text{m}$) / SiN_x ($0.6\mu\text{m}$) avec une résistance en polysilicium pour différentes puissances d'alimentation. La surface de la membrane est de $1.5\text{mm}\times 1.5\text{mm}$. A vide (0mW), la déflexion est de seulement $2.5\mu\text{m}$, témoignant d'une contrainte résultante faible.

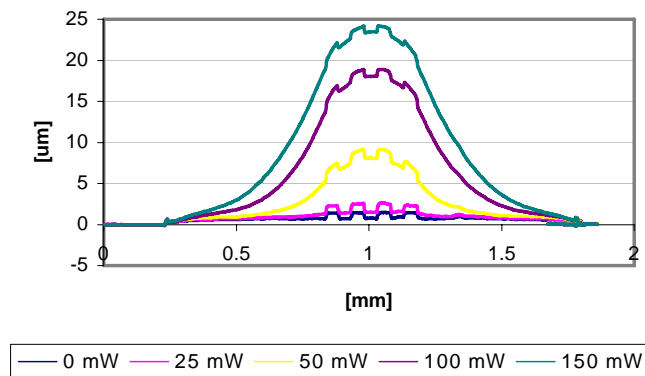


Figure 4. Profil d'une membrane $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ avec résistance en polysilicium pour différentes puissances d'alimentation (mesures réalisées par IMT-University of Neuchatel)

2.2.1.2. Performances énergétiques par rapport aux autres options

Avec un rendement thermique de $\sim 10^\circ\text{C}/\text{mW}$, les plates-formes $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ présentent les meilleures performances parmi les plates-formes disponibles en technologie microsystème que sont les

résistances métalliques sur verre, pyrex ou Alumine [21,24,26,34]. La Figure 7 donne les courbes d'échauffement (Température maximale en fonction de la puissance) pour 3 substrats de plates-formes ayant la même surface totale (2.25mm²) et de chauffe : alumine, verre, SiO₂/SiN_x. Ces résultats -issus de modélisation par éléments finis sous MEMCAD⁵- montrent que pour une plate-forme SiO₂/SiN_x il faut à peine 30mW pour atteindre 200°C, alors qu'il en faut 300mW si le substrat est de l'alumine.

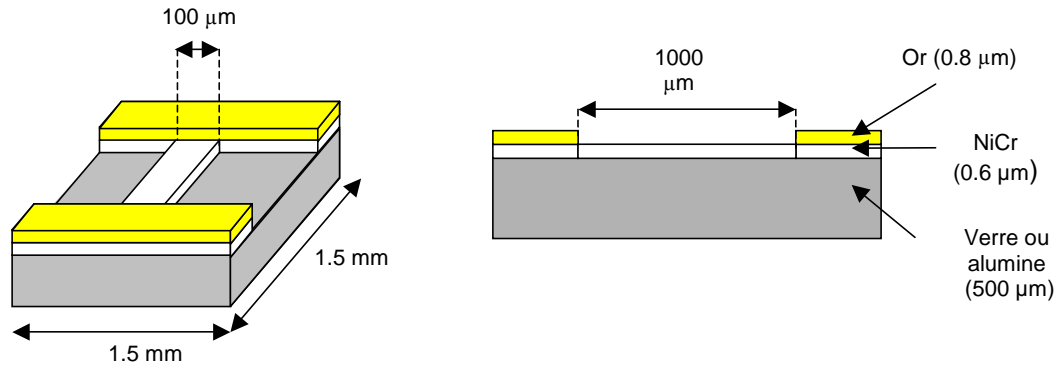


Figure 5. Schéma d'une plate-forme chauffante avec résistance en Ni/Cr sur substrat de verre ou Alumine utilisé pour la modélisation

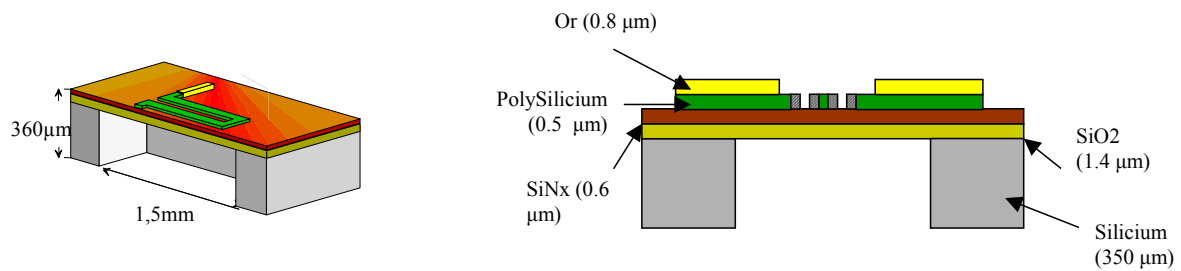


Figure 6. Schéma d'une plate-forme chauffante avec résistance en poly silicium sur membrane fine utilisée pour la modélisation

⁵ Logiciel ConventorWare

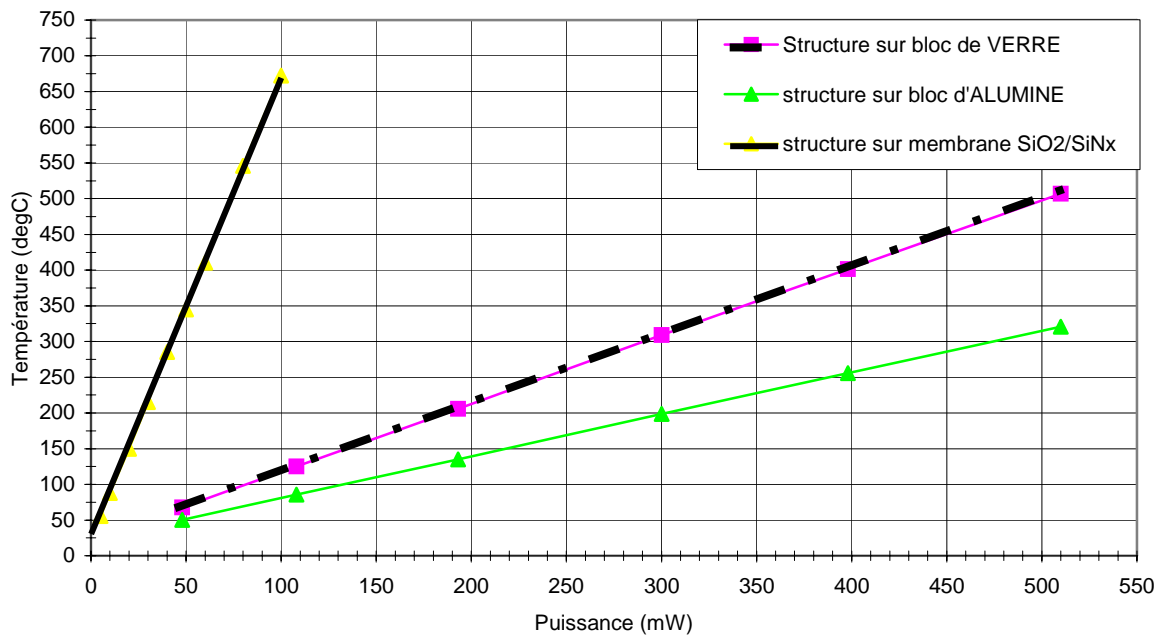


Figure 7. Température au niveau de la résistance en fonction de la puissance électrique d'alimentation pour différents types de plates-formes

Pour compléter cette analyse, nous avons comparé les temps d'initiation d'un matériau énergétique en contact intime avec la plate-forme chauffante, pour deux plates-formes: (1) $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ et (2) verre. L'alumine étant trop conductrice thermique n'est plus considérée. Le temps d'initiation représente le délai pour que la surface du matériau énergétique en contact avec la résistance atteigne sa température d'initiation typiquement entre 200°C-300°C.

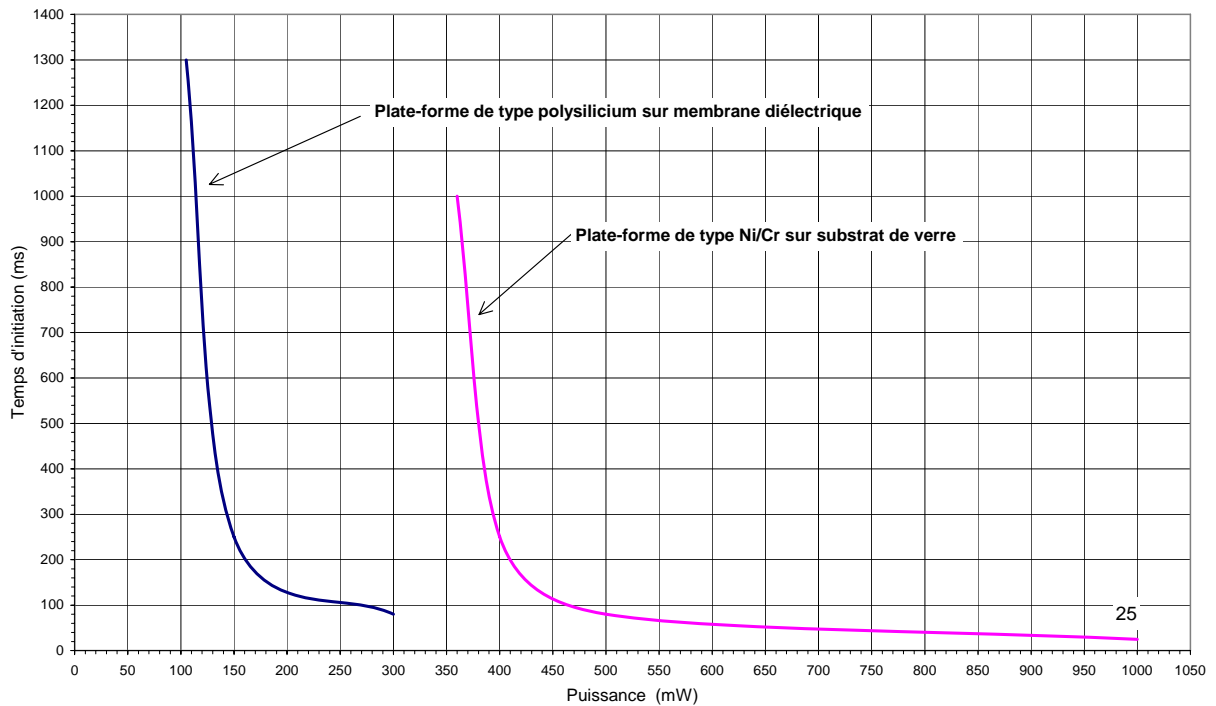


Figure 8. Temps d'initiation en fonction de la puissance électrique pour deux types de plates-formes chauffantes : verre et membranes $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$

Les courbes de la Figure 8 montrent que la plate-forme chauffante sur membranes diélectriques permet d'atteindre des temps d'initiation nettement inférieurs à ceux obtenus avec des résistances Ni/Cr sur du verre. La différence est de 250ms quelque soit la puissance. Ces calculs ont donc conforté notre choix de développement d'initiateurs sur membrane fine $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$. La référence [49] rapporte l'étude complète.

Une alternative récente aux membranes diélectriques est la réalisation de membranes polymères (BCB⁶ ou SU8) qui permettront de gagner encore 20% sur le rendement thermique. Ces membranes sont en étude pour des microinitiateurs pyrotechniques de très petites tailles.

2.2.2. L'intégration du matériau énergétique sur la plate-forme

Intégrer les matériaux énergétiques dans ou sur l'initiateur de sorte que le contact thermique entre le matériau et le point chaud soit parfait a constitué et constitue encore un point dur. Par exemple, la présence d'une bulle d'air entre le matériau énergétique et la résistance compromet l'initiation. Ou bien, un simple mauvais contact (comme une rugosité) entre le matériau et la résistance engendre des

6

dispersions sur les caractéristiques d'initiation qui ne sont pas tolérables à ces faibles niveaux d'énergie d'initiation (\sim mJ).

Des méthodes collectives ont été privilégiées pour des raisons évidentes de coûts et de mise en oeuvre. Une technique de remplissage sous vide dérivée de la sérigraphie a été mise au point en collaboration avec NOVATEC dans le cadre d'un contrat Région. Elle a été sans aucun doute la technique de report de propergol la plus intégrée qui ait été mise en place en micropyrotechnie.

Le principe de la machine NOVATEC [42] repose sur l'avancée d'un front de vide qui crée une dépression sur ces cavités, entraînant ainsi la composition énergétique lors de son passage sur l'initiateur à remplir. Il est possible de remplir des petites cavités borgnes ($500\mu\text{m} < \phi < 1.5\text{mm}$ et $350\mu\text{m} < h < 1.5\text{mm}$) avec un matériau relativement visqueux. Cette technique de dépôt a permis d'éviter les bulles d'air mais nous verrons au § 2.2.3.1 que l'intimité du contact thermique n'est pas encore maîtrisée et que l'interfaçage matériau énergétique/initiateur à ces faibles dimensions reste un enjeu technologique.

2.2.3. Modélisation de l'initiation

Au-delà de la mise en œuvre technologique, bien comprendre les phénomènes mis en jeu est essentiel à la maîtrise de la micro initiation. Cela permet aussi, dans un deuxième temps, de mettre au point les outils de conception pour développer des initiateurs fiables et optimisés.

L'initiation est un phénomène thermique (eq 1) : l'énergie électrique apportée au propergol initialement à 22°C a pour effet d'augmenter sa température (T) en surface et au voisinage immédiat de la surface (cf. Figure 9). Lorsque la température de surface (T_s) dépasse la température d'auto initiation (T_i), une réaction exothermique s'opère. L'allumage est réussi si l'énergie dégagée est suffisante, malgré les pertes, à maintenir la température de chauffage jusqu'à T_i . Lorsqu'il y a des échanges thermiques avec l'environnement, il existe une taille critique du point chaud en de ça de laquelle l'initiation n'est plus possible. La question qui se pose est : **compte tenu des pertes, la puissance électrique est-elle suffisante pour porter la surface du propergol à sa température d'initiation ? Si oui, pendant combien de temps faut-il appliquer la puissance ?** C'est le but des modèles que nous avons développés qui permettent d'éviter des mises au point expérimentales fort longues, difficiles et coûteuses.

Pour les calculs, nous supposons que le dépôt du matériau énergétique est maîtrisé assurant alors un contact thermique intime parfait entre l'initiateur et le matériau.

$$C_p \rho_p \frac{\partial T}{\partial t} = k_p \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + L \quad \text{eq 1}$$

Avec k_p , C_p , ρ_p la conductivité thermique, la chaleur massique et la densité du matériau énergétique.

Les pertes thermiques, L , prennent en compte les pertes par convection $h (T_s - T_a)$; les pertes radiatives sont négligeables pour les températures inférieures à 300°C.

avec :

- T_s Température de surface
- T_a Température ambiante
- h Coefficient de convection

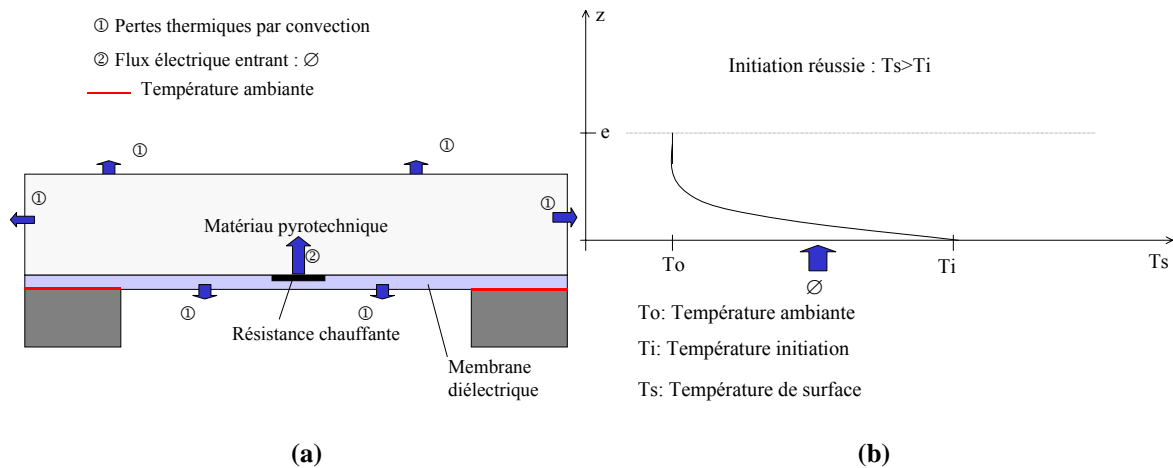


Figure 9. Flux thermiques lors de l'initiation et profil thermique dans l'épaisseur du matériau énergétique lors d'une initiation réussie

Pour illustrer ce travail, nous considérons des propergols à base de PAG⁷ et AP⁸ dont la profondeur du profil thermique ($\sqrt{k_p / \rho_p C_p \times t}$) est autour de 600µm au bout de 250ms. Cela permet, pour des épaisseurs supérieures à 1mm, de faire l'hypothèse du mur semi-infini. Alors l'échauffement surfacique du propergol s'écrit simplement:

$$T_s(t) = T_o + \frac{1}{\sqrt{\pi k_p \rho_p C_p}} \int_0^t \phi(\tau) \frac{d\tau}{\sqrt{t - \tau}} \quad \text{eq 2}$$

avec $\phi(t) = Pelect(t) / S$

et :

- τ Pas de temps
- $Pelect$ Puissance électrique incidente
- S Surface sur laquelle est appliquée la puissance électrique

⁷ Poly Azoture de Glycidyle

⁸ Perchlorate d'Ammonium

Cette hypothèse ne prend pas en compte les pertes latérales mais permet d'avoir de façon simple une première évaluation du temps d'initiation en fonction des puissances électriques, comme le montre la Figure 10.

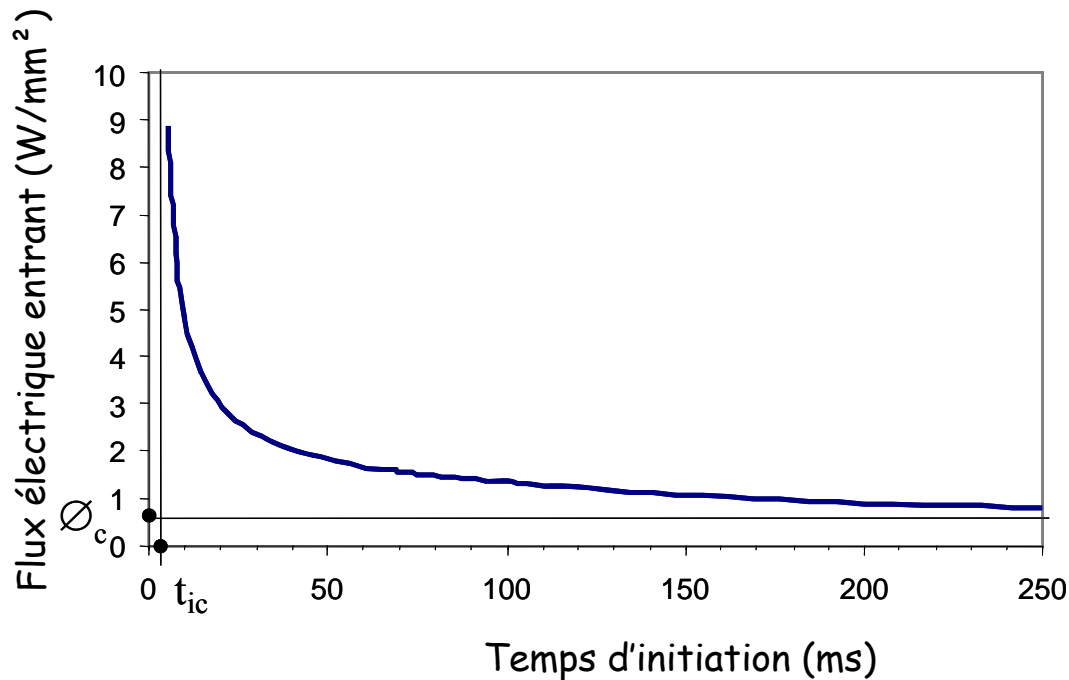


Figure 10. Temps d'initiation en fonction de la densité de puissance électrique incidente (P_{elect}/S) ($T_i=300^{\circ}\text{C}$)

La courbe de la Figure 10 montre qu'il existe des conditions critiques caractérisées par le flux électrique d'initiation critique (ϕ_c) et le temps d'initiation critique (t_{ic}), en dessous desquels il ne peut y avoir d'initiation.

Il est à noter aussi, qu'il y a des flux énergétiques très intenses (voir Figure 10 : ϕ pour des temps inférieurs à t_{ic}) qui ne permettent pas l'initiation de la combustion. Pour ces flux là, il y a dégradation du propergol tant que le flux est appliqué et arrêt de toute réaction ensuite. Le propergol s'est dégradé trop vite et la zone préchauffée au voisinage de la paroi a une épaisseur trop mince pour qu'une combustion se maintienne. Dans le cas des microsystèmes, où l'objectif est de minimiser l'énergie électrique, cette problématique ne se pose pas. Si l'on considère une température d'initiation T_i de 300°C , le graphe de la figure 11 montre qu'il faut entre 16ms et 88ms pour initier le matériau en fonction des puissances incidentes comprises entre $0.5\text{W}/\text{mm}^2$ et $2\text{W}/\text{mm}^2$. Pour des puissances inférieures ($0.4\text{W}/\text{mm}^2$ par exemple), il n'y a pas d'initiation possible.

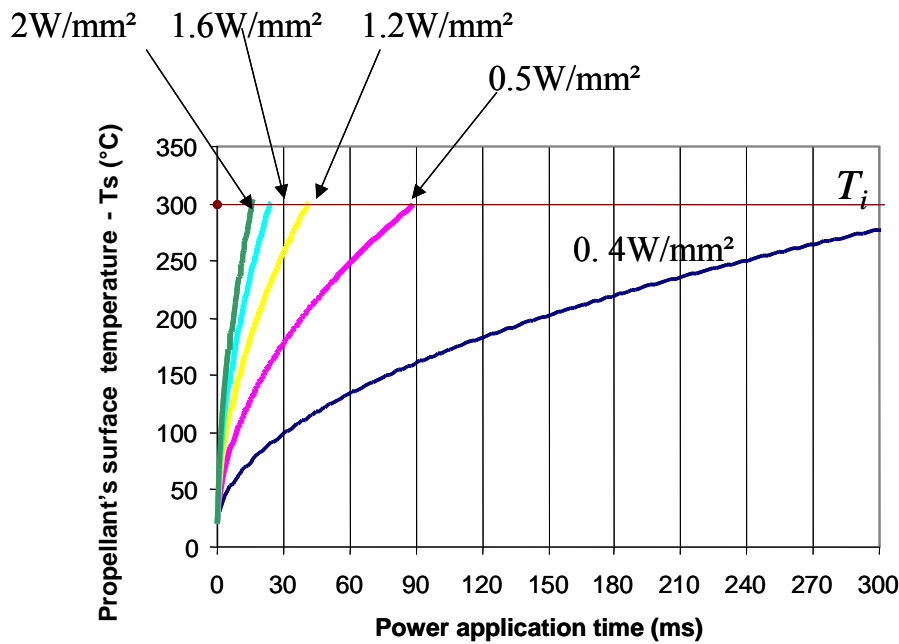


Figure 11. Durée d'initiation en fonction des puissances électriques d'allumage en supposant que le point d'allumage est en surface

Si l'épaisseur du matériau énergétique déposé est inférieure à 1mm, on ne peut pas considérer que l'on a un mur semi infini et le problème d'allumage se ramène à un problème thermique classique à résoudre numériquement avec des logiciels éléments finis qui permettront de tracer les mêmes courbes moyennant des temps de calculs plus longs [39].

Ces calculs doivent être reconduits pour chaque matériau et chaque système en fonction de l'application et surtout en fonction de l'initiateur, pour trouver le point optimum pour l'initiation.

2.2.3.1. Cas de contact thermique non intime – défaillance de l'initiation

Les résultats précédents supposent que le contact est intime entre la plate-forme chauffante et le matériau. Si ça n'est pas le cas, l'énergie nécessaire est beaucoup plus importante que les valeurs prédites par les calculs. Cette situation n'est pas exceptionnelle pour deux raisons:

- (i) la première est que la technologie de dépôt ou d'injection du matériau énergétique sur sa plate-forme chauffante est défaillante : il se crée des discontinuités entre le matériau énergétique et la plate-forme chauffante durant le dépôt (cf.§ 2.2.2).
- (ii) la seconde est que durant l'échauffement jusqu'à la température d'initiation, il y a décollement du matériau énergétique et de la membrane supportant le point chaud dû à la différence des coefficients de dilatation des deux parties.

Ceci a été mis en évidence lors d'expérimentations en se servant de la résistance d'initiation comme capteur thermique durant l'échauffement de l'initiation. La Figure 12 en est un exemple. On voit que la température de la résistance au bout de 1ms est bien supérieure à T_i , alors que l'initiation n'a pas eu lieu. Ceci témoigne de la présence de micro bulle d'air entre la résistance et le matériau énergétique. C'est un problème technologique essentiel en micropyrotechnie qu'il faut résoudre pour assurer une initiation optimale en terme de puissance minimale et reproductibilité. Une solution est l'utilisation d'une couche thermique entre la plate-forme chauffante et le matériau pyrotechnique. Un collage suffit, encore faut-il qu'il soit possible de le mettre en œuvre ce qui reste difficile pour des remplissages « borgnes ».

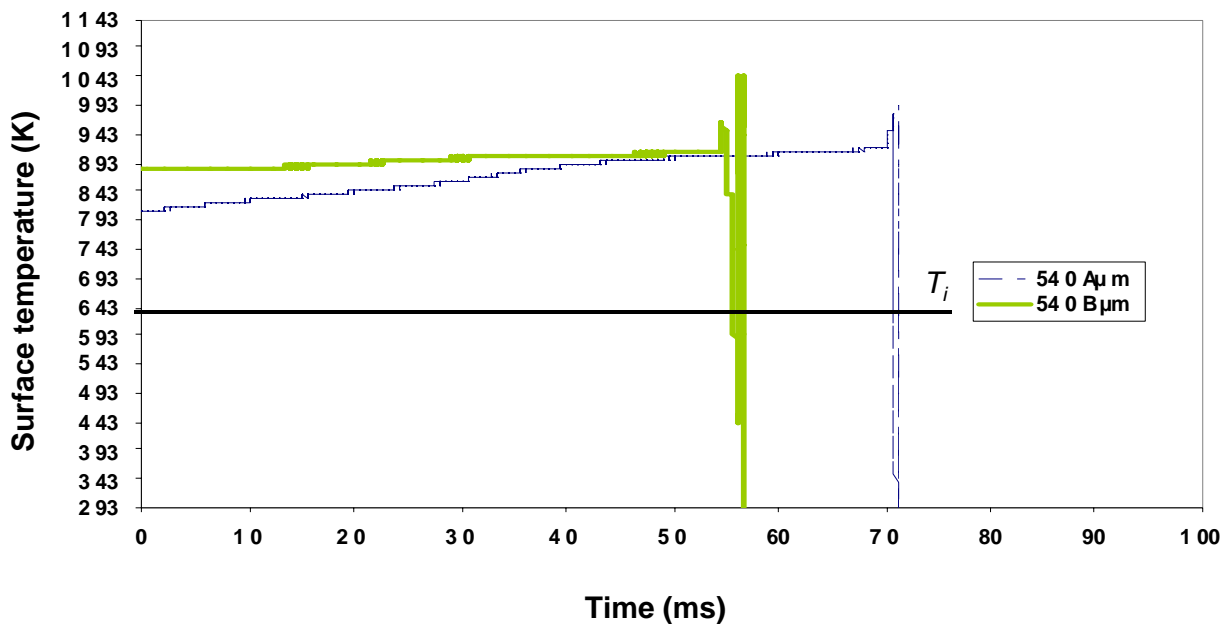


Figure 12. Courbes d'initiation lors d'un contact thermique matériau énergétique/plate-forme non intime [33]

2.3. La micro combustion - recherche du point critique de combustion

Les dimensions des actionneurs pyrotechniques sont fonction de l'application visée et des performances attendues en terme de volume de gaz requis ou de force souhaitée... L'objectif pour toutes les équipes est de réaliser **une intégration optimale**. On visera par exemple un rapport énergie disponible sur poids de la structure maximum. Cependant, cette démarche de miniaturisation ne peut pas être dissociée d'une **recherche de la sûreté de bon fonctionnement** : lorsque l'on réduit les dimensions en de ça de la surface critique de combustion du matériau, le rapport énergie de combustion / perte thermique devient défavorable à la combustion soutenue. Il est donc essentiel de savoir prévoir ces dimensions critiques de fonctionnement pour développer des structures fiables.

Certaines équipes ont mis en évidence les problèmes d'arrêt de flamme lorsque le diamètre de combustion se réduit [40][32] mais aucun modèle ne permet de la prédire. Nous avons proposé un modèle simple permettant de prédire la vitesse de combustion (V_r) en fonction de la section en combustion (a^2) et en fonction des pertes dans l'environnement (L). Le système modélisé est schématisé sur la Figure 13. Le front de flamme qui correspond à la section en combustion se déplace à la vitesse V_r . La combustion est auto-entretenue par l'échauffement du propergol à sa température d'initiation (T_i) par le front de flamme.

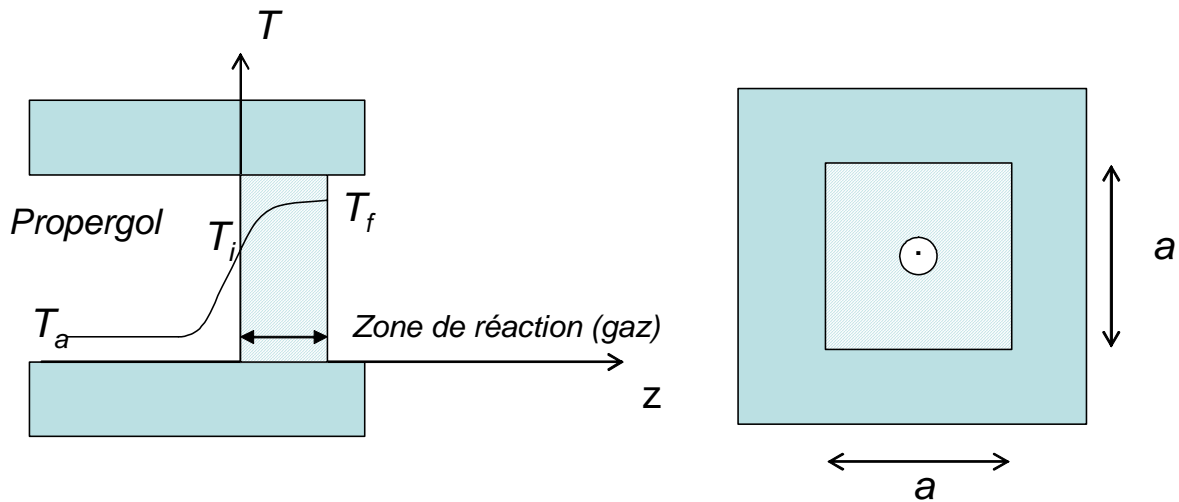


Figure 13. Profil thermique dans un tube de propergol en combustion à section carré

$$k_p \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \rho_p C_p \frac{\partial T}{\partial t} = L \quad \text{eq 3}$$

avec L pertes thermiques dans l'environnement.

L'équation 3 s'écrit en fonction de la vitesse de combustion V_r :

$$k_p \frac{d^2 T}{dz^2} + \rho_p V_r C_p \frac{dT}{dz} = L' \quad \text{eq 4}$$

La résolution de l'équation 4 donne les expressions de la vitesse de combustion V_r et du diamètre critique de combustion $a_{critique}$, en fonction des pertes, reportés dans le Tableau 2.

Tableau 2. Expression de la vitesse de combustion et du diamètre critique de combustion de matériaux énergétiques

Condition d'environnement	Expression de la vitesse de combustion	Expression du diamètre critique de combustion
Pas de perte dans l'environnement • L=0	$V_r = V_{MAX}$	////////
Pertes convectives (propergol entouré de gaz) • $L = S_s h_s (T - T_a)$ • $L = \frac{4h_s}{a} (T - T_a)$	$V_r = V_{MAX} \left[1 - \frac{4k_p h_s (T_i - T_a)^2}{ah_p^2 (T_f - T_i)^2} \right];$ $h_p = V_{MAX} \rho_p C_p \frac{(T_i - T_a)}{(T_f - T_i)}$	$a_{critique} = \frac{4k_p h_s}{V_{MAX}^2 \rho_p^2 C_p^2}$
Pertes par conduction dans les parois entourant le propergol • $L = S_s k_s \frac{\partial T}{\partial x}$ • $L' = \frac{4k_s}{a} \frac{\partial T}{\partial x}$	On suppose : $\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right _{x=0} = \frac{\partial T}{\partial z}$ $V_r = V_{MAX} \left[1 - \frac{4k_s (T_i - T_a)}{ah_p (T_f - T_i)} \right];$ $h_p = V_{MAX} \rho_p C_p \frac{(T_i - T_a)}{(T_f - T_i)}$	$a_{critique} = \frac{4k_p}{V_{MAX} \rho_p C_p}$

Le paramètre V_{MAX} est obtenu empiriquement en mesurant la vitesse de combustion d'un tube de propergol de diamètre supérieur à 1cm entouré d'un matériau très isolant (conductivité thermique < 0.1W/mK).

La température de flamme (T_f) est estimée en supposant que toute l'énergie de combustion du matériau

(Q) est transmise à la flamme : $T_f = T_i + \frac{Q}{C_{p,g}}$

Le graphe de la figure 14 illustre l'intérêt du modèle. Il montre l'évolution de la vitesse de combustion d'un propergol composite ($Q=3760J/g$; $V_{MAX}=7.5mm/s$) contenu dans un réservoir en verre en supposant que les pertes latérales sont des pertes par conduction dans le verre (matériau de la chambre de combustion). Dans cette configuration, la vitesse de combustion décroît très rapidement avec la section de combustion et la taille critique de combustion est égale à $940 \times 940 \mu m^2$.

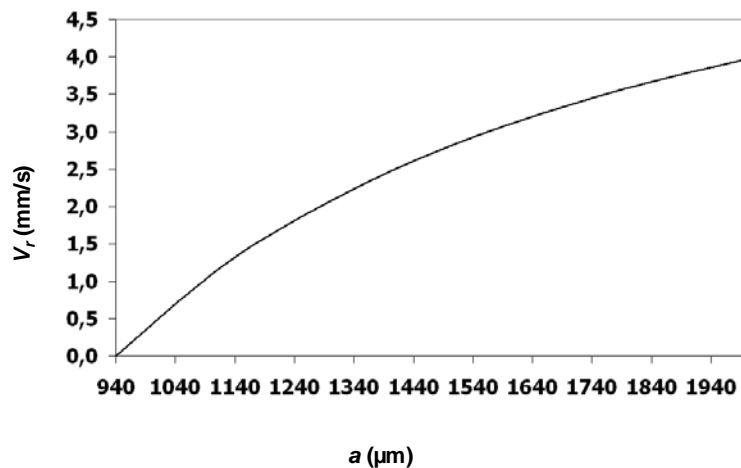


Figure 14. Vitesse de combustion (V_r) en fonction du côté (a) d'un tube de propergol à base de PAG contenu dans un réservoir en verre (pertes thermiques par conduction)

2.4. Les options matériaux énergétiques

On vient de voir que le matériau énergétique conditionne les dimensions critiques de combustion de l'actionneur et donc les choix de conception. Jusqu'en 2002, les équipes travaillant en micropyrotechnie ont exploré deux options : (i) les matériaux « sûrs », peu sensibles de type propergols homogènes ou composites disponibles et (ii) les matériaux de classe 1:1 très sensibles et très énergétiques. Depuis 2002, la tendance est à mettre au point de nouveaux matériaux avec des performances « à la carte » et « compatibles MEMS » : peu sensibles au choc et à la friction mais suffisamment énergétiques pour avoir une combustion aux très faibles dimensions. C'est très certainement le chemin à suivre pour les applications à venir. Considérons ci-dessous, ces différentes options matériau.

2.4.1. Les matériaux sûrs de type propergolique « sur étagère »

Ils présentent une combustion soutenue provenant d'une oxydoréduction lorsqu'une surface a atteint sa température d'initiation (T_i). Ces matériaux ont des vitesses de combustion auto-entretenu relativement faibles de l'ordre de quelques millimètres à quelques centimètres par seconde en phénomène linéaire. Leur utilisation est motivée par trois raisons principales :

- ce sont des matériaux qui sont stables en combustion. La déflagration n'est possible que sous conditions environnementales très particulières (très fort confinement et apport d'énergie important) que les microsystèmes ne peuvent atteindre.

- Le propre de la réaction de combustion des propergols est de dégager une très grande quantité de gaz à haute température ce qui les rend tout particulièrement intéressants pour la propulsion et l'actionnement, applications principales de la micropyrotechnie.
- La variété des propergols « sur étagère » est très importante (propergol homogène, simple base, double base, composite) et l'on peut formuler des matériaux plus ou moins adaptés aux contraintes des applications visées.

Parmi les propergols, les composites (Perchlorate d'Ammonium dans matrice polymère énergétiques (PAG par exemple) ou non (HTPB par exemple) ont un aspect physique visqueux avant réticulation et solide après recuit, ce qui permet d'utiliser une méthode de dépôt et de remplissage de petite cavité par sérigraphie. Des équipes américaines et européennes [2,3,7-9,18,19,21-24,26,35] ont privilégié l'usage de ces matériaux même si les tailles limites de fonctionnement sont au mieux autour de \varnothing 800 μ m-1mm.

2.4.2. Les explosifs ou primaires (matériau classe 1 :1)

Les matériaux de classe 1 :1 de type Styphnate de Plomb sont utilisés [6] pour des systèmes de tailles inférieures au mm³. Ils sont eux susceptibles -si les conditions y sont favorables- à libérer leur énergie potentielle en un temps très court grâce à une réaction chimique très rapide appelée « explosion ». La décomposition dégage un volume gazeux important, une température élevée et une montée brutale en pression. Ce phénomène n'est plus une réaction se propageant par transfert thermique telle que la combustion que nous avons modélisée au §2.3. Il apparaît une onde de pression. En volume réduit, les risques d'explosion sont faibles, si bien que ces matériaux sont tout à fait envisageables pour réaliser des micro actionneurs embarqués extrêmement puissants et extrêmement compacts [16,17,28,30,31,36,37].

2.4.3. Les nouveaux matériaux « compatibles MEMS »

2.4.3.1. Les matériaux macroscopiques aux performances « à la carte »

La première approche a été de formuler des matériaux énergétiques nouveaux « à la carte » à partir de propergol composite⁹ performant en les dopant avec des particules métalliques à très faibles granulométries (10 μ m - \sim μ m) ou en modifiant la proportion carburant/oxydant. Notre équipe a travaillé, pour des applications de micropropulsion spatiale, sur des propergols composites avec liant énergétique (diverses natures) dopés avec des particules de zirconium à granulométrie variable (1 à 90 μ m) [53]. Les matériaux obtenus sont relativement sensibles à l'initiation (entre 10mJ-50mJ) mais

⁹ Particules d'oxydant dans un fuel et entourés d'un liant (énergétique ou non)

les diamètres d'extinction de flamme sont fonction du pourcentage de zirconium et de sa granulométrie. D'autres matériaux très énergétiques comme le ZPP¹⁰ (H=6.3kJ/g) ont été aussi mis en œuvre par le LAAS [52,53] en collaboration avec LACROIX pour réduire l'énergie d'initiation à quelques mJ et aussi car ils conservent un fort pouvoir énergétique même au mm². Ali et al proposent des matériaux nouveaux à base de C₄H₄N₁₂O₃ et C₄H₄N₁₂O₄ qui ont de très bonnes performances propulsives (Isp¹¹ et vitesse de combustion) tout en restant dans la classe des propergols. DiBiasco et al [9] ainsi que Diaz et al [10] dopent les propergols composites avec de l'aluminium ou du manganèse afin d'en augmenter leur vitesse de combustion toujours dans un but d'améliorer leur performances propulsives et leur sensibilité à l'initiation sans en augmenter leur vulnérabilité à l'impact et à la friction. Cette approche de formulation de matériaux nouveaux à partir de principes actifs existants est intéressante pour des systèmes miniatures mais elle présente trois limites :

- les matériaux obtenus ont des diamètres critiques de fonctionnement qui restent supérieurs à 500µm ce qui en limite leur application dans des systèmes très compacts : < mm³.
- les matériaux obtenus sont pour la majorité des composites et ont des performances aléatoires puisqu'ils sont initiés sur des dimensions proches de leur granulométrie.
- les procédés de synthèse reste conventionnels. Il faut donc reporter ces matériaux sur le système fonctionnel par raclage, sérigraphie, pressage...ce qui engendre comme nous l'avons déjà mentionné des problèmes d'interfaçage et de performances.

2.4.3.2. Les matériaux macroscopiques déposables en technologie microélectronique

Les travaux d'une équipe du Sandia National Laboratory [50,51] a permis de faire un pas important dans l'intégration de matériaux énergétiques dans des MEMS, en proposant des matériaux déposables sous forme vapeur et fonctionnant en couche mince tel que le PETN (Pentaerythritoltetranitrate). Ces travaux sont très intéressants car d'abord, ils résolvent les problèmes d'interfaçage matériau énergétique/système d'initiation pour des systèmes miniatures (0.1-1mm²) et ensuite, les technologies micro électronique appliquées à l'élaboration des matériaux énergétiques, apportent des atouts majeurs par rapport aux procédés jusque là mis en œuvre par le LAAS de type sérigraphie. On peut citer :

- un meilleur contrôle et une meilleure qualité de l'interface matériau énergétique et support,
- une structure mésoscopique de meilleure qualité par un meilleur contrôle des propriétés microscopiques,
- une baisse des coûts de fabrication,

¹⁰ Zirconium Perchlorate de Potassium

¹¹ Impulsion spécifique

- et une amélioration des aspects de sécurité en permettant une intégration directe sur le support d'initiation sans manipulation des matériaux énergétiques.

2.4.3.3. Les matériaux nanostructurés pour des performances adaptées aux MEMS

Pour augmenter les niveaux d'intégration (taille $< \text{mm}^2$), une rupture technologique est nécessaire et, peut-être possibles aujourd'hui, grâce aux nanotechnologies qui offrent 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... Cette démarche est illustrée au travers de travaux récents d'équipes américaines [11,27,28,29] qui mettent en œuvre des méthodes d'élaboration de couples oxido/réducteurs du type Al/Fe₂O₃ et NiO/Al nano structurés. Les réactions d'oxydo/réduction de type M¹²₁O (s) /M₂ (s) sont extrêmement exothermiques (jusqu'à 2 fois plus en théorie que les matériaux énergétiques mono moléculaires) et auto catalysée après initiation thermique. Ces travaux sont extrêmement prometteurs et c'est très certainement la route à suivre pour réaliser des actionneurs thermiques et mécaniques embarqués très compacts tout en restant opérationnels. Ce point sera repris dans la partie *Conclusion et perspective*.

2.5. Technologies de fabrication et matériaux de structure

Les technologies d'intégration microsystèmes dérivées de la microélectronique, ont été choisies pour la réalisation de microsystèmes pyrotechniques pour des raisons évidentes de capacité à la miniaturisation, de coûts et de précision d'usinage. Le silicium est le matériau encore aujourd'hui privilégié en microsystème. Cependant en micropyrotechnie son utilisation présente des limites. Sa forte conductivité thermique (140W/mK), qui est un avantage en microélectronique pour évacuer la chaleur, est un inconvénient majeur pour la réalisation de microactionneurs performants nécessitant un confinement de la chaleur. Le silicium sera donc utilisé pour les initiateurs qui intègrent une fonctionnalité électrique. Pour des structures passives comme les réservoirs, d'autres matériaux doivent être envisagés de sorte d'avoir des microsystèmes pyrotechniques performants. Ces matériaux de structures sont évalués sur la base de leurs propriétés thermiques et mécaniques car ils sont soumis à de forts gradients thermiques et à des pressions qui peuvent dépasser 20 Bar. Si l'on veut conserver la compatibilité silicium, les options possibles sont :

- **le verre (Pyrex, quartz, Foturan)** : il présente l'avantage d'avoir une très faible conductivité thermique (1.4W/mK). Il peut être aussi utilisé pour réaliser les initiateurs. Le principal inconvénient de l'utilisation de substrat de verre est la difficulté d'y intégrer des composants électroniques.

¹² M pour Métal

- **La céramique (Alumine, MACOR¹³) : le Macor** qui présente l'avantage par rapport au verre d'avoir un coefficient de dilatation très proche du silicium et donc réduit les risques de rupture mécanique de l'assemblage soumis aux forts gradients thermiques et à la pression. Le MACOR s'usine par voie classique et précisément [4]. **La céramique de type Alumine** a été utilisée par une équipe américaine malgré sa conductivité thermique relativement élevée (30W/mK) [21,22]. Le green-Tape, une céramique souple laminable est proposée pour la réalisation de propulseurs par une équipe sino-américaine [34].
- Très récemment, pour des applications de générateur de gaz en microfluidique des substrats **polymères (SU8, polyimide, PDMS, Sol-gel...)** sont envisagés. Ils ont des conductivités thermiques très intéressantes et sont très bas coûts ce qui leur confère un atout intéressant pour des produits jetables [25,43].

Le Tableau 3 ci-dessous résume les avantages et inconvénients de chacun de ces matériaux et leur possible application en micropyrotechnie. En gras, sont les choix que nous avons faits.

Tableau 3. Bilan des matériaux de structures utilisables en micropyrotechnie (en gras sont les matériaux sur lesquels nous avons travaillé)

	Technologie d'usinage	Applicabilité en micropyrotechnie	Avantages	Inconvénients
Silicium	Techno MEMS usinage 3D et en surface	Fabrication d'initiateurs et réservoirs	Matériau et technologie maîtrisés, compatibles CMOS, température de fusion haute, bonne tenue mécanique	Forte conductivité thermique
Céramique : MACOR , Alumine	Usinage sec (laser) Injection molding Usinage classique	Fabrication réservoirs	Conductivité thermique modeste Bonne tenue mécanique Usinage classique possible (Macor)	Difficulté d'intégrer des composants électroniques pour la commande et l'adressage Coût élevé (Macor)

¹³ Céramique fabriquée par SCERAM (www.sceram.fr)

Verre	Usinage humique en technocompatible MEMS (Foturan) Usinage sec (laser, RIE)	Fabrication réservoirs et initiateurs	Faible conductivité thermique	Point de fusion relativement faible (Pyrex, Foturan) Usinage 3D difficile Difficulté d'intégrer des composants électroniques
Polymère (PDMS, EPDM)	Moulage	Fabrication réservoirs et initiateurs	Très faible conductivité thermique Bas coût	Très faible point de fusion Très faible tenue mécanique

Pour intégrer le matériau énergétique dans le système silicium, les procédés de dépôts et d'injections classiques (raclage, injection...) trouvent leur limite d'application dès que les dimensions du système d'initiation deviennent sous millimétriques:

- les injections ne sont pas de bonne qualité (bulle d'air),
- les dépôts ou collages des films minces ne sont pas maîtrisés au niveau microscopique et engendrent des problèmes (i) d'interfaçage du matériau énergétique avec son système d'initiation, (ii) d'instabilité des performances globales énergétiques, (iii) de reproductibilité et de fiabilité.

Des travaux récents visent à mettre en place des nouvelles technologies de dépôt de matériaux énergétique compatibles avec la microélectronique comme

- la sérigraphie [42,52] développée par le LAAS avec Novatec pour des couches épaisses (>100µm)
- ou la PVD [50,51] qui tente d'apporter une réponse aux problèmes de l'interfaçage pour des couches minces (<100µm).

3. Notre analyse et les perspectives

Depuis son début dans les années 95, la micropyrotechnie a suivi la tendance générale des systèmes : miniaturisation croissante et intégration de plus en plus complexe et hétérogène. On voit bien le rôle de la micropyrotechnie dans le micro actionnement de puissance : on peut chauffer, connecter, déconnecter, bouger des solides, des liquides et des gaz, et même apporter un appoint d'énergie électrique. L'examen de l'état des technologies que nous venons de proposer montre assez clairement que cette technologie nouvelle et les technologies microélectroniques/microsystèmes sont compatibles. Reste les applications qui nécessiteront des intégrations complexes. Notre avis est qu'il faut viser l'intégration de fonctions micropyrotechniques multiples et faire cohabiter ces fonctions avec d'autres fonctions électroniques, mécaniques et chimiques. L'intégration est donc la démarche qu'il convient

d'approfondir et de privilégier dans les prochaines années pour avoir des systèmes puissants embarqués. **L'intégration** multifonctionnelle est donc un point très important.

Le deuxième point qui concerne **la miniaturisation est aussi important**. Initié sur des systèmes millimétriques simples (une couche épaisse de propergol sur membrane $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$), aujourd'hui la micropyrotechnie visent des dimensions inférieure au mm^3 ce qui soulève de nouveaux défis scientifiques et technologiques. Jusqu'au millimètre cube, les propergols ou autres matériaux énergétiques sur étagères tels quels ou dopés par des charges métalliques satisfaisaient plus ou moins bien les besoins et les spécifications. En de-ça du mm^3 , on atteint les limites d'utilisation de ces matériaux et les équipes de recherche s'orientent vers la mise au point et la synthèse de nouveaux matériaux énergétiques couches minces ou nano structurés ayant des performances compatibles avec les besoins des applications. Nous pensons, qu'il faudra l'approfondir pour mettre au point de nouvelles molécules énergétiques compatibles avec les procédés de dépôt microélectroniques dont leur décomposition exothermique peut être contrôlée et ajustée avec la température. Quelques équipes américaines [11,28,29] ont déjà ouvert la voie en proposant des procédés basés sur les nano technologies pour déposer des composés métalliques à base de $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}$ ou NiO/Al en couche atomiques dans le but de réaliser des actionneurs thermiques extrêmement compacts et énergétiques. Ces travaux sont très récents (2003, 2004, 2005) et encore au stade de concept ou théorie, **mais ouvrent des perspectives extrêmement intéressantes pour le nano actionnement embarqué de demain (thermique et pneumatique)**.

L'intégration, la miniaturisation mais aussi la précision de l'actionnement, sont à notre avis les clés de l'émergence de la micropyrotechnie pour les années à venir.

Tous ces points seront repris et approfondis dans la partie « **Conclusions, Perspectives et Programme de travail** ».

PARTIE 2 :

DE L'INTEGRATION COMPOSANT A L'INTEGRATION SYSTEME : EXEMPLES DE NOUVEAUX CONCEPTS DE PYROMEMS

Nous avons vu dans la première partie que la micropyrotechnie est née d'un concept simple et innovant qui visait l'actionnement d'un fluide à partir de la décomposition d'une fine couche de propergol déposée sur un initiateur silicium. Nous avons noté aussi que depuis ses débuts, la micropyrotechnie a évolué et s'est diversifiée dans ses applications, les matériaux et les technologies d'intégration. La synthèse de la micropyrotechnie que nous avons proposée en partie 1, a aussi largement illustré notre contribution à l'émergence de la micropyrotechnie en mettant en place les briques de base théoriques et technologiques pour la réalisation de micro actionneurs embarqués pyrotechniques. Au cours de ces 10 dernières années écoulées, notre équipe a partagé ses efforts de recherche entre :

1. le développement des technologies de base pour intégrer et initier les matériaux énergétiques dans des microsystèmes [1] [5],
2. l'élaboration de modèles de conception et des modèles visant à la compréhension des mécanismes de micro initiation et micro combustion, [5-7] et,
3. la réalisation de démonstrateurs pour des applications allant de l'injection de médicament [46] au micro amorçage [3-4], en passant par la micropropulsion [2] et la génération d'électricité [47].

Les deux premiers points ont été abordés dans la première partie. La deuxième partie de ce mémoire a pour objectif d'illustrer l'apport de la micropyrotechnie à des problématiques d'actionnements de puissances qui nous ont été posées par des industriels. Trois domaines d'application qui ont été les plus moteurs entre 95-2005 seront considérés: l'injection de médicament, la micropropulsion et le micro amorçage sécurisé.

Pour chacun de ces exemples d'application, nous ferons une analyse des besoins de l'application pour introduire les solutions et systèmes que nous avons proposés et mis en œuvre pour y répondre et nous positionnerons notre approche de micro actionnement pyrotechnique par rapport aux options alternatives.

Ensuite, pour chacun des pyroMEMS développés, nous résumerons les principales innovations en termes de concept, d'architecture, développements technologiques, nous donnerons les principaux résultats de modélisation et performances et essaierons d'illustrer au mieux notre démarche basée sur un équilibre permanent entre développements technologiques et modélisation.

Enfin, pour chacun des exemples de réalisation, nous ferons le point en conclusion sur l'apport de la micropyrotechnie dans les domaines d'applications considérés et nous tenterons de dégager les axes porteurs pour l'avenir.

EXEMPLE 1 :

**Les microsystemes d'injection de
médicament micropyrotechniques**

1. Introduction

Longtemps focalisée sur la recherche de molécules actives, dans les années 90 l'industrie pharmaceutique a perçu l'importance de l'instrumentation médicale. La recherche thérapeutique s'est alors fortement appuyée sur les microtechnologies et microsystemes pour imaginer de nouveaux dispositifs médicaux « intelligents » pour le diagnostic, la surveillance et l'injection de médicament. Même si les médias ont mis l'accent sur des secteurs de progrès comme la génétique, les biotechnologies...des avancées très significatives ces dernières années concernent les nouveaux systemes capables de contrôler, d'analyser, de comprendre, de réagir et d'injecter [10-11][24-25][32-33].

En ce qui concerne l'« injection » ou l'« administration de médicament », les microtechnologies ont aider à la mise en oeuvre de nouvelles solutions afin d'augmenter l'efficacité des traitements tout en améliorant le confort et la sécurité du patient. Nous, nous avons exploré **la gestion « intelligente » et automatique de l'injection** en proposant des micro actionneurs et microvalves automatiques et pyrotechniques compatibles avec une électronique de commande. Cette section vise à faire le bilan et l'analyse de l'apport de la micropyrotechnie dans ce domaine au travers de la conception et la réalisation d'un microsysteme d'injection médicament qui a obtenu le prix de l'innovation de la ville de Barcelone en 2004.

2. Expression du besoin et état de l'art

Nous pouvons résumer les besoins exprimés par la communauté médicale en 94-98 pour l'administration de médicament, simplement : **augmenter l'efficacité des traitements en dosant mieux** (endroit et précision) et **réduire le coût des traitements** (automatiser et s'appuyer sur des technologies simples et bas coûts).

Les microsystemes, de part leur petitesse, leur capacité à intégrer de l'intelligence, leur coût réduit ont un rôle très important à jouer dans ce domaine essentiellement à deux niveaux :

1. **au niveau de la stimulation de l'injection par voie transdermique.**
2. **Au niveau de la gestion « intelligente » et automatique de l'injection** afin d'optimiser les traitements et minimiser les effets secondaires voire les erreurs.

C'est sur ce deuxième point que nous avons focalisé nos efforts. De nombreuses équipes ont travaillé sur les micropompes ou dispositifs d'injection implantables [24-25][31-33]. Ce sont des dispositifs performants mais assez complexes qui se heurtent à des difficultés d'implantation « in vivo » et de bio compatibilité.

Le micro dispositif d'injection implantable d'une équipe américaine [28-30][33] a attiré notre attention car il est simple : le médicament est enfermé dans des micro réservoirs de silicium fermés par une membrane fine d'or. Au moment de l'injection, l'or est détruit par électrolyse en appliquant une tension prédéfinie. Le médicament peut alors diffuser dans le corps. Ce système permet un très bon dosage en divisant l'injection en micro injections consécutives permettant de planifier l'injection dans le temps et l'espace. Il utilise un procédé simple sans partie en mouvement pour décapsuler les micro réservoirs.

D'autres équipes ont privilégié les microsystèmes d'injection transdermiques. La voie intradermique conventionnelle par seringue est classiquement utilisée. Elle est efficace et de faible coût. Cependant, cette voie d'injection présente des inconvénients et inconforts bien connus :

- elle est douloureuse,
- elle est vecteur potentiel d'infection,
- elle est mal appropriée pour les très petites doses et des injections continues,
- et nécessite un personnel médical pour la préparation et l'injection.

L'injection par diffusion transdermique est une alternative attractive mais elle est limitée par la très pauvre perméabilité de la peau. Outre la recherche sur les molécules, différentes techniques ont été envisagées pour stimuler la perméabilité de la peau : des stimulateurs chimiques [12], la iontophorèse [13,25], l'électroporation [14], les ultra sons [15]. Ces techniques ont des effets encore insuffisants.

Ainsi de nombreux travaux ont été initiés sur la réalisation de matrices de micro seringues indolores [16,17,18,19,21,22,23,26,27]. Ils illustrent bien l'apport des microtechnologies à l'administration de médicament. Cette approche constitue une voie nouvelle d'administration dans la mesure où les micro aiguilles permettent de créer mécaniquement des microconduits sur la couche superficielle de la peau (stratum corneum : 10-15 μ m) qui est la barrière la plus difficile à passer. Les molécules actives pénètrent ensuite au travers de ces conduits et peuvent ensuite diffuser dans les couches inférieures de la peau. De part leurs faibles dimensions, ces systèmes permettent une réduction efficace de la douleur. Ces nouvelles méthodes d'injection ne trouvent un intérêt que si elles sont associées à des systèmes d'injections miniatures et automatiques.

Parmi ces travaux, celui d'une équipe du BSAC¹⁴ [17] est intéressant car il est tout intégré en silicium: il s'agit d'une micro seringue associée à une micropompe thermopneumatique tout silicium. La réalisation de ce type de système tout silicium présente des difficultés technologiques importantes. Les débits très faibles (1nl/s sous une pression de 3.9kPa) en limitent son application et montrent aussi **la difficulté aux faibles dimensions d'obtenir des niveaux actionnements suffisants pour répondre aux besoins des injections**. La micropyrotechnie peut combler ce vide technologique en proposant

¹⁴ Berkeley Sensors&Actuators Center

des microactionneurs embarqués, puissants et simples. Initiés par courant électrique de faible niveau, les micro actionneurs pyrotechniques peuvent être couplés avec une électronique de commande pour doser automatiquement et produire des systèmes d'injection « intelligents », simples, peu coûteux et jetables. C'est ce que nous allons illustrer. Mais d'abord, revenons sur le concept et technologie de base de l'éjecteur micro fluide et la vanne pyrotechnique tel que nous les avons imaginés et conçus en 1994.

3. Nouveau concept d'actionneur et de microvanne pyrotechnique

L'actionneur pyrotechnique consiste en une plate-forme chauffante sur laquelle est déposé un matériau énergétique qui se décompose en générant des gaz chauds et sous pression. En intégrant un actionneur pyrotechnique avec une membrane élastique ou dans une cavité, il est possible de réaliser deux fonctions fluidiques élémentaires que sont **la micro vanne et l'éjecteur pyrotechnique.**

3.2. L'éjecteur pyrotechnique

La fonction éjecteur est la plus évidente car il s'agit de générer des gaz dans une canalisation dont on veut vider le contenu. L'éjecteur pyrotechnique consiste alors en un actionneur pyrotechnique sur lequel est reportée une membrane élastique (typiquement un silicone) qui sert de barrière:

- chimique en protégeant le liquide des gaz de décomposition,
- thermique, en choisissant le matériau de la membrane, de sorte d'isoler thermiquement le médicament des gaz de décomposition. Les schémas de la Figure 15 illustrent le fonctionnement d'un éjecteur pyrotechnique.

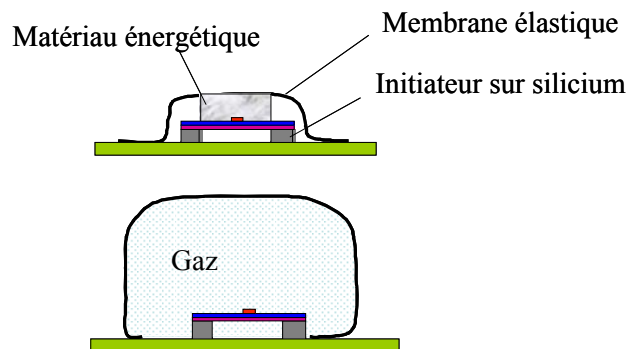


Figure 15. Illustration de la fonction éjecteur pyrotechnique [20]

Par rapport aux autres mécanismes d'actionnement de fluide (thermique, thermo pneumatique, gaz, pneumatique, électrolytique...)[34-40], l'éjecteur pyrotechnique basé sur la décomposition d'un matériau énergétique présente des avantages intéressants :

1. Les matériaux énergétiques sont une source très intéressante d'énergie embarquable bas coût. Typiquement, les pressions d'actionnement obtenues ($P_a = \frac{Fd}{V}$ (J/m³)) sont comprises entre 10⁷-10⁸J/m³, ce qui est bien supérieur aux énergies atteintes par les autres mécanismes d'actionnement. Ainsi, ces matériaux peuvent être déposés en couches très minces (<10µm) tout en gardant une capacité d'actionnement intéressante [41].
2. Le concept est très simple. Il suffit de savoir intégrer ou déposer «in situ» une couche de matériau énergétique à l'endroit où l'on souhaite actionner.
3. Le système est flexible : l'énergie stockée et la pression générée sont fonction du volume de matériau énergétique ce qui permet d'adapter l'actionneur à la fonction recherchée : vanne, éjecteur, pompage....
4. La libération de l'énergie ou la génération de la pression est déclenchée par un courant électrique et donc totalement contrôlable et compatible avec une électronique de commande.
5. L'élimination des réservoirs de gaz pressurisés nécessaires aux actionneurs pneumatiques rend ces actionneurs potentiellement très compacts et totalement intégrés.
6. On peut enfin espérer une grande fiabilité et reproductibilité de fonctionnement en raison de la simplicité des mécanismes d'actionnement mis en jeu.

Le fonctionnement monocoup de ce micro actionneur n'est pas un inconvénient pour les applications visées car les dispositifs sont jetables et les micro injections sont réalisées une fois ou un nombre limité de fois.

3.2.1. Modèle de fonctionnement

D'un point de vue physique, un éjecteur pyrotechnique est caractérisé par son énergie : $P(t) \times V_e(t)$, qui est transférée au liquide pour la vidange. Pour la conception, il est donc important de connaître à tout instant du fonctionnement, cette énergie. Il faut donc connaître la variation dans le temps du volume $V_e(t)$ de l'enceinte ainsi que la variation de pression $P(t)$ des gaz de l'enceinte. L'enceinte est définie par le volume variable limité par la membrane élastique.

Nous avons développé un modèle permettant de calculer $P(t)$ et $V_e(t)$, en fonction des caractéristiques de l'actionneur et de l'enceinte. Plus généralement, ce modèle de fonctionnement permet de prédire l'état dynamique du gaz de décomposition pyrotechnique ($P(t)$, $T(t)$, $m(t)$) en fonction de :

- la forme et la masse initiale de matériau énergétique,
- sa loi de décomposition dans le temps $V_r(t)$,
- la loi de l'enceinte en fonction de la pression $V_e(P)$ donnée par les caractéristiques mécaniques de la membrane.

Pour la modélisation, nous admettons que la vitesse des gaz au sein de la cavité reste modeste si bien que l'on peut considérer que la pression est uniforme dans la cavité. Ceci est valable car la masse initiale du matériau énergétique et la masse d'air contenues dans la cavité sont de même ordre de grandeur. On admet aussi que le volume de la cavité est uniquement fonction de la différence de pression entre cavité et milieu extérieur, l'inertie de la membrane élastique n'est pas prise en compte.

$P(t)$, $T(t)$, $m(t)$ et la courbe donnant l'évolution du volume de l'enceinte en fonction du temps, soit $V_e(t)$ sont obtenues à partir des équations bien connues :

- **Conservation de la masse**

$$m(t + \Delta t) = m_{air}(t_0) + m_{gaz}(t) + \rho_p \times S_c \times V_r \times \Delta t$$

- **Conservation de l'énergie**

$$e(t + \Delta t) = e(t) + \rho_p \times S_c \times \Delta t \times H_c - S_e \times h \times (T - T_a) \times \Delta t - PdV$$

- **Equation d'état**

$$P(t) = m(t) \times R \times T(t)$$

- **Equation de l'enceinte**

$V_e(P)$: courbe expérimentale ou théorique

Avec :

m_{gaz}	masse de gaz produit par la décomposition du matériau énergétique
m_{air}	masse d'air présente dans la chambre de combustion à t initial
m	masse de gaz dans la chambre de combustion
V	volume de gaz produit par la décomposition du matériau énergétique
P	pression dans la chambre de combustion
T	température dans la chambre de combustion
ρ_p	densité du propergol
V_r	vitesse de combustion
S_c	surface de combustion
e	énergie du gaz de combustion

H_c	enthalpie de combustion
h	coefficient de convection
S_e	surface d'échange entre le gaz et la chambre de combustion
T_a	température ambiante
R	constante des gaz parfait

La résolution de ces équations (en Fortran) a permis d'obtenir un outil de conception (μ ACTIONNEUR_UNIT) pour les éjecteurs microfluidiques pyrotechniques : il permet de choisir et d'adapter les caractéristiques de l'éjecteur (masse de matériau énergétique et choix de la membrane) en fonction de l'actionnement recherché.

3.3. La microvanne pyrotechnique

Une micro vanne consiste en un micro actionneur pyrotechnique positionné dans une canalisation de telle sorte qu'il l'obture de façon étanche. Ensuite, la décomposition du matériau énergétique désobture la canalisation en brisant la membrane diélectrique. La Figure 16 (1) illustre la fonction de microvanne, telle que nous l'avons conçue et brevetée [42,43] et la Figure 16 (2) donne une version différente avec filtre à particules de la microvanne.

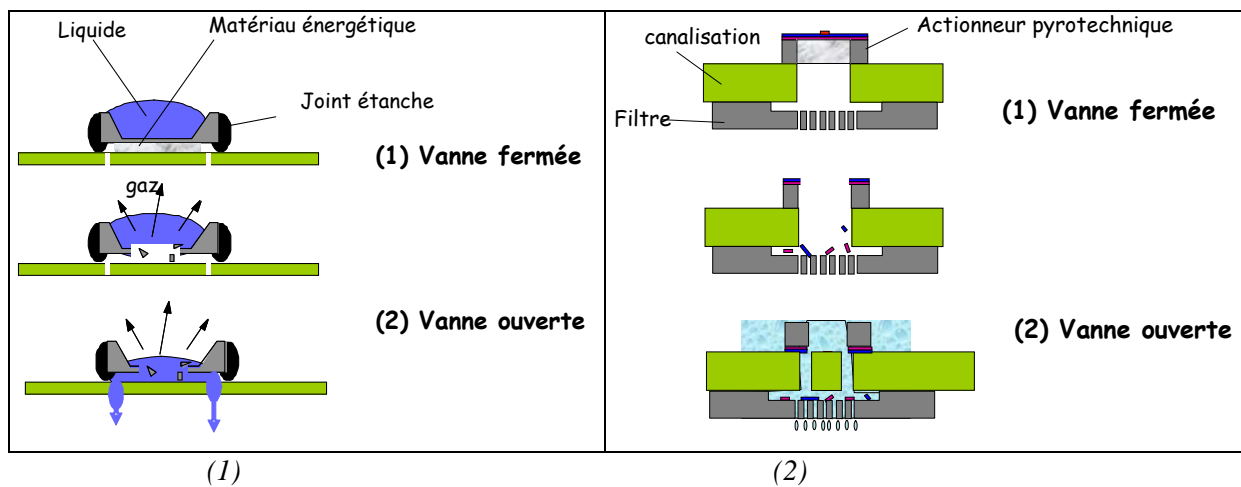


Figure 16. Illustration de la fonction de micro vanne intégrée dans une canalisation ((1) sans et (2) avec micro filtre à particules)

Comme l'éjecteur micro fluidique, ce composant est mono coup et présente des avantages très intéressants:

1. Avant actionnement, la vanne est totalement hermétique : aucunes fuites sont possibles.
2. Le concept est très simple et son fonctionnement fiable. Il suffit de savoir intégrer ou déposer «in situ » une couche de matériau énergétique et une résistance sur une membrane dimensionnée pour casser à quelques bars.

3. L'actionnement de la vanne est déclenchée par un courant électrique et donc totalement contrôlable et compatible avec une électronique de commande. Sa puissance de fonctionnement est faible : 50mW et 250mW en fonction des matériaux utilisés.
4. Il n'y a pas de pièces en mouvement et donc pas de problème de collage dû aux forces de frottement.

4. Application à l'injection de médicament

Associées, ces deux fonctions (microvannes et micro éjecteur) permettent la réalisation de systèmes d'injection intégrés autonomes et compatibles avec une électronique de commande pour ajouter de « l'intelligence ». Le concept de base d'un tel système et son principe de fonctionnement sont illustrés sur la Figure 17.

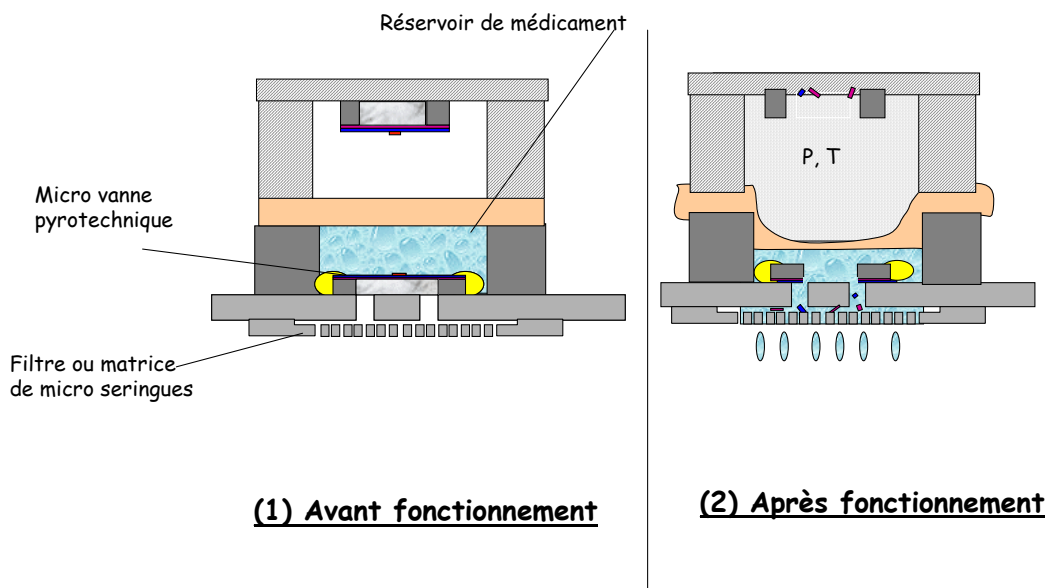


Figure 17. Schéma d'un microsystème d'injection pyrotechnique conçu à partir de micro actionneurs pyrotechniques

Il comprend trois niveaux :

- Le niveau 1 est l'éjecteur pyrotechnique : actionneur pyrotechnique dans une enceinte fermée par une membrane élastique. La membrane élastique peut être remplacée par un piston mobile.
- Le niveau 2 est le réservoir de médicament,
- Le niveau 3 est le vecteur d'injection : soit une ou plusieurs micro vanes (pyrotechniques) [44], soit une matrice de microseringues [20], soit une buse [45].

Pour la démonstration du principe, nous avons utilisé une matrice de microseringues.

Ce microsysteme d'injection pyrotechnique est basé sur un concept simple : lorsque l'injection est programmée, un courant électrique (qqe mA) déclenche la décomposition du matériau énergétique qui génère alors une surpression sur la membrane élastique. La surpression est ensuite transmise au médicament pour l'injection au travers des microconduits.

Il présente des atouts forts intéressants pour l'application visée :

1. Le rendement d'actionnement (pression générée/puissance d'actionnement) est des plus intéressants: avec seulement 150mW, on peut générer 10MPa. L'énergie électrique à embarquer est donc faible et compatible avec des systèmes autonomes et miniatures.
2. Le déclenchement de l'injection peut être couplé à la réponse d'un capteur via une électronique ou à un système de programmation pour obtenir un système autonome et « intelligent ».
3. La mise en œuvre est extrêmement simple et peut être très bas coût si l'on utilise des matériaux de structure adaptés (polymères) si bien que cette technologie adresse avantageusement les systèmes jetables recherchés dans certain protocole pour limiter les contagions. Cependant une intégration tout silicium est aussi possible.

Ces points nous amènent à penser que notre concept apporte une réponse particulièrement bien adaptée pour les micro dispositifs d'injection jetables, miniatures, bas coûts et automatique et représente une solution complémentaire à celles proposées par la communauté scientifique et présentées dans l'état de l'art du paragraphe §2.

4.2. Exemple de microsysteme d'injection de médicament pyrotechnique - DRIP¹⁵

Nous proposons dans cette partie d'illustrer notre contribution à l'administration de médicament au travers d'un exemple de système d'injection miniature intégrable sur matrice de microseringues développé pour des applications spatiales¹⁶. Ce travail a été réalisé en collaboration avec l'université

¹⁵ DRug Injection Pyrotechnically device

¹⁶ Contrat ESA 15780/00/NL/JD

de Barcelone et a reçu le Prix de l'innovation de la ville de Barcelone en 2004. Le système appelé DRIP est basé sur le concept illustré sur la Figure 17.

4.2.1. Eléments de design et modèle de conception

Le design, l'architecture et les choix technologiques pour la conception du microsysteme d'injection DRIP a hérité de notre expérience et des acquis issus des développements antérieurs dans le domaine de l'injection de médicament par actionnement pyrotechnique avec notamment :

- (i) le développement d'un microsysteme de réhydratation d'un patch transdermique qui a fait l'objet de ma thèse de doctorat [44],
- (ii) et notre participation à la conception d'une seringue sans aiguille [45] aujourd'hui commercialisée par Cross Site Technology (produit Crossject®).

Outre l'intégration technologique et l'assemblage souvent hétérogène, une problématique importante pour le prototypage d'un tel système est la mise en place d'un modèle de fonctionnement global permettant de prédire les paramètres d'éjection du fluide en fonction des caractéristiques du système et de l'actionneur.

Pour cela, des modèles ont été élaborés de sorte de :

- prédire la montée en pression dans la chambre de combustion en fonction du matériau énergétique utilisé, de sa masse et de la membrane élastique,
- la température atteinte dans la chambre de combustion de sorte d'adapter l'épaisseur et la nature de la membrane élastique pour protéger la solution médicamenteuse,
- de dimensionner la taille et le nombre des micro seringues ou la buse, en fonction du liquide à injecter et en fonction du type et débit spécifiés.

Les hypothèses de calculs sont pour partie les mêmes que celles de l'éjecteur pyrotechnique décrite dans le § 3.2.1: la combustion du matériau énergétique s'effectue dans une enceinte fermée de volume variable. La vitesse des gaz au sein de la cavité est faible si bien que l'on peut considérer que la pression est uniforme dans la cavité. On admet aussi que la pression de la chambre de combustion est fonction du volume accessible par les gaz de combustion qui est lui même fonction du débit du liquide. Le modèle de Poiseuille s'appliquant pour calculer les débits d'écoulements en régime laminaire à travers deux plans parallèles et lisses, nous avons calculé le débit du liquide sortant à partir de la loi de Poiseuille donnée plus loin. L'inertie de l'enveloppe (membrane élastique dans notre cas) est négligée.

Les équations qui décrivent le fonctionnement du système d'injection sont alors les suivantes [8]:

- **Conservation de la masse**

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \rho_p V_r S_c$$

▪ **Conservation de l'énergie**

$$\frac{\partial e}{\partial t} = \rho_p V_r S_c H_c - P \frac{\partial V}{\partial t} - h S_e (T - T_a)$$

▪ **Equation du gaz supposé parfait**

Le gaz généré par la décomposition du matériau énergétique est bien en dessous de ses conditions de saturation, si bien que l'on peut le considérer parfait. L'énergie s'écrit alors :

$$e = \frac{PV}{\gamma - 1}$$

avec γ , coefficient isentropique du mélange (gaz de combustion + air)

▪ **Débit du liquide suivant le Modèle de Poiseuille**

La loi de Poiseuille donne le débit d'un fluide en régime laminaire (surfaces lisses) circulant dans une micro canalisation (plans parallèles) dont la section est bien plus petite que la longueur.

$$q_{poiseuille}(t) = \frac{\pi d^4}{128 \mu \times l} (P_{liq} - P_a)$$

avec :

μ viscosité du liquide

d et l diamètre et longueur de la canalisation

P_{liq} pression du liquide que l'on suppose égale à P (transmission totale de la pression de la chambre de combustion au liquide)

P_a Pression atmosphérique

Le débit du liquide sortant est relié à la variation de volume du liquide dans le réservoir par la relation suivante :

$$q_{poiseuille}(t) = \frac{\partial V_{liq}}{\partial t} + \frac{V_{liq}}{\beta} \frac{\partial P_{liq}}{\partial t}$$

β est le coefficient de compressibilité du fluide estimé à 1000Bar à partir des caractéristiques dimensionnelles de nos systèmes.

Ces équations ont été résolues sous Matlab SIMULINK et le concepteur rentre :

- Les caractéristiques géométriques du système : surface de la seringue, hauteur de la chambre de combustion et hauteur du réservoir de liquide.
- Les caractéristiques géométriques du propergol : surface et longueur.

- Les caractéristiques géométriques des microseringues : diamètre intérieur, longueur et nombre.
- Les caractéristiques intrinsèques du propergol et du liquide, tel que la chaleur de combustion, la vitesse de décomposition, la viscosité du liquide....

L'utilisateur a ensuite accès à une fenêtre comme l'illustre la Figure 18 donnant l'évolution en fonction du temps :

- De la pression d'actionnement (pression dans la chambre de combustion).
- De la température dans la chambre de combustion.
- Du volume du liquide dans le réservoir.

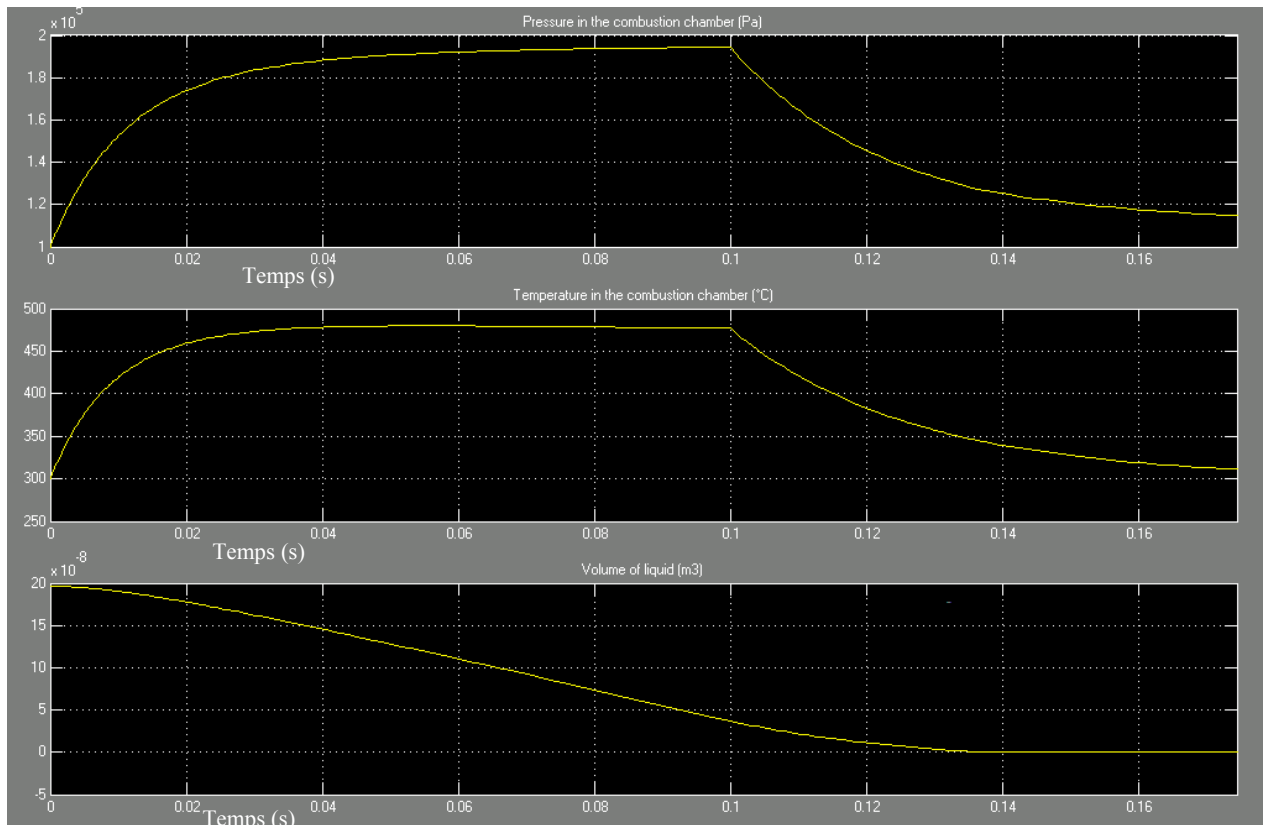


Figure 18. Exemple de résultats : évolution de la pression, température dans la chambre de combustion et volume de liquide en fonction du temps

A partir de cet outil de modélisation, nous avons dimensionné notre micro système d'injection -par des allers-retours entre paramètres d'entrées et résultats- pour viser des débits et temps d'injection équivalents à ceux d'une seringue manuelle. L'encombrement du système a été choisi de sorte d'y intégrer des capteurs de pression et température pour valider le concept et les modèles présentés dans le paragraphe précédent.

4.2.2. Fabrication et test d'un démonstrateur DRIP

Le système fabriqué a une forme cylindrique et un volume total de 6cm^3 ; les volumes de chambre de combustion et liquide sont respectivement de 3.14cm^3 et 2cm^3 .

Le démonstrateur ainsi fabriqué et instrumenté est illustré sur la Figure 19. L'assemblage est hybride : le corps du système est en plastique, la membrane est en silicone ; les technologies silicium sont utilisées pour la réalisation de plates-formes chauffantes sur membrane $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$.

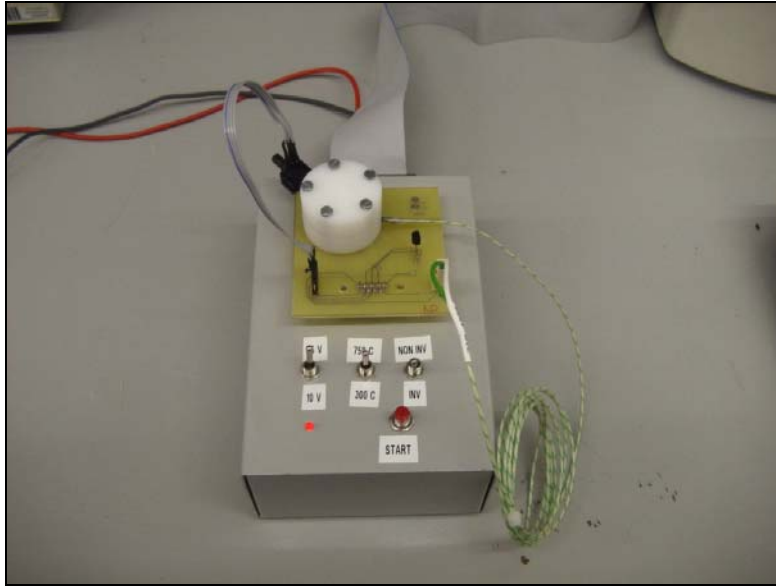


Figure 19. Photo du démonstrateur fabriqué (en blanc) et assemblé sur son boîtier de commande et de mesure

En prenant les caractéristiques d'un propergol de type composite de type PAG/PA, les prévisions de fonctionnement sont les suivantes :

- Durée de combustion : 190ms
- Durée de vidange : 200ms
- Vitesse maximale du liquide : 9,5m/s
- Pression maximale : 140kPa
- Température maximale : 42°C

Bien que nous ne donnions dans ce mémoire que les conclusions, plusieurs expérimentations ont été effectuées et les résultats et analyses sont rapportés dans le document consultable [9] :

La différence entre pression prédite et mesurée est comprise entre 20 et 47%, essentiellement due au fait que l'on ne connaît pas la loi de combustion du propergol en fonction de la pression. Nous avons utilisé une loi « générale » trouvée dans la littérature (aPn) [46] mais qui n'est –au vu des résultats-

pas bien adaptée au propergol utilisé dans le démonstrateur. Bien sûr cette incertitude sur la loi de la vitesse affecte aussi la température (erreur ~10% entre prédiction et expérimentation) et les paramètres d'injection du liquide. Les divergences trouvées sur le paramètre température sont aussi liées à l'incertitude sur la valeur du coefficient de convection (entre gaz de décomposition et paroi réservoir) qui est estimé et non évalué avec certitude. Par ajustement des paramètres à partir des expérimentations, notre modèle a été ensuite validé sur différents volumes de liquide à injecter.

4.2.3. Quelques conclusions

Le microsystème d'injection pyrotechnique DRIP fabriqué a un volume $> \text{cm}^3$. Ces choix de conception avaient pour objectifs de valider notre concept et nos modèles de fonctionnement, et il est tout fait possible de réaliser un système d'encombrement très réduit $< \text{mm}^3$ basé sur les mêmes principes. Les différences initiales obtenues entre modélisation et caractérisation montrent la difficulté de maîtriser tous les paramètres de conception et en particulier : les caractéristiques du matériau énergétique et sa loi de décomposition aux faibles dimensions, ainsi que les coefficients d'échange thermique. Au travers de projet, notre contribution a été tout d'abord de démontrer le principe et la faisabilité de l'injection de médicament pyrotechnique, et ensuite de mettre en place les outils de conception et les technologies de fabrication de ces systèmes d'injection pour des applications diverses. Il faut rappeler que ce travail initié en 2003 est basé sur un concept simple qui répond particulièrement à un besoin de micro dispositifs d'injection jetables, miniatures, bas coûts et automatique. Ce travail était tout à fait innovant et original et il a d'ailleurs reçu le prix de l'innovation de Barcelone en 2004.

5. Conclusions et perspectives

Pour les applications d'injection de médicament simples, jetables, mono utilisation, l'actionnement pyrotechnique présente des atouts forts intéressants que nous avons déjà mentionnés mais qu'il est important de rappeler :

- sa mise en œuvre est extrêmement simple : une masse de matériau pyrotechnique est déposée sur une résistance chauffante intégrée sur silicium,
- Elle permet la fabrication de micro actionneurs pyrotechniques (Figure 15) miniatures, et puissants capables de générer des pressions comprises entre 1 et 10Bars pour pousser le médicament avec des débits pouvant atteindre quelques mm^3/s .
- Elle permet aussi de réaliser des microvannes monocoups en brisant une membrane fine par les gaz de décomposition (cf Figure 16).
- Les actionneurs ou éjecteurs pyrotechniques et les systèmes d'injection qui sont conçus à partir d'actionneurs pyrotechniques peuvent être intégrés tout silicium ou en technologie hybride permettant d'adapter les coûts de fabrication aux applications.

- Et enfin, la micropyrotechnie propose des actionneurs et vannes pyrotechniques commandables par une électronique classique peu encombrante car il sont initiés par effet Joule avec une tension de 5V et un courant compris entre 30mA et 50mA.

Si l'on essaie de tirer un bilan de cette activité au LAAS et à l'extérieur, nous pouvons être satisfait de la contribution de la micropyrotechnie à l'injection de médicament. Notre objectif – apporter une réponse à l'injection automatique- nous semble atteint au moins pour l'injection transdermique. Un système Crossject®, issu directement des travaux du LAAS, est commercialisé. Crossject®¹⁷ est une seringue sans aiguille qui sous l'action d'un générateur de gaz pyrotechnique injecte un médicament liquide au travers de la peau à grande vitesse et au travers de très petites tuyères de sorte d'avoir des jets très fins. L'injection est très rapide ($\sim 0.1s - 0.5s$).



Figure 20. Schéma de la seringue sans aiguille à générateur de gaz pyrotechnique industrialisée par cross site technology

Même si cette réussite nous conforte dans nos choix initiaux, des verrous technologiques restent encore à lever : aujourd'hui limité à l'injection mono dose, des travaux complémentaires notamment sur les matériaux énergétiques et aussi sur les choix d'architecture des actionneurs sont nécessaires, si l'on souhaite des actionnements fins et mieux contrôlés. Des matrices de micro actionneurs pyrotechniques de masses très faibles permettraient par exemple d'avoir des injections proportionnelles et programmables avec beaucoup de précision. Ou bien des matériaux à décomposition contrôlée en température pourraient aussi apporter une amélioration dans la précision du dosage. Nous pensons que c'est un domaine qui peut encore progresser et mûrir mais qu'il ne pourra avancer qu'en travaillant en étroite collaboration entre technologues, chimistes et bien sûr « end users ». En perspective, l'évolution déjà en cours est le mariage très probable de cette discipline avec le microfluidique pour des applications biologiques et pour la réalisation de microsystèmes de diagnostic et d'injection miniatures embarqués. Ce point sera approfondi dans la conclusion générale.

¹⁷ info@crossject.com

EXEMPLE 2 :

**La micropropulsion pyrotechnique
intégrée sur silicium**

1. Introduction

La tendance à la miniaturisation amorcée dans les réflexions dès les années 90, essentiellement aux USA [2,3] se confirme dans les faits et suit plus ou moins les prédictions: les *microsatellites* sont aujourd'hui une réalité [1] et demain les clusters de *nanosatellites* (<20kg) et les *picosatellites* (<1kg) viendront compléter la gamme et ouvriront à de nouvelles missions. *Micro, nano* ou bientôt *pico*, ces petites embarcations auront besoin de forces très petites et très précises pour assurer leur positionnement relatif, les manœuvres orbitales, le maintien à poste et leur désorbitation. C'est ainsi que dès les années 90, des équipes américaines et européennes ont développé des microsystèmes de propulsion s'orientant essentiellement vers des options de propulsions électriques (μ FEEP, μ PPT) et gaz froids. En 1997, nous avons proposé la micropropulsion à propergol solide sur silicium car elle nous est apparue répondre avantageusement aux critères exigés par la petitesse des satellites (faible consommation, bas coût) et à ceux issus de l'application (fiabilité, simplicité technologique).

Depuis plus récemment, les *mini et micro drones* (poids compris entre quelques centaines de grammes et quelques kilogrammes) forment une technologie de l'aéronautique en plein essor. Outils d'avenir et tirant parti des progrès de l'électronique et des technologies microsystèmes, ils ouvrent de nouveaux horizons dans le domaine de la surveillance scientifique et militaire. Les *mini et micro drones* auront, tout comme les petits satellites, besoin de petits propulseurs pour assurer leur stabilisation en roulis, tangage et lacet. Le mode de propulsion dépend du type de vol (dynamique et stabilisé et de la mission (durée, ..) mais doré et déjà deux options sont privilégiées : la propulsion électrique, thermique. Pour certaines manœuvres et sous certaines conditions (fort vent par exemple), notre option de propulsion sur silicium à propergol solide peut compléter avantageusement, de part ses atouts cités ci-dessus, les systèmes électriques.

Pour la propulsion de petits satellites ou la stabilisation de drones, entre 1997 et 2005, la micropropulsion à propergol solide sur silicium a été un domaine de recherche très dynamique dans le monde avec plus de 20 publications internationales dans le domaine [17-22 ; 30-40 ; 42-45]. Bien sûr notre équipe, à l'origine du concept, a fortement participé à cette dynamique, tout d'abord par un séjour post-doctoral au BSAC¹⁸, point de départ de cette technologie aux USA [44] et ensuite en Europe puisque nous avons coordonné un projet Européen sur le sujet.

¹⁸ Berkeley Sensors and Actuators Center, University of Berkeley, California, USA

Dans cette section, nous allons faire le bilan de l'apport de la micropropulsion sur silicium pour la propulsion de petits satellites et petits drones ainsi que la synthèse de notre contribution à cette technologie. Elle est divisée en trois parties principales :

- Tout d'abord, un bilan des besoins en micro propulsion donnera au lecteur des repères et des niveaux de spécification.
- Ensuite, l'état de l'art des microsystèmes de propulsion développés depuis 90 permettra d'introduire et de positionner notre option de « micropropulsion à propergol sur silicium » parmi la compétition internationale.
- Nous présenterons ensuite nos développements en particulier : les efforts de modélisation pour la mise en place d'outils de conception de micropropulseurs à propergol solide et les développements technologiques au travers des principales réalisations et innovations.

En guise de conclusion, nous donnerons rapidement les perspectives de la micropropulsion à propergol sur silicium pour les deux applications spatial et militaire.

2. Les besoins en micropropulsion

Les besoins pour les petits satellites et les petits drones étant très différents, nous avons par soucis de clarté dissocié les deux applications.

2.2. Pour le spatial

Pour le spatial, les besoins en propulsion sont communément exprimés en terme de ΔV qui correspond à l'incrément de vitesse à réaliser avec les propulseurs pour compenser une perturbation ou réaliser une manœuvre. Le ΔV est bien sûr relié à la force (F) générée par le propulseur pendant le temps (t) par la relation suivante : $\int Fdt = Msat \times \Delta V$ où $Msat$ est la masse de satellite.

La détermination précise des besoins en terme de ΔV ou de poussée et d'impulsion ($\int Fdt$) pour maintenir à poste un satellite ou pour contrôler son attitude dépend de sa masse, de son volume, de sa forme géométrique, et des spécifications de la mission (altitude, orbite, inclinaison, précision requise...). Les impulsions se situent entre 10^{-6} N.s et 10N.s pour réaliser des ΔV compris entre 0.001mm/s (contrôle d'attitude fin) et 10-100m/s (opération sur orbite basse - désorbitation) et pour des satellites de masses comprises entre 1kg et 100kg.

Une étude ESA que nous avons menée sur l'évaluation des besoins en micropropulsion pour assurer le maintien à poste de micro et nano satellites évoluant sur des orbites basses, a permis de déterminer précisément les ΔV pour les manœuvres de type maintien à poste de satellite de poids 1 à 100kg opérant entre 400km et 1000km. Les ΔV annuels ainsi calculés sont compris entre quelques mm/s et 40m/s. Les ΔV instantanés, en fonction de la précision requise, sont typiquement entre quelques 10^{-3} mm/s et quelques mm/s [45].

Le contrôle fin d'attitude pour des missions d'interférométrie peut nécessiter des forces de l'ordre du μN et des impulsions minimales de 10^{-6}N.s .

2.3. Pour la stabilisation des petits drones

Pour les micro drones, le mode de propulsion dépend bien sûr du type de vol à savoir dynamique ou stabilisé et de la mission (durée, objectif..). Mais de façon générale, le système de propulsion principal sera un moteur électrique car il est silencieux et permet une commande continue et ajustable. En vol stabilisé (vitesse inférieure à 50km/h), les micro et mini drones auront besoin de forces petites et moyennes pour assurer leur stabilisation en roulis, tangage et lacet. Par exemple, sous forts coups de vent, les premières estimations de forces nécessaires à stabiliser le roulis montrent que les volets aérodynamiques ne suffiront pas et devront être complétés par des micro propulseurs. Une étude DGA que nous avons menée en collaboration avec PROTAC, montre qu'il faut des couples compris entre 0.5mN et 100mN pour assurer la stabilisation des drones miniatures (1.5kg, envergure : 50cm) sous rafale de vent de vitesse comprise entre 2 et 8m/s. Pour ce même drone, les temps de réaction doivent être inférieurs à 100ms [54].

2.4. Les contraintes « *micro* » et résumé

Les spécifications techniques (ΔV ou F) sont à compléter par des exigences en terme de faible consommation électrique, masse et encombrement réduit... liées au fait qu'il s'agit de petites systèmes embarqués et donc autonomes. Ces contraintes dites liées à l'application, sont très importantes lors du choix d'une option de propulsion par rapport à une autre et seront d'ailleurs parmi les critères d'analyse de la potentialité des technologies de propulsion discutées au §3. Le Tableau 4 résume les besoins en micropropulsion pour les deux domaines d'application considérés et rappelle les contraintes liées à l'application.

Tableau 4. Résumé des besoins en micropropulsion pour le spatial et le militaire

Domaine d'application	Spécifications techniques	Contraintes liées à l'application
Micro/nano satellites (Système de Contrôle d'Attitude et d'Orbite)	<ul style="list-style-type: none"> ◆ $0.001\text{mm/s} < \Delta V < \text{quelques } 10\text{aines m/s}$ [45] ◆ $10^{-6} \text{ N.s} < I_{\text{min}} < 10^{-3} \text{ N.s}$ ◆ $1\mu\text{N} < F < 20\text{mN}$ 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Masse et volume minimum ◆ Puissance de fonctionnement minimum ($P_{\text{dispo}} < 0.5\text{-}1\text{W/kg}$) ◆ Niveau de tension $< 5\text{V}$ pour avoir une électronique peu encombrante.
Micro/mini drones (stabilisation roulis, tangage, lacet)	<ul style="list-style-type: none"> ◆ $0.5\text{mN} < F < 100\text{mN}$ [54] ◆ Impulsion $\sim 10\text{-}3 \text{ N.s}$ 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Masse et volume minimum ◆ Puissance de fonctionnement minimum ◆ Niveau de tension $< 5\text{V}$ pour avoir une électronique peu encombrante. ◆ Système silencieux

$1\mu\text{N}$ - 20mN pour le contrôle d'attitude et d'orbite des petits satellites et jusqu'à 100mN pour la stabilisation de petits drones : les systèmes de propulsion conventionnels ne satisfont pas ces niveaux de poussée. Il a donc fallu mettre en oeuvre des solutions technologiques pour les miniaturiser ou pour imaginer de nouveaux systèmes de micropropulsion. Plusieurs options de propulsion et différentes démarches de miniaturisation ont été suivies par les équipes internationales. En voici l'état de l'art depuis les années 90.

3. Etat de l'art des options développées

Le développement de nouveaux systèmes de micropropulsion à partir des technologies microsystèmes ou en miniaturisant les systèmes actuels est une compétition internationale (Europe et USA principalement) depuis les années 90 [4-39][41-44] essentiellement pour des applications spatiales. Etant donné la grande quantité de systèmes développés, nous nous limiterons dans ce mémoire à donner les principales performances de chacune de ces options sans les détailler (cf. Tableau 5). Néanmoins, le lecteur intéressé peut se rapporter à la référence [55] dans laquelle il trouvera une description plus détaillée de tous les systèmes de micropropulsion ainsi que leurs caractéristiques respectives.

Tableau 5. Caractéristiques principales des différentes options de micropropulsion trouvées dans la littérature

Option ↓	Ergol	Isp ¹⁹ (s)	Imax	Poussée maximale (mN)	Rendement (mN/W)	Durée poussée	Imin	Précision (μN)
Colloid	Xe (s)	500	–	20μN	0.1	Long		
Hall	Xe (s)	1600	–	80	0.06	Long		
FEFP	Cs (s)	10000		5	0.01	Long		0.1
μFEFP	Cs (s)	10000	600Ns	0.05 nominal 0.1	0.01	Long	<5n Ns	0.1
μPPT	Te (s)	500- 1000	40μNs- 2mNs	0.15	0.007-0.030			
Gaz froid	N ₂ (g)	65	0.1mNs	0.2-1.5 (10mN visé))	2	long		
Resisto jet (FMMR)	C ₂ H ₄ N ₆ O ₂ (G) Ar (g)	244 45		3μN- 0.25mN	0.05			
Resisto jet Eau	L	<100	0.1-1Ns	32μN – 150μN	0.03-0.05			
Propergol liquide	Hydrazine (l)		2-4Ns	10- 200mN			0.17mNs	
Ergol Liquide	H ₂ O ₂ (l)	200						
Propergol solide	Composite	60-100	0.1mN- 1mNs	0.1 - 50mN	100	moyen	10μN.s	0.1mN
Explosif	Primaire		0.1mNs	0.1mN	0.05		50μNs	
Bi- propergol	O ₂ (g), CH ₄ (g)	300 (prévu)	30mNs	15N	8000			

¹⁹ $I_{sp} = \frac{F}{g_0 \dot{m}}$

Pour aider à comparer les différents systèmes de micropropulsion en terme d'applicabilité et pour faciliter la lecture du Tableau 5, nous les avons placé dans un diagramme 2D (cf. Figure 21) : sur l'axe des abscisses est reporté le niveau de poussée accessible par chacun des systèmes et sur l'axe des ordonnées est reportée l'impulsion totale de ces mêmes systèmes.

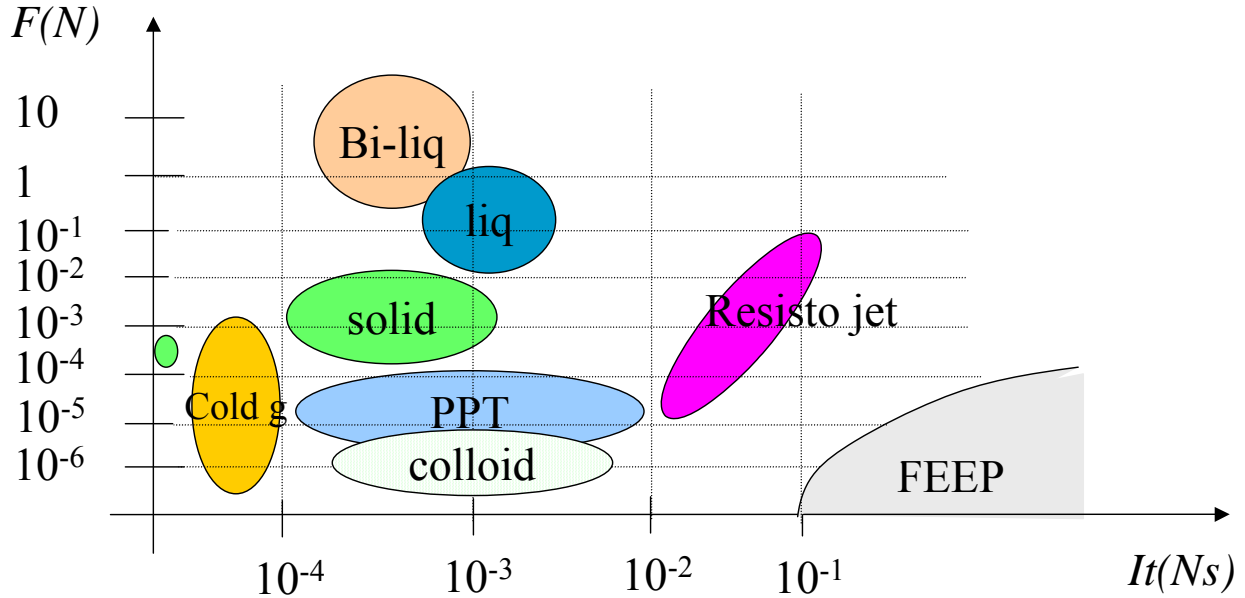


Figure 21. Performances actuelles (2005) des systèmes de propulsion en terme de ΔV et impulsion total [49,55]

Un système correspondant aux fortes poussées (haut du diagramme) sera mieux adapté à la réalisation de manœuvres orbitales et au maintien à poste. A l'inverse, les systèmes délivrant de faibles poussées (bas du diagramme) sont plutôt mieux adaptés à des manœuvres fines comme le contrôle d'attitude.

Outre ses performances (Poussée, Isp...), la potentialité d'un système de micropropulsion est déterminée aussi à partir de certains critères qui sont valables quelque soit la mission et qui sont :

- Les performances en termes de poussée, impulsion totale et impulsion minimale qui permettent de cibler l'application : propulsion primaire, secondaire ou ACS²⁰.
- L'Isp qui donne l'image de l'efficacité du propulseur.
- La robustesse et la fiabilité du système : les risques de défaillance doivent être évalués et minimisés sur toute la durée de la mission. La complexité technologique doit donc être maîtrisée.
- Le poids et le volume : cela dépend des contraintes du satellite mais de façon générale le plus petit est le mieux.
- Le coût : le moins cher possible est la règle.
- La puissance de fonctionnement devient en micro et nanosatellite une contrainte importante puisque la puissance disponible sera faible.

²⁰ Attitude Control System

Ce dernier point est de grande importance pour les micro et nano satellites et les micro drones car ces derniers ne pourront pas embarquer plus de 1 à 5 W/kg [3,4]. Ainsi nous avons choisi de classer chacun des systèmes de propulsion caractérisés en fonction de leur puissance spécifique (rapport de la force générée sur la puissance d'alimentation) (cf. Figure 22).

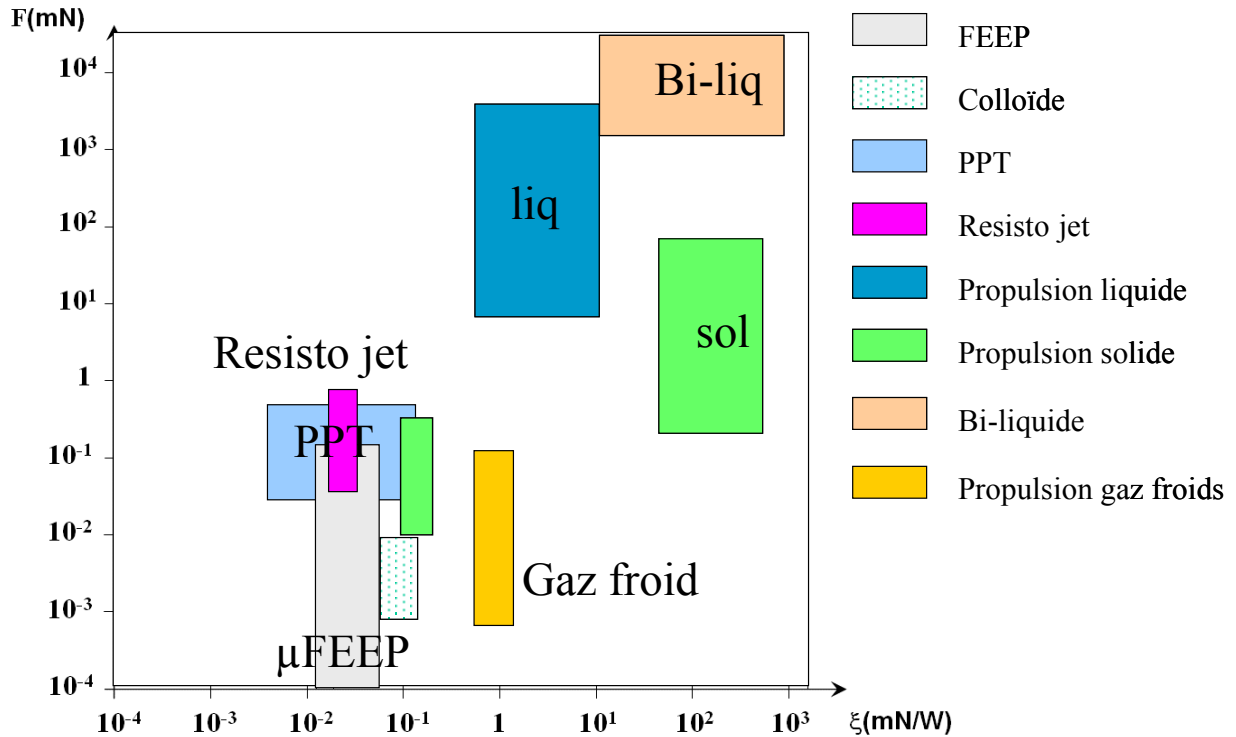


Figure 22. Poussée obtenue et efficacité des différentes options de micropropulsion

Une analyse rapide de la Figure 22 consisterait à penser que les systèmes situés en dessous de 0.1mN/W ne sont pas satisfaisants, mais notre position est plus nuancée car d'autres critères -comme la fiabilité ou le niveau de maturation technologique (TRL²¹)- sont tout aussi importants. De plus les micropropulseurs en technologie microsysteme sont toujours en développement et nous attachons la plus grande importance à des approches telles que les propulseurs μFEEP et à éjection de gouttes chargées ou encore les résistojets qui semblent incontournables pour les manœuvres de précision, même si ils ont des puissances spécifiques très moyennes.

Parmi les options aujourd'hui disponibles au moins en laboratoire, la micropropulsion à propergol sur silicium représente une option extrêmement intéressante car elle est très simple technologiquement (pas de pièce en mouvement, pas de circulation de fluide), elle présente des Isp moyennes (~100s) et nécessite peu de puissance pour le fonctionnement (<W) ce qui lui confère un rendement ou puissance

²¹ Technological Readiness Level

spécifique (mN/W) des plus intéressantes (cf. Figure 22). Les poussées attendues sont dans la gamme mN- 100mN sur des temps de quelques 100ms, ce qui permet de l'envisager pour :

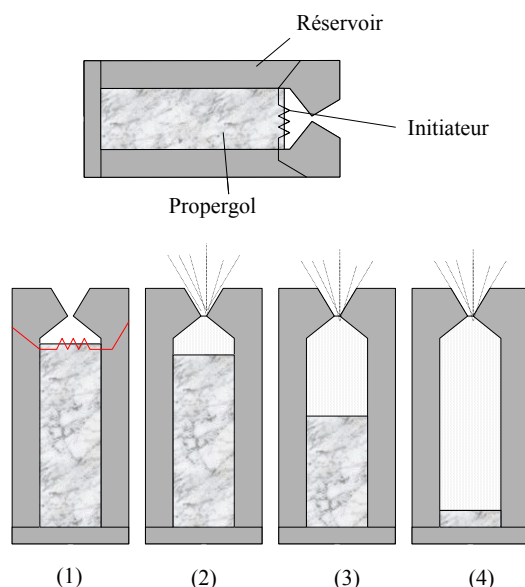
- la propulsion secondaire (maintien à poste, opération sur orbite) et pour les systèmes de désorbitation,
- pour compléter les systèmes de propulsion électriques des petits drones soumis à de fortes perturbations.

Tous ces critères ont amené le LAAS et le CNES à engager une réflexion sur la micropropulsion à propergol sur silicium dès les années 96 [40] et à initier aussitôt un programme de recherche [56].

Cette activité de recherche a été soutenue aussi par la région Midi-Pyrénées [57], par un projet Européen dans le cadre du 5^{ème} PCRD [58] ainsi que par l'ESA [45].

4. La micropropulsion à propergol sur Si

Le concept de micropropulseur à propergol solide est basé sur un principe classique en propulsion : un matériau énergétique contenu dans un réservoir micro usiné est chauffé par un initiateur jusqu'à sa température d'initiation. La combustion s'initie alors et se propage sans apport supplémentaire d'énergie jusqu'à la fin du réservoir. Les gaz issus de la combustion sont accélérés au travers d'une tuyère convergente-divergente créant ainsi une poussée (cf. Figure 23).



(1) Initiation par effet Joule, (2) Début de l'auto combustion du propergol, (3) (4) auto combustion soutenue du propergol.

Figure 23. Schéma d'un propulseur et principe de fonctionnement

Cette technologie est monocoup puisque les propulseurs utilisés ne sont pas rechargeables. Ainsi, des matrices contenant le nombre de propulseurs requis pour la durée de la mission sont conçues et réalisées.

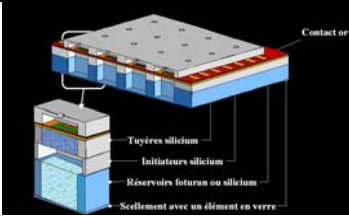
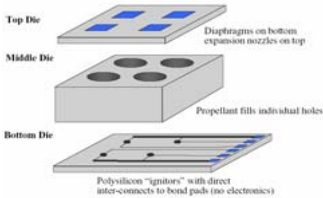
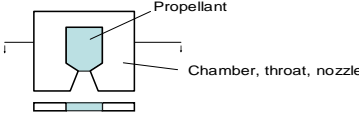
4.2. Etat de l'art

Le concept de matrice de propulseurs unitaires a été breveté par le CNES avec le LAAS en 1999 [43]. Quelques mois après, l'équipe d'Antonson publie dans la revue *Sensor & Actuator* une approche similaire à la notre intégrant des explosifs dans des microcavités silicium. Ce concept appelé "Digital Micropropulsion" a été aussi breveté en 1999 [31]. De 1999 à 2004, chaque année, au moins une nouvelle équipe de chercheurs publie un travail ou un nouveau projet se rapportant à la micropropulsion solide. En 2001-02, Youngner et al publient un projet sur la conception et la réalisation de micropropulseurs pixélisés sur silicium [33]. En 2002, une équipe chinoise (K. Takahashi et al) présente à une conférence son projet sur une technologie similaire [29]. En 2003, des travaux de quatre nouvelles équipes dans le domaine de la micropropulsion solide sont parus dans des journaux scientifiques [22,26,30,36]. En 2004, lors de la conférence CANEUS 2004, une nouvelle équipe présente son travail sur la conception et la modélisation de matrice de micropropulseurs à propergol solide [39]. En résumé, suivant les applications visées et donc les niveaux de forces attendus (μN ou dizaine de mN), trois architectures ont été proposées entre 1997 et 2000 et servent depuis, de base de développement en Europe, aux USA et en Asie :

- la micropropulsion propergol solide par assemblage de plusieurs substrats visant des impulsions autour de 10mN.s a été proposée par le LAAS-CNRS pour des applications spatiales [42],
- la micropropulsion « digitale » visant des impulsions inférieures au mN.s a été initiée par une équipe américaine alliant la TRW, the Aerospace et Caltech pour des applications spatiales [31],
- la micropropulsion à propergol « à plat » ou « planaire » visant des impulsions supérieures à 10mN.s a été engagée par l'Université de Berkeley, pour des applications civiles ou militaires [44].

Le Tableau 6 résume ces 3 approches en termes de caractéristiques dimensionnelles et performances. Il classe aussi les travaux engagés depuis 2000 par des équipes nouvelles suivant les approches ci-dessus définies.

Tableau 6. Etat de l'art des différentes options en micro propulsion sur silicium et projets associés

Option	Architecture de type «empilement »		Architecture «à plat» ou planaire
	Propulsion solide avec Propergol <i>Rossi et al</i>	Propulsion solide avec matériau primaire <i>Lewis et al</i>	
Schéma des structures			
Matériau pyrotechnique	Propergol	Matériau de classe 1:1	Propergol
Diamètre des chambre de combustion	500µm – 1 mm	300µm – 700µm	3mm
Diamètre du col	100-500µm	190-300µm	500µm-1mm
Densité	Moyenne	Très élevée	Moyenne, basse
Puissance d'initiation	150mW sur membrane diélectrique fine	50W (100V; 0.5A; 50µs) sur substrat	200-300mW
Impulsion	10-4 N.s - 1.10-3 N.s	10-6N.s - 10-4N.s	10-3 N.s
Fonctionnement	Combustion soutenue sur quelques 100ms	Impulsion très brève	Combustion soutenue

Toutes ces options utilisent le même principe : la décomposition d'un matériau énergétique (propergol ou explosif) est initiée par une résistance chauffante intégrée sur silicium ou sur un autre substrat. Mais elles se distinguent essentiellement sur quatre points :

① **Le type de matériau énergétique.** L'utilisation d'explosif assure une réaction chimique même aux très petites tailles (diamètre de réservoir < 600 μm). Par contre leur réaction est instable et difficilement contrôlable. C'est pourquoi, la grande majorité des équipes ont privilégié les propergols.

② **L'architecture des propulseurs et la taille.** Une architecture « verticale » consiste à empiler des substrats usinés indépendamment qui définissent chacun une partie de la structure : initiateur, chambre, tuyère. L'architecture « à plat » vise à réaliser entièrement le propulseur sur le substrat de silicium par un seul micro usinage. La taille de chacun des propulseurs dépend des performances et des applications visées : par exemple, dans le contrôle d'attitude, on visera des impulsions de l'ordre de 10^{-6} N.s, alors que pour le maintien à poste et les opérations sur orbite nécessiteront des impulsions plus importantes: 10^{-4} - 10^{-3} N.s

③ **L'endroit d'allumage (face arrière ou face avant).** L'allumage face avant (face de dégagement des gaz) nécessite d'avoir disponible une technologie permettant de réaliser des résistances chauffantes sur des membranes diélectriques, suffisamment robustes pour supporter le remplissage et l'allumage mais aussi suffisamment fines pour qu'elle se rompent lorsque la pression monte [38,43]. Une équipe a privilégié l'insertion de micro fil dans des fentes usinées dans le silicium pour initier [22].

④ **L'adressage.** La caractéristique consommable des propulseurs est compensée par la réalisation de matrices de propulseurs individuellement adressables. Adresser des milliers de points représente un challenge technologique lorsque les niveaux d'intégration requis sont importants. Seulement quelques papiers mentionnent ce problème d'adressage [33,41]. La plupart consiste à alimenter des vecteurs de propulseurs requérant autant de connections que de propulseurs [19-21][23,26,36,44]. Il faut aussi noter ici, même si l'application n'est pas la micropropulsion, l'approche originale brevetée par le CEA-LETI pour l'adressage de micro sources de pression [64].

4.3. La technologie micropropulsion sur silicium LAAS

Pour le design, nous avons suivi les deux approches déjà présentées et rappelées sur la Figure 24: architecture verticale et celle appelée « à plat » ou planaire (cf. Figure 24). L'architecture verticale consiste en un empilement de plusieurs substrats définissant chacun une partie de la géométrie du propulseur : tuyère, initiateur et chambre. Alors que dans l'architecture planaire, tout le corps du propulseur est réalisé dans un substrat unique, souvent du silicium.

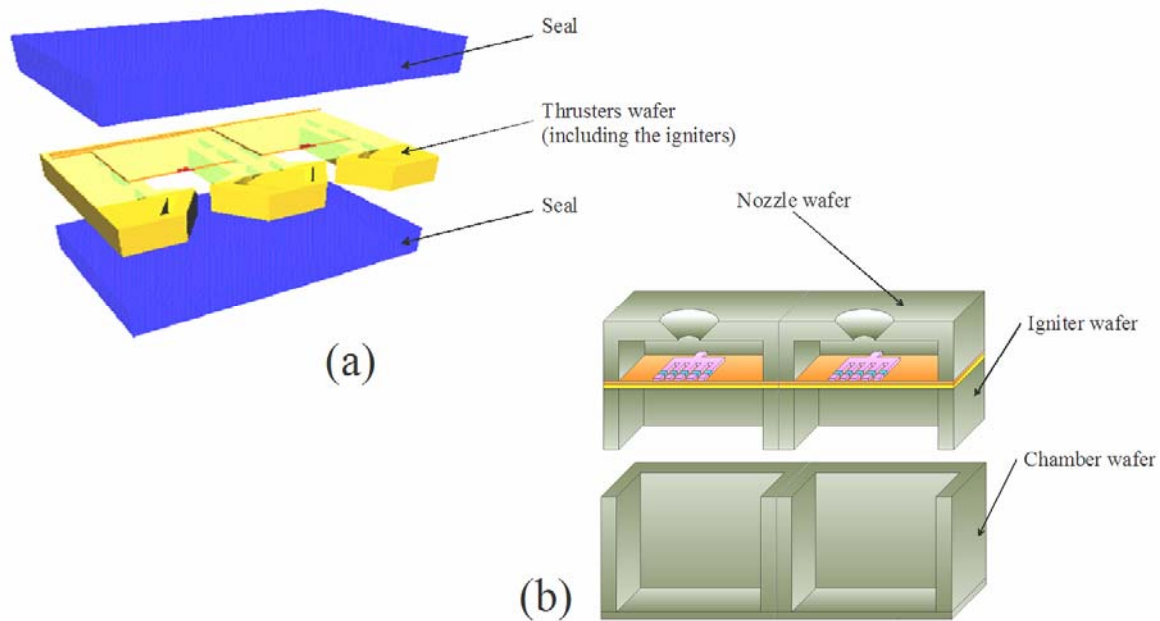


Figure 24. Schéma des 2 structures de micropropulseurs possibles (a) planaire et (b) vertical

La structure dite verticale est bien adaptée à la réalisation de matrices à fortes densités de propulseurs nécessaires pour les applications spatiales nécessitant de nombreux tirs et visant des niveaux de poussée compris entre 0.5mN et 20mN maximum. La structure planaire est mieux adaptée à la réalisation de vecteur. Car réaliser des matrices nécessiterait ensuite d'empiler les vecteurs, ce qui rend l'intégration de composants comme des diodes bien plus compliquée voire impossible.

La structure planaire elle présente l'avantage de réaliser tout le corps du propulseur en une seule étape d'usinage silicium et permet aussi de réaliser des réservoirs de grandes tailles ($> 6.25\text{mm}^{22}$) et des sections de col très petites sans gêner l'initiation. Ainsi nous pouvons viser, grâce à l'architecture horizontale, la gamme de poussée : 0.5mN-100mN. Les deux architectures sont donc complémentaires et adressent des besoins différents.

²² section maximale des réservoirs en structures verticales

Tableau 7. Comparaison des deux architectures développées

Architecture	Planaire	Verticale
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Tout corps du propulseur (y compris l'initiateur) réalisé dans un même substrat • Peut être insérée dans des gros réservoirs • Longueur de réservoir très grand (>cm) simplement • Peut être sertie et donc plus robuste 	<ul style="list-style-type: none"> • Très compacte • Matriçage avec diode aisé • Initiateur et réservoir indépendamment rempli \Rightarrow permet d'avoir des matériaux d'initiation performants
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Vecteur • Mal adapté au matriçage 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitée au petite section de réservoir et petite longueur de réservoir car c'est par empilement de plusieurs substrats.
Gamme de poussée visée	0.5mN-100mN	0.1mN-20mN
Applicabilité	Manœuvre isolée à fort Delta-V: Maintien à poste séparation de satellite, désorbitation, ... Stabilisation de mini ou micro drones	

4.3.1. Revue technologique des propulseurs à structure verticale

La structure appelée μ pyros est un empilement de 4 ou 5 substrats (cf. Figure 25) conçue pour le maintien à poste de petit satellite. Comme nous l'avons déjà mentionné, cette structure et la technologie ont été brevetées en 1999 par le CNES avec le LAAS pour les applications spatiales [43]. La première couche est la couche de micro tuyère. La seconde couche contient les initiateurs et les éléments d'adressage. La troisième couche constitue les réservoirs de propergol. Une 4^{ème} couche en pyrex ferme la structure. Une chambre intermédiaire (5^{ème} couche) peut être rajoutée entre l'initiateur et le réservoir de propergol pour fiabiliser l'initiation et le transfert de flamme entre l'initiateur et le réservoir. Cette structure présente un intérêt majeur car elle dissocie chacune des parties et permet donc de travailler et d'optimiser chacune d'entre elles indépendamment. L'adressage électronique de chacun des propulseurs est réalisé en associant à chaque micro initiateur une diode pour adresser.

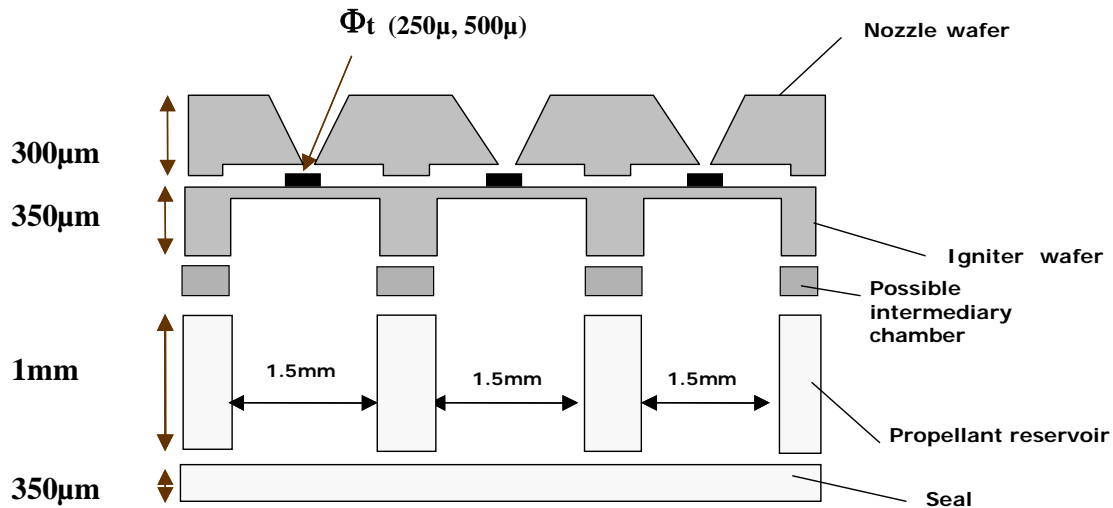


Figure 25. Schéma et dimensions du démonstrateur μ pyros

Les technologies de fabrication choisies sont celles des microsystèmes pour des raisons évidentes de capacité à la miniaturisation et donc de gain d'intégration, de coûts et de précision d'usinage. Nous avons alors sélectionné des matériaux compatibles avec ces technologies :

- *Le silicium* pour les parties qui nécessitent des usinages 3D complexes (tuyère et réservoir isolé) ou qui supportent des fonctions électriques (initiation et adressage).
- *Le verre photosensible* (Foturan [48]) pour le réservoir car il présente l'avantage d'avoir une faible conductivité thermique et s'usine chimiquement par des procédés compatibles avec les microsystèmes.

PS : la discussion sur les choix des matériaux de structure est détaillée dans la première partie de ce mémoire

Concernant le matériau pyrotechnique, des travaux expérimentaux sur une grande quantité de propergols caractérisés en initiation et combustion, nous ont amenés à sélectionner 2 matériaux énergétiques:

- Un matériau énergétique très sensible pour l'initiation. Il s'agit d'un ZPP²³ qui s'initie à très faible énergie (<10mJ) et avec des rendements de 100%.
- Un propergol composite de type PAG²⁴ pour le réservoir dont la combustion génère de fort volume de gaz et qui présente une combustion soutenue même aux petites dimensions (jusqu'au mm²).

²³ Zirconium Perchlorate de Potassium

²⁴ PolyAzoture de Glycidyle

Le choix des dimensions de chacun des micropropulseurs a été fait sur la base de trois critères :

1. recherche d'une intégration optimale pour des raisons évidentes de gain de masse et l'obtention d'un rapport force disponible sur poids de la structure maximum. L'espacement entre deux propulseurs doit être minimum tout en assurant un isolement thermique suffisant pour que le propulseur fonctionnant n'initie pas ses proches voisins.
2. recherche d'une fiabilité de fonctionnement optimale. Ce qui impose que l'on reste dans des dimensions millimétriques pour la section de combustion. Des études expérimentales et théoriques ont en effet montré que lorsque l'on réduit les dimensions en de-ça du mm² (cf. partie 1), le rapport perte thermique sur énergie de combustion devient alors défavorable à la propagation soutenue de la combustion dans des réservoirs en verre ou silicium.
3. applications au maintien à poste. Nous visons des poussées (F) comprises entre 1mN et 20mN pour satisfaire les spécifications calculées [45].

A partir de ces considérations et en nous appuyant sur nos outils de conception qui seront présentés dans le paragraphe suivant, la section de chambre a été fixée à 1.5×1.5mm² (un design circulaire aurait été aussi possible), le diamètre du col de tuyère a été calculé à 250µm et 500µm. Le pas entre deux propulseurs a été calculé par des simulations thermiques [46] à 1.5mm lorsque les réservoirs sont en verre et à 2mm lorsque ces derniers sont en silicium afin d'y intégrer des tranchées d'isolation thermique.

Le Tableau 8 récapitule les dimensions des propulseurs de type µpyros qui a fait l'objet d'une thèse de doctorat [59].

Tableau 8. Résumé des dimensions d'un micro propulseur unitaire de type µpyros : pression et poussée prédites.

Section de la chambre de combustion	1500µm x 1500µm		
Surface de la membrane initiateur	1500µm x 1500µm		
Diamètre du col de tuyère \varnothing_t	250µm	500µm	//
Pression de combustion calculée	6bar	1.4bar	1bar
Force calculée [47]	30mN	10mN	1mN

Hauteur de la chambre	1mm	1mm	1mm	1mm
------------------------------	-----	-----	-----	-----

Les procédés de fabrication ainsi que les technologies d'assemblage ont été publiés à plusieurs reprises [34,38,41], nous les résumons dans le Tableau 9.

En résumé, le Tableau 9 récapitule, pour chacune des parties du module de propulsion,

- les dimensions réalisées et validées en termes de reproductibilité, rendement de fabrication (>90%) et tolérance de fabrication ; les dimensions du démonstrateur final sont en gras.
- Les matériaux de structures retenus,
- Les principales étapes technologiques mises en œuvre pour la fabrication.

Tableau 9. Résumé des choix technologiques et des caractéristiques de fabrication des matrices de type μpyros

Partie du module	Dimensions validées en fabrication	Matériaux de structure	Process principaux	Tolérance de fabrication sur dimensions du démonstrateur
Initiateurs	Surface membrane : 1mm×1mm, 1.5mm×1.5mm , 2mm×2mm; Epaisseur membrane : 1.1μm, 2μm Epaisseur substrat: 350μm , 540μm	Silicium	DRIE RIE Dépôt film mince	5% sur volume cavité
Réservoirs	Section cavité : 1.5mm×1.5mm , 2mm×2mm profondeur : 500μm, 1000μm	Silicium Foturan	DRIE (silicium) Usinage chimique humide (foturan)	22% Foturan 5% sur silicium
Tuyères	Angle divergent : 1°, 4° Col de tuyère : Øt : 150μm, 250μm , 500μm Epaisseur : 350μm	Silicium	DRIE Usinage chimique humide (KOH)	<10%
Fond	Epaisseur : 0.5mm	Pyrex	Découpage scie diamantée	//

Démonstrateur complet	Surface : 240mm×240mm ; Epaisseur : 2.5mm ; 100 propulseurs	//	Collage par époxy basse température Remplissage sous vide par sérigraphie	90% de rendement
------------------------------	---	----	--	------------------

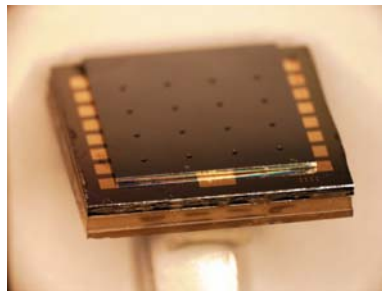


Figure 26. Photo d'une matrice de 16 propulseurs μ pyros non adressés assemblés

4.3.2. Revue technologique de propulseurs à structure planeaire

Pour les applications nécessitant des forces dans la gamme 0.5mN-100mN et n'ayant pas besoin de matrices à haute densité de propulseur, l'architecture de propulseur planeaire (cf Figure 24) est préférable pour ses atouts en terme de robustesse. Comme nous l'avons vu dans le §4.3, elle se différencie par rapport à l'architecture verticale μ pyros par le fait que le réservoir, le convergent, le col, la tuyère et l'initiateur sont usinés dans le même substrat de silicium et en surface. Cette structure consiste donc en un empilement limité à 2 ou 3 substrats maximum qui en constitue son principal atout:

- Une couche de réservoirs.
- Un substrat de silicium micro usiné afin de constituer la tuyère, le réservoir et l'initiateur sur membrane diélectrique fine. Le substrat de silicium central permet aussi la réalisation des chemins d'alimentation électriques de chacun des initiateurs.
- Une couche supplémentaire (si besoin) de réservoirs.

Les matériaux choisis pour réaliser la structure sont :

- **le silicium qui est incontournable** pour le corps du propulseur car il permet d'y intégrer dans le même substrat la partie initiation sur membrane et si nécessaire des composants électroniques en bordure.
- Les réservoirs adjacents peuvent être réalisés soit :

- **en céramique de type MACOR** qui présente l'avantage par rapport au verre Foturan d'avoir un coefficient de dilatation très proche du silicium et donc réduit les risques de rupture mécanique de l'assemblage soumis aux forts gradients thermiques et à la pression. Le MACOR s'usine par voie classique, très précisément ($<5\mu\text{m}$).
- **un polymère moulable** peut aussi être une solution possible.

Le procédé de fabrication est basé sur des étapes maîtrisées de procédés MEMS [60].

Les Figure 27, Figure 28 donnent respectivement des photos de propulseurs ainsi réalisés et assemblés.

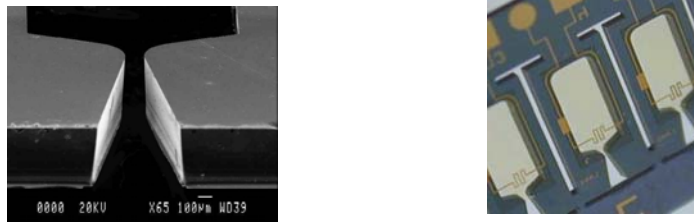


Figure 27. Photos de la partie silicium : tuyère et initiateur



Figure 28. Photos d'un vecteur assemblé (en blanc : Macor) et en cours d'expérimentation

4.4. Modélisation et conception des micropropulseurs sur silicium

Des modèles de fonctionnement permettant d'abord de bien comprendre les paramètres influant les performances d'un micro propulseur sur silicium et ensuite de construire des outils de conception et dimensionnement ont été indispensables à la maîtrise de cette technologie. Notre contribution à la conception de micro propulseur à propergol sur silicium a suivi plusieurs étapes en partant de modèles simples jusqu'à la réalisation d'un module de conception de micropropulseurs complet qui est utilisé régulièrement pour la conception de toutes nos structures. Nous allons donc résumer les principales étapes de modélisation sans les détailler. Le lecteur intéressé par les résultats scientifiques pourra se rapporter aux références citées au cours du paragraphe.

La première étape a consisté à élaborer des modèles mono dimensionnels à partir des équations des écoulements isentropiques dans une tuyère tronconique et en régime permanent [61]. Cette approche est intéressante car elle permet de se familiariser avec les équations des écoulements isentropiques super ou sous soniques et elle donne des résultats (profil de la pression, de la température et des vitesses du gaz) précis à 15-20%.

Un modèle mono dimensionnel permet très rapidement (<1min) de prédire, en fonction de la géométrie d'un propulseur, le régime de fonctionnement d'un propulseur et de calculer la poussée. Avec des allers-retours entre résultats de modélisation et paramètres d'entrée, il est possible de faire de la conception et de trouver la structure optimale du propulseur qui est une structure supersonique avec choc à la sortie de la tuyère. Cependant, ce modèle est stationnaire et ne rend donc pas compte de l'effet transitoire qui peut représenter dans notre cas une partie importante du temps de fonctionnement d'un propulseur.

C'est pourquoi, nous avons complété notre travail par des modèles dynamiques à partir des équations bien connues de Navier-Stokes pour un gaz compressible. Or, l'exploitation du modèle complet de Navier-Stokes pose un certain nombre de problèmes et sa résolution dans le cas d'une géométrie 3D est une tâche très difficile tant d'un point de vue théorique qu'applicatif. Il est très courant de trouver des modèles simplifiés. Dans notre cas, nous pouvons négliger les forces d'inertie et si l'on se place dans l'hypothèse que la viscosité du fluide est faible (nombre de Reynolds très grands >1000), on peut supposer que les couches limites sont négligeables²⁵. Ceci conduit à supposer que la composante du vecteur vitesse perpendiculaire à l'axe de l'écoulement est négligeable. Le modèle 3D se simplifie donc à un modèle 1D suivant l'axe de l'écoulement et les équations de Navier Stockes deviennent :

$$\frac{\partial(\rho A_c)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v A_c)}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial(\rho v A_c)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v^2 A_c)}{\partial x} + A_c \frac{\partial P}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial(\rho e A_c)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v e A_c)}{\partial x} = 0$$

avec

- P : pression
- A_c : section en combustion
- ρ : masse volumique des gaz
- T : température
- v : vitesse des gaz
- x : coordonnée suivant l'axe d'écoulement du gaz (axe propulseur)

²⁵ Cette hypothèse est discutable aux faibles dimensions.

Ce type de modèle analytique [62] présente l'intérêt de bien comprendre les phénomènes mis en jeu dans l'écoulement et permet de mieux maîtriser les difficultés rencontrées en modélisation fluide compressible. Il fonctionne très bien pour un écoulement sous-sonique mais présente des difficultés de convergence et de résolution dès que le régime d'écoulement atteint le supersonique car des discontinuités apparaissent dans le système. Les temps de calcul sont longs (>10min). Et si l'on souhaite avoir des précisions suffisantes, ils peuvent dépasser l'heure, si bien qu'il se prête mal pour faire de la conception systématique.

C'est pourquoi, nous sommes enfin orienté vers une modélisation dynamique avec une approche globale à paramètres localisés [47]. Dans ce dernier cas, nous avons considéré le gaz de combustion avec ses caractéristiques globales: pression ($P(t)$), température ($T(t)$), masse ($m(t)$). Les équations de Navier-Stokes sont travaillées de sorte de faire apparaître des équations donnant la température (T), la pression (P) et la masse (m) du gaz. Elles s'écrivent alors :

Equation de conservation de l'énergie :

$$m \frac{\partial T}{\partial t} + T (q_{out} - q_{in}) = - \frac{P}{C_v} \frac{\partial V_{(x)}}{\partial t} - \gamma q_{out} T + q_{in} \times h_r - \phi_{con} - \phi_{rad}$$

Avec q_{in} est le débit de gaz entrant et q_{out} celui sortant.

- $q_{in} = \frac{\partial x}{\partial t} A_c \rho_p$
- q_{out} dépend du régime d'écoulement (supersonique ou sous sonique) :

Si $P < P_i$, le gaz est sous sonique et : $q_{out} = \sqrt{\frac{\gamma}{r}} \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\frac{\gamma + 1}{2(1-\gamma)}} \frac{P}{\sqrt{T}} a_t$

Si $P > P_i$, le gaz au niveau du col est sonique et:

$$q_{out} = \sqrt{\frac{\gamma}{r}} \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\frac{\gamma + 1}{2(1-\gamma)}} \frac{P}{\sqrt{T}} a_t \sqrt{1 - \left(\frac{\frac{P_s}{P} - \frac{P_a}{P_i}}{1 - \frac{P_a}{P_i}} \right)^2}$$

ϕ_{con} est la chaleur perdue par convection et ϕ_{rad} celle perdue par radiation :

- $\phi_{con} = h S (T - T_w)$ h étant le coefficient de convection, S , la section du propulseur et T_w la température aux parois.
- $\phi_{rad} = \sigma \varepsilon S_{(x)} (T^4 - T_w^4)$ ε étant l'émissivité réciproque et σ la constante de Boltzman.

tel-00082558, version 1 - 28 Jun 2006

Equation d'état du gaz:

$$P = \frac{m r T}{V}$$

Equation de la poussée dans le propulseur:

$$F = \left(P_s A_s (1 + \gamma M_s^2) - A_s P_a \right) \frac{1 + \cos \theta_{div}}{2}$$

- Si $P > P_i$ dans la tuyère et si le gaz est supersonique dans le divergent et que la pression atmosphérique est transmise au gaz à la sortie de la tuyère, P_s et M_s s'obtiennent par les

équations : $P_s = P_a$ and $M_s = \sqrt{\frac{2}{\gamma - 1} \left(\left(\frac{P_s}{P} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} - 1 \right)}$

- Si $P < P_i$ et si le choc a eu lieu à l'extérieur du divergent, le gaz est entièrement supersonique dans le divergent. Ainsi, P_s et M_s s'obtiennent par les équations:

$$\frac{A_s}{A_t} = \frac{1}{M_s} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}} \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_s^2 \right)^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}}$$

donc, $M_s = f\left(\frac{A_s}{A_t}\right)$ et $P_s = P \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_s^2 \right)^{\frac{-\gamma}{\gamma - 1}}$

Ce dernier modèle [47] permet rapidement de prédire les performances en dynamique de nos dispositifs en fonction des caractéristiques géométriques des propulseurs avec des temps de calculs inférieurs à la minute. Il est très bien adapté pour faire de la conception systématique et est utilisé de façon régulière pour concevoir nos systèmes.

4.4.1. Discussion

Nous avons mis en place des modèles basés sur les équations de Navier-Stokes en supposant que l'écoulement est isentropique et en négligeant les effets de couche limite. Nos modèles ont été validés par des mesures expérimentales de poussée sur des propulseurs avec et sans col en régime sous sonique. Les résultats expérimentaux [63] corréleront les modèles assez bien pour des propulseurs de tailles supérieures à 1.5mm (voir Tableau 10).

Tableau 10. Résultats des caractérisations de la poussée sur les propulseurs du démonstrateur μ pyros

Force mesurée / calculée	Sans col	0.3mN
	Col : 500 μ m	1.1mN / 1.3mN
	Col : 250 μ m	8.9mN / 12mN

Les écarts entre modélisation et expérimentation s'accroissent lorsque les dimensions diminuent en deça du mm. En effet, lorsque les dimensions des tuyères se réduisent en dessous de 100 μ m [50] et pour des rapports d'expansion ($A_c/A_t > 10$), les écoulements ont des nombres de Reynolds faibles (400-2000) engendrant des couches limites relativement importantes. Ainsi les hypothèses d'écoulement isentropique non visqueux ne sont plus du tout acceptables. Ces couches limites réduisent considérablement l'efficacité des propulseurs (jusqu'à 70%) par rapport aux prédictions. Le problème de la simulation des écoulements à faible nombre de Reynolds est donc tout particulièrement important pour faire de la conception sur les micropropulseurs. Il a été étudié au MIT²⁶ [50-51] en considérant des écoulements 2D très visqueux. Les résultats des simulations par rapport aux expérimentations ont conduits à :

- un bon accord sur le paramètre débit des gaz,
- des écarts importants entre poussée prédites et estimées mettant en évidence des effets de couches limites au niveau de la tuyère non pris en compte en 2D.

Une équipe de Glasgow [53] a aussi étudié le problème en considérant un modèle d'écoulement visqueux en 3D [52]. Les résultats sont meilleurs mais des phénomènes non encore explicités sont mis en avant. Ces travaux montrent que les écoulements des fluides dans les micro tuyères sont très visqueux et nécessitent encore des travaux pour bien comprendre et prédire les performances des propulseurs miniatures.

5. Conclusions et perspectives

La miniaturisation des satellites et des drones apporte de nouvelles spécifications et contraintes pour la réalisation des modules de propulsion. On peut retenir que les niveaux de poussées requis sont inférieurs à 100mN et que la précision pour certaine manœuvre est de l'ordre du μ N. Le choix du système de micropropulsion est donc un point clé pour l'émergence des petits satellites et de la faisabilité des drones miniatures. C'est pourquoi, le développement de systèmes de micropropulsion à partir des technologies microsystèmes a focalisé les efforts de très nombreuses équipes internationales depuis les années 90. Aujourd'hui, certaines technologies sont à un stade de maturité avancée (μ Gaz froid et μ FEEP), d'autres sont dans un stade laboratoire avancé comme la micropropulsion à propergol solide alors que beaucoup restent au stade de concept. A côté des micro propulseurs ioniques et gaz froid qui apportent tous deux une réponse certaine au contrôle fin, précis ($< mN$) et continu, les micropropulseurs solides sur silicium représentent une option très prometteuse pour les manœuvres requérant des niveaux de poussées faibles (0.1mN-1mN) à moyennes (10aine de mN). On peut citer le maintien à poste pour mission de courte durée, approche de micro satellite inspecteur, certaine

²⁶ Massachusset Institute of Technology

désorbitation et opération sur orbite. Pour ces manœuvres, la micropropulsion solide sur silicium présente des atouts extrêmement intéressants, qui sont maintenant bien connus mais que l'on peut rappeler :

1. elle est très simple technologiquement (pas de pièce en mouvement, pas de circulation de fluide) ce qui peut lui conférer des fiabilités de fonctionnements élevées,
2. elle nécessite peu de puissance pour le fonctionnement (0.15W)) ce qui lui confère un rendement ou puissance spécifique (mN/W) des plus intéressantes,
3. elle est flexible : en fonction de la géométrie du propulseur et du matériau utilisé, la poussée peut être adaptée aux besoins des applications.

Par contre, elle est non rechargeable : il faut donc embarquer autant de propulseurs que de tirs nécessaires. Ce dernier point peut être un point faible pour certaine mission mais ne l'est pas pour d'autres. Il suffit donc de cibler les missions compatibles avec cette caractéristique monocoup qui est propre au concept et elles sont nombreuses [49]. Pour permettre la complète émergence de cette technologie, l'étape logique est sa validation en milieu spatial et pour une mission micro satellite. Cette étape doit être engagée par des agences spatiales ; ainsi nous faisons confiance au CNES et à l'ESA.

EXEMPLE 3 :

Le micro amorçage sécurisé sur silicium

1. Introduction

Jusqu'en 2000, quelques soient les applications, les exigences de conception pouvaient se résumer à miniaturisation, optimisation des performances, réduction des coûts, amélioration du confort ce qui a été largement illustrés dans les 2 exemples de réalisation que sont l'injecteur de médicament et la micropropulsion sur silicium. Depuis quelques années (2000-2003), s'ajoutent à ces besoins, des exigences en terme de sécurité. Un effort considérable en matière de défense et surtout de sécurité s'est en effet amorcé depuis les années 2000 en s'appuyant sur les microtechnologies et microsystèmes qui ont ouvert des perspectives très intéressantes. Dans le civil, des exemples sont maintenant connus comme l'airbag [1], d'autres sont émergents comme les cartes à puce dont les données contenues sur la puce sont détruites en cas d'utilisation frauduleuse [2], la mise en place de réseaux de MEMS pour la surveillance [4], la détection d'intrusion [3] et enfin la sécurisation de l'utilisation d'arme à feu par biométrie [5]. Dans le domaine du militaire, la sécurité est devenue aussi un soucis permanent : les munitions doivent être encore plus sûres en terme d'efficacité militaire et de sécurité d'emploi. Les leurres protègent les avions et d'autres systèmes d'armes. Les missiles doivent être de plus en plus efficaces, en particulier par leur précision, non seulement en termes de guidage mais aussi par leur charge militaire. Alors que pour les applications civiles la sécurité touche des domaines d'application et des formes très variées (sécurité automobile, surveillance médicale, inspection industrielle, sécurité bancaire...), la sécurité militaire est fortement liée à la capacité de sécuriser et d'ajouter de « l'intelligence » aux mises à feu pyrotechniques.

C'est bien sûr, sur ce point que nous avons contribué de part notre expérience en micropyrotechnie et microsystème silicium.

Pour les applications d'amorçage sécurisé (armes militaires et armes civiles), les pyroMEMS, de part leur taille compacte, leur énergie embarquée, leur compatibilité avec l'électronique joue un rôle très important essentiellement à trois niveaux :

- 1) au niveau de la technologie d'amorçage en proposant des micro amorces sur puce de silicium de type fil chaud toutes intégrées faiblement consommatrices d'énergie,
- 2) au niveau de l'intelligence du système en permettant grâce à une électronique embarquée d'interfacer des capteurs, traiter de l'information (codage/décodage..) et prendre des décisions « organisées »,
- 3) au niveau de la sécurisation du système en proposant des architectures et assemblages compacts (tout silicium ou hybrides) intégrant des protections mécaniques, électriques, pyrotechniques.

Le premier point est l'application immédiate des initiateurs pyrotechniques sur membrane $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ que nous avons développé depuis le début de notre activité et qui ont été largement décrits dans les sections précédentes.

Les deux autres points, qui concernent « l'intelligence » et la « sécurisation » d'amorces pyrotechniques sont innovants dans notre activité puisque ce sont des exigences qui n'existaient pas pour les applications de micro propulsion et d'injection de médicament et qui se sont présentées à nous, à partir de 2002, au travers de deux applications : tout d'abord pour la sécurisation d'armes à feu civiles et ensuite pour la sécurisation d'amorces militaires.

Pour ces deux applications (civile et militaire), le défi est double : **miniaturiser et sécuriser un système de mise à feu (aussi appelé amorce dans le texte) avec comme spécifications communes :**

- **en position de veille, aucun événement extérieur (de nature électromagnétique, humaine ou autre) ne doit pouvoir initier la mise à feu,**
- **sur décision de plus haut niveau (système ou opérateur), on doit pouvoir déverrouiller rapidement cette sécurité et permettre l'opération de mise à feu.**

De plus la miniaturisation et la mise en œuvre des fonctions de sécurité doivent répondre à des exigences strictes en général normalisées et qui dépendent bien sûr des domaines d'application. Par exemple le système de mise à feu pour les applications militaires doit avoir un seuil de déclenchement élevé pour résister aux perturbations extérieures auxquelles il peut être exposé. Alors que les micro amorces pour les armes à feu civiles auront un seuil d'initiation minimal, tout en gardant une fiabilité optimale, et nécessitera une technologie de transfert énergétique sans contact de l'arme à la douille.

Par souci de clarté, dans le reste du document ; nous dissocierons les deux applications qui nous serviront de canevas pour mettre en avant les réponses qu'apporte la micropyrotechnie sur silicium pour résoudre le problème de la sécurisation des armes civiles et militaires. Ce problème de sécurisation des armes représentant un enjeu très important pour la société, nous donnerons en conclusion et perspectives nos réflexions sur le rôle très important des micro technologies pour la sécurité.

2. Le micro amorçage sécurisé sur silicium pour les applications militaires

Les amorces pyrotechniques sont très largement utilisées dans l'industrie militaire pour la mise à feu d'explosifs qu'il s'agisse d'obus, de missiles, de fusées ou encore de mines. En général, pour ces

applications, les exigences sécuritaires sont extrêmes : il n'est pas acceptable que la mise à feu puisse se déclencher intempestivement soit à cause d'une défaillance des circuits environnants, soit à cause de mécanismes naturels électrostatiques et électromagnétiques (éclairs, par exemple) soit encore à cause d'agressions électromagnétiques notamment. Ces dispositifs doivent donc satisfaire des conditions de sécurités particulières répertoriées dans les documents STANAG [6] de l'OTAN²⁷, avec notamment :

- condition de non feu sous 1A, 1W, 5min pour éviter des initiations intempestives.
- Et pour certaines catégories d'amorces, un désalignement de l'explosif par rapport au reste de la chaîne pyrotechnique (moteur) est requis.

En technologie conventionnelle, ces dispositifs de mise à feu sont faiblement sécurisés, complexes (parties mécaniques usinées précisément en rotation ou translation), encombrant (quelques cm³ minimum) et pèsent quelques centaines de grammes. La quantité de matériau explosif intégré est de quelques dizaines de mg ce qui ajoute des problèmes de sécurité lors de l'intégration.

L'utilisation des technologies microsystèmes amène -de part leur capacité à miniaturiser, à intégrer sur un même substrat et dans un même process des fonctions électroniques, pyrotechniques, mécaniques et sensibles- un progrès considérable pour les amorces et ouvre la voie à la réalisation de micro amorces toute intégrées, robustes et sécurisées. La DGA a perçu ce potentiel et nous ont fait confiance pour l'explorer en finançant une thèse en cours sur le sujet²⁸.

2.2. Etat de l'art et présentation de notre option

Du fait du caractère stratégique (militaire et industriel) des applications, l'état de l'art est très pauvre dans le domaine de la sécurisation des dispositifs de mise à feu. Quelques brevets sur des micro amorces sécurisées en technologie MEMS ont été déposés par deux équipes (anglaises et américaines) [7,8]. Ces travaux très récents (2004-2005) concernent l'intégration monolithique sur silicium d'une amorce de type fil chaud avec une barrière mécanique déverrouillable et mise en mouvement par des micro actionneurs intégrés de type électromagnétiques ou électrothermiques. Quoique étant au stade de concept, ces approches sont extrêmement intéressantes car elles visent à intégrer l'initiateur avec une protection mécanique mobile tout silicium. Elles ouvrent donc la voie à l'intégration totale des systèmes de mise à feu qui à terme représentera une avancée considérable dans le domaine.

Notre approche s'inscrit totalement dans cette démarche puisqu'elle vise à :

²⁷ Organisation du Traité de l'Atlantique Nord

²⁸ Pierre Pennarun

- sécuriser la mise à feu par intégration de « fonctions sécuritaires » sur la même puce de l'initiateur,
- sécuriser la manipulation des dispositifs de mise à feu en ajoutant à cet initiateur dit sécurisé des protections mécaniques, le tout en silicium usiné, pour aboutir à un microsysteme silicium de mise à feu hautement sécurisé. Un exemple est schématisé sur la Figure 29.

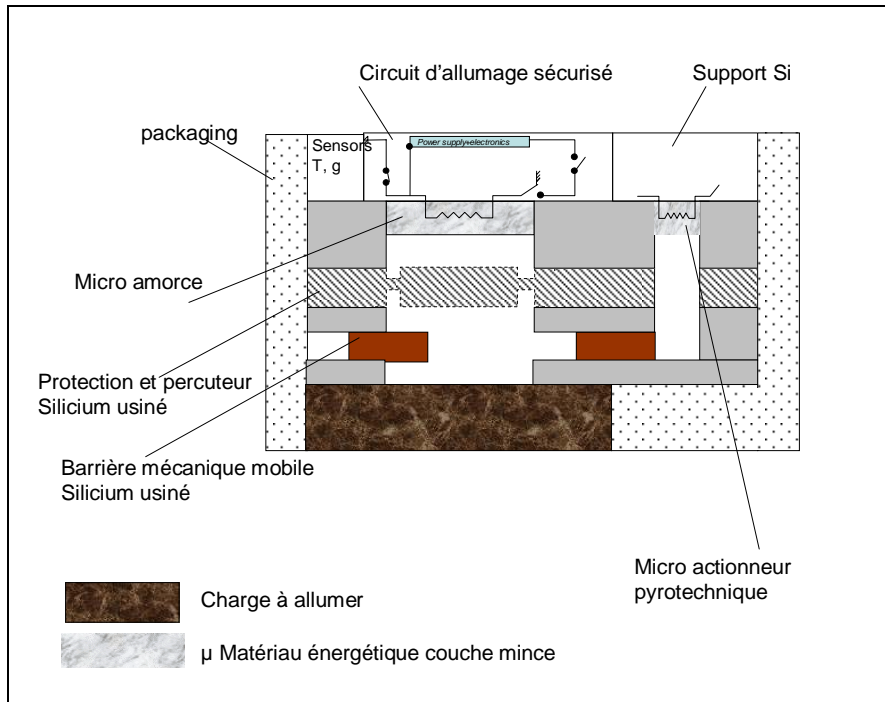


Figure 29. Exemple d'un dispositif de mise à feu tout silicium hautement sécurisé (conçu au LAAS)

2.3. La conception système de l'initiateur sécurisé sur silicium

L'idée est de court-circuiter l'initiateur de type fil chaud en maintenant ses deux connections électriques à la masse tant que l'ordre d'armement n'est pas donné et confirmé. Le court-circuit à la masse est déjà utilisé dans certaine amorce avant l'armement. Dans ces systèmes, il se déverrouille mécaniquement par l'opérateur au moment de l'armement et ne peut pas être facilement dé-armé. Nous proposons un initiateur sur silicium avec court-circuit à la masse réversible au moins une fois et intégrant aussi la stérilisation possible sans participation de l'opérateur. L'architecture de notre initiateur est représentée sur la Figure 30. Ses différents états de fonctionnement sont :

- l'amorce est en position de veille sécurisée (cf. Figure 30): les deux pistes d'alimentation de l'initiateur de type fil chaud sont court-circuitées à la masse.
- l'amorce est armée (Figure 31 (a)) : une des connections à la masse est rompue et l'initiateur peut être alimenté.
- l'amorce peut être dé-armée (mise en position de veille) une fois en reconnectant ses deux connections électriques à la masse (Figure 31 (b)).

- Et enfin l'amorce peut être stérilisée, c'est à dire définitivement déconnectée de son alimentation par rupture mécanique de la piste de connexion électrique qui la relie à l'alimentation (Figure 31 (c)).

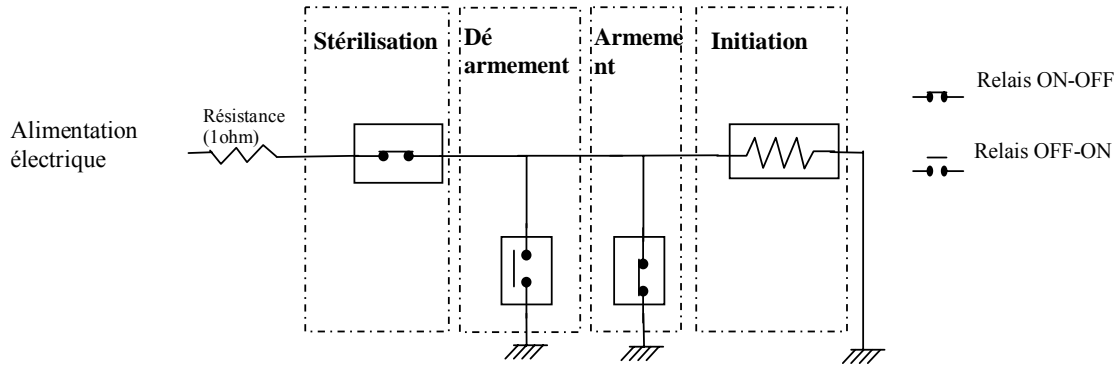


Figure 30. Architecture d'une micro amorce sécurisée sur silicium à l'état veille sécurisé tel que nous l'avons conçue [16]

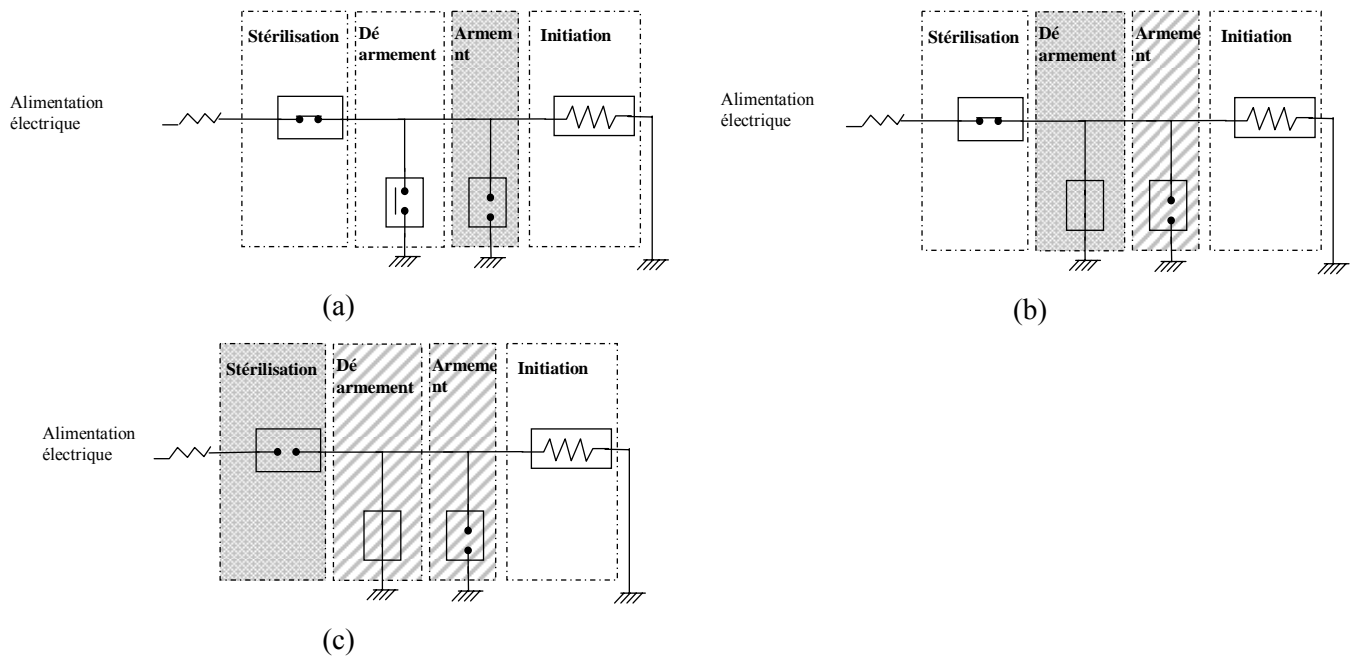


Figure 31. Schéma des différents états de l'amorce sécurisée: (a) amorce armée; (b) amorce désarmée; (c) amorce stérilisée

Une résistance de 1ohm sur un bloc de silicium est ajoutée en série de l'initiateur pour dissiper les 1W, 1A durant 5minutes requis par la norme STANAG 4187.

Cet ensemble de fonctions sécuritaires (armement, dé armement, stérilisation..) peut être réalisé par des systèmes électriques, électroniques et par des relais mécaniques commandés comme les micro relais mécaniques bistables [9,10] et réversibles qui ont l'avantage de consommer de l'énergie

seulement lors des changements d'état mais présentant l'inconvénient d'intégrer des éléments mobiles qui sont source de fragilité. Bien qu'ils présentent l'avantage d'assurer une isolation mécanique en position ouverte, il faut appliquer une force suffisante pour établir et conserver le contact en position fermée, sans le rendre définitif. Ainsi le caractère bistable du système peut être altéré par une force de contact trop élevée tandis qu'une force trop faible entraînera une résistance de contact élevée. L'actionnement de ces micro-relais peut être de type électrostatique, électrothermique, piézoélectrique ou bien s'appuyer sur des mécanismes basés sur les propriétés des alliages à mémoire de forme. Certaines de ces solutions sont complexes à mettre en œuvre engendrant des problèmes de défaillance et/ou fortement consommatrice d'énergie ce qui peut être un facteur limitant pour des applications embarquées que nous visons.

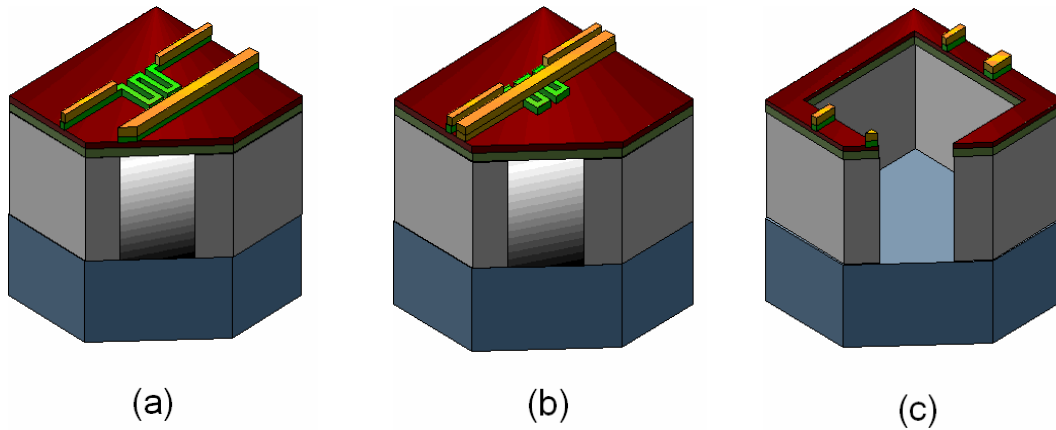
Pour l'usage des systèmes électroniques hybrides ou intégrés sur silicium, ce qui pose problème est la fragilité et la consommation d'énergie électrique : leur fragilité fait qu'ils ne résistent pas à des surcharges électriques et une alimentation en énergie électrique permanente est nécessaire au maintien en position « fermée » des relais. On constate donc qu'il est capital de proposer pour les applications de micro amorçages pyrotechniques, donc monocoups, des relais normalement fermés ou normalement ouverts qui soient simultanément insensibles aux perturbations extérieures et très peu consommateurs d'énergie. Ce sont ces considérations qui nous ont amené à proposer une nouvelle génération de micro relais « normalement ouverts » et « normalement fermés » qui ont fait l'objet d'un dépôt de brevet CNRS/NOVATEC [16].

Outre l'imagination et la réalisation de micro relais sur silicium monocoups dont nous verrons les principes ultérieurement (§ 2.4.1 et § 1.1.1), l'originalité et l'innovation de notre approche se situent dans la conception système de l'amorce qui propose d'intégrer de façon bien spécifique des micro relais avec un initiateur intégré sur silicium (cf. Figure 30) afin d'améliorer de façon significative la sécurisation de la mise à feu des obus et missile.

2.4. Conception de micro relais mono coups et bistables

2.4.1. Le micro relais pyroélectrique « normalement ouvert »

Le concept est basé sur la rupture mécanique d'une piste électrique lorsque l'on souhaite ouvrir le relais (Figure 32). Pour ce faire, la piste électrique (une piste en cuivre) est déposée sur une membrane fine $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ d'un actionneur pyrotechnique (cf. Figure 32). Pour ouvrir le relais, la résistance en poly silicium localisée sur la même membrane chauffe localement un matériau énergétique placé dans la cavité silicium sous la membrane. Les gaz émis par la décomposition du matériau énergétique cassent la membrane et la piste en cuivre.



(a) et (b) avant fonctionnement ; (c) après actionnement

Figure 32. Illustration du fonctionnement d'un relai pyro électrique « normalement ouvert »

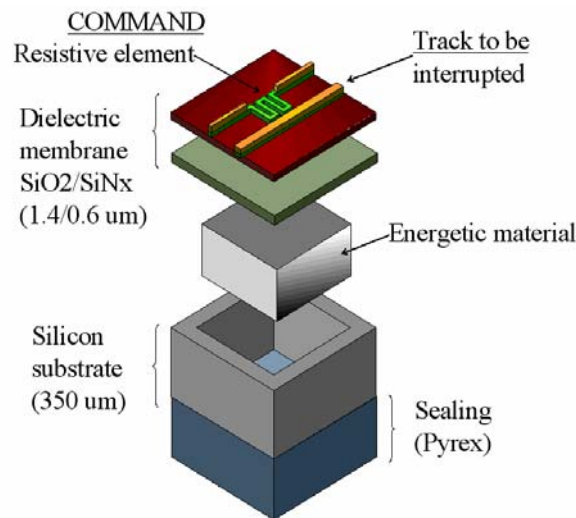


Figure 33. Vue éclatée d'un relai pyro électrique « normalement ouvert »

La Figure 33 représente une vue éclatée du micro relai pyro électrique où l'on voit la résistance chauffante et la piste en cuivre à casser.

Lorsqu'une interruption électrique doit être réalisée une seule fois et lorsque le temps de commutation n'est pas un paramètre important, ce nouveau concept présente des avantages et atouts fort intéressants par rapport aux micro relais mécaniques de type microsystèmes bien connus fonctionnant à partir de forces électrostatiques, électrothermiques ...[10-13].

- En position ouverte, avant la rupture de la piste en cuivre, la résistance de contact est nulle.
- Il n'y a pas de partie en mouvement. Le principe est simple et donc son fonctionnement est fiable.
- Le relai pyroélectrique est bistable. Il ne consomme que pour la commutation, une fois.
- Il peut être extrêmement compact et intégré sur un circuit électronique ou dans un microsystème.

1.1.1. Le micro relais thermique « normalement fermé »

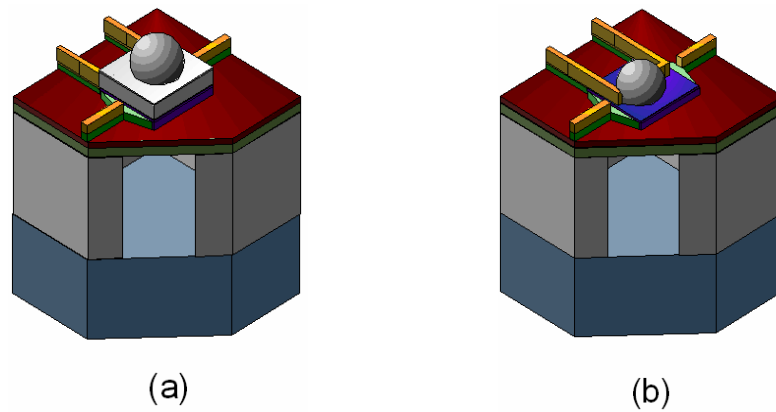
Afin de réaliser des circuits logiques complets, nous avons conçu et réalisé un micro relais « normalement fermé » complémentaire au relais pyro électrique. Son principe est basé sur la réalisation d'une micro brasure par échauffement local d'une couche de Sn déposée entre deux pistes électriques que l'on souhaite connecter (Cf. Figure 34). Avant soudure, les deux pistes électriques sont isolées électriquement par une résine spécifique qui s'évapore à une température inférieure à la température de brasure ($\sim 183^\circ\text{C}$) [14]. La brasure consiste en une inter diffusion des atomes d'étain en phase liquide dans le cuivre. L'intermétallique ainsi réalisé est constitué de deux phases : Cu_2Sn_6 et Cu_3Sn [15].

La structure du relais thermique "normalement fermé" est donnée sur la Figure 35. Il consiste en une résistance en polysilicium sur une membrane $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ et sous une couche de SiO_2 PECVD²⁹. Sur cette couche de SiO_2 , se trouvent les deux pistes électriques à connecter, une résine spéciale qui s'évapore à 100°C et la couche de Sn. Pour les premiers prototypes qui nous ont servi à valider le concept, des billes de Sn/Pb de $300\mu\text{m}$ de diamètre ont été utilisées.

Les atouts de ces nouveaux relais thermiques sont évidents :

- Tout d'abord, avant de réaliser la micro brasure entre les deux pistes, l'isolation électrique est totalement réalisée. Des essais ont montré que la résine isolante avant chauffage, tient des tensions de plus de 100V.
- Ensuite, après brasure, lorsque l'interrupteur est passant, la résistance de contact est très faible ($< 0.08\text{ohm}$) grâce à la formation d'un intermétallique et non pas d'un contact mécanique.
- Le passage de l'état non passant à passant par brasure de l'étain et du cuivre nécessite seulement 100mW durant 5s. Ces temps longs seront réduits par la diminution de la taille de la bille de Sn/Pb.
- Et enfin, ils sont bistables.

²⁹ Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition



(a) : avant actionnement : bille Sn/Pb isolée; (b) après actionnement : intermétallique entre Sn et Cu

Figure 34. Illustration du fonctionnement d'un micro relais thermique « normalement fermé ».

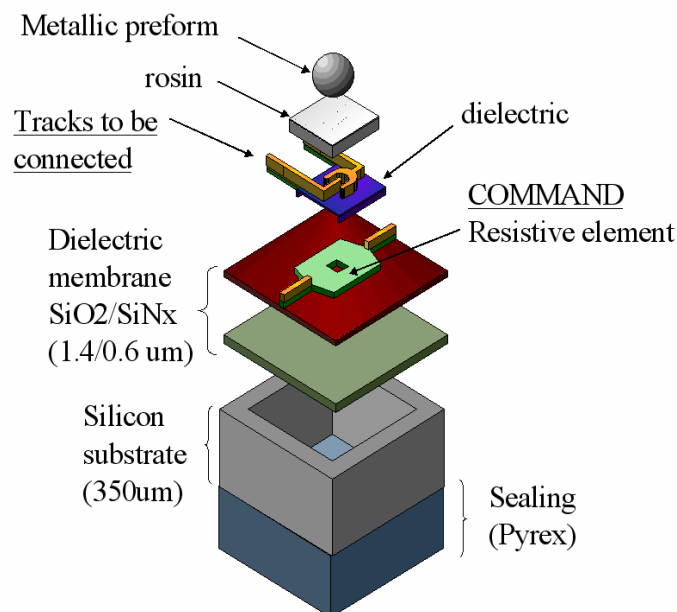


Figure 35. Vue éclatée d'un micro relais thermique « normalement fermé ».

2.5. L'intégration microsysteme

Pour intégrer facilement les micro relais avec l'initiateur pyrotechnique, le procédé de fabrication des deux interrupteurs est basé sur celui des initiateurs pyrotechniques sur membrane SiO₂/SiN_x. Les principales étapes du procédé de fabrication ont été publiées dans la référence ci-dessous et sont rappelées sur la Figure 36. Il s'agit d'une succession d'étapes bien maîtrisées en microtechnologies qui ne posent pas de problèmes particuliers : dépôt LPCVD, dépôt PECVD, dépôt électrolytique, gravure RIE, DRIE et sérigraphie. Les rendements de fabrication sont très satisfaisants puisqu'ils atteignent 95% [22].

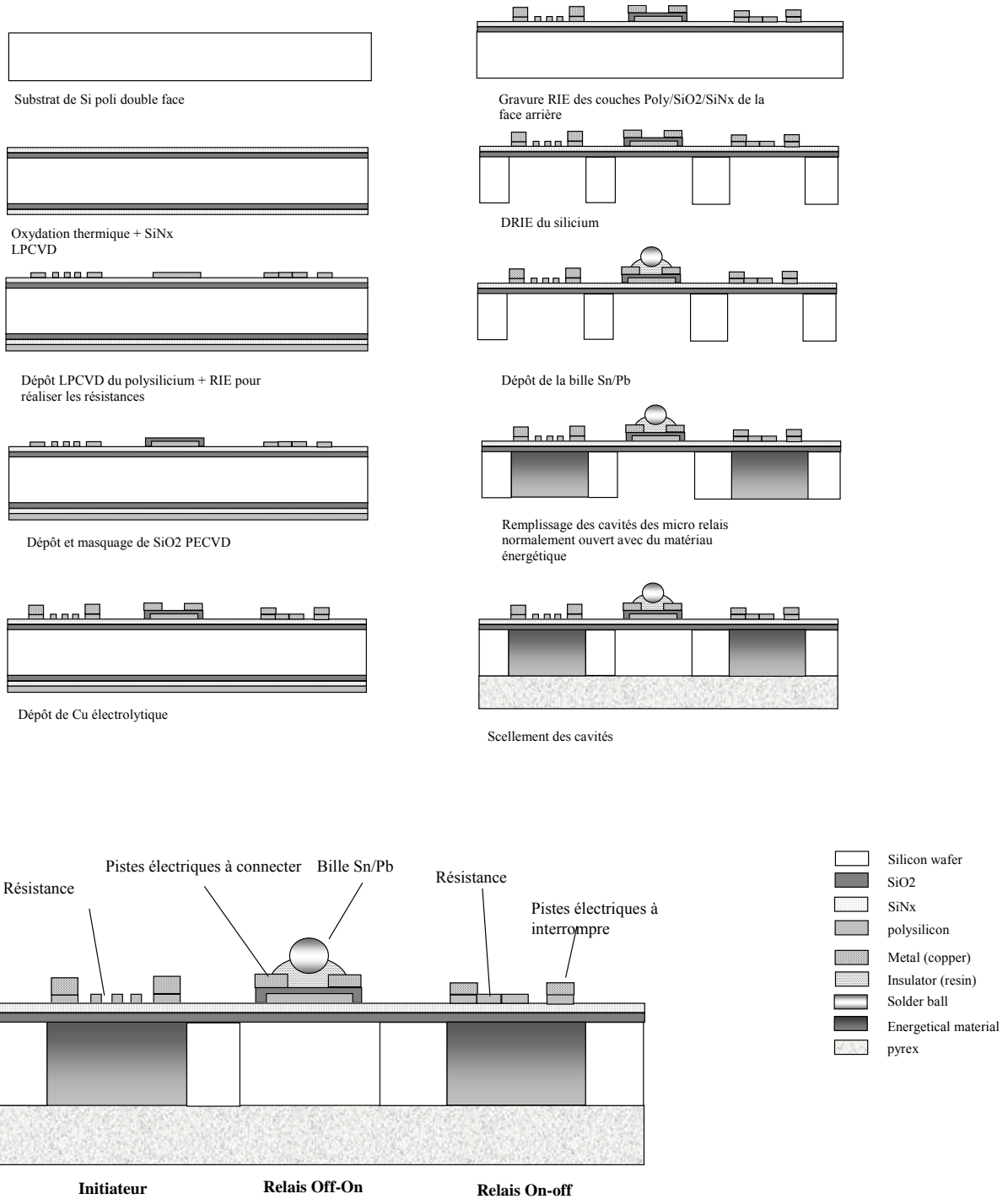


Figure 36. Procédé de fabrication d'une amorce sécurisée sur silicium

La Figure 37 montre des réalisations du micro relais normalement ouvert (a) et normalement fermé (b).

La

Figure 38 est une photo d'une puce l'initiateur sécurisé .

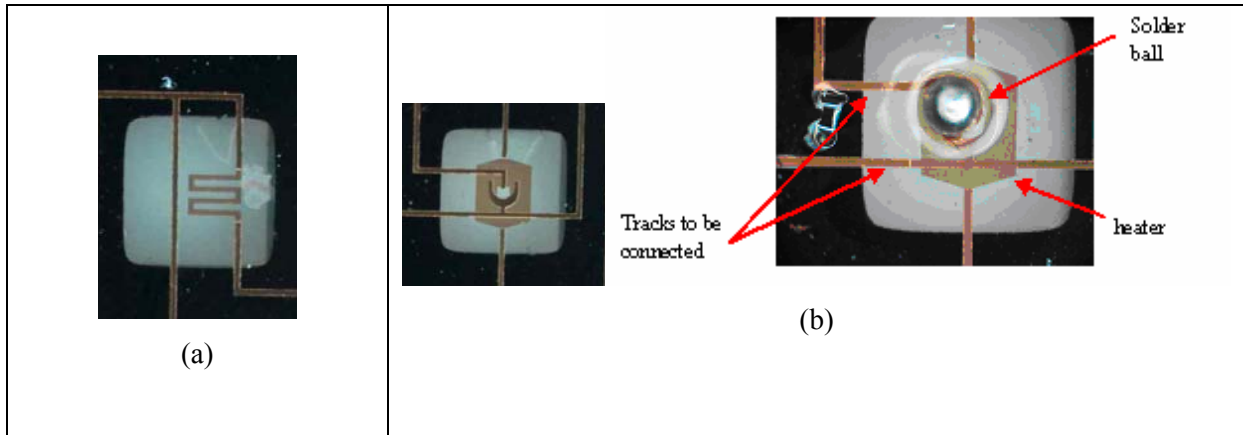


Figure 37. Photos des micro relais (a) normalement ouvert et (b) normalement fermé

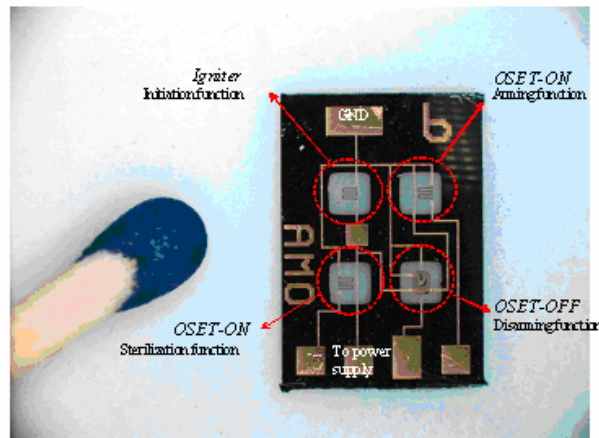


Figure 38. Photo de l'amorce complète en position veille sécurisée

L'assemblage de l'initiateur avec la protection mécanique nécessitera deux ou trois substrats de silicium supplémentaires tel que le montre la Figure 39. Nous proposons de suivre une approche microsysteme tout intégrée silicium car les contraintes de coût des applications militaires sont compatibles avec l'utilisation du silicium. Ainsi, le choix d'une approche assemblage tout silicium présente des avantages:

- tout d'abord elle permet de tirer profit des propriétés mécaniques du silicium bonnes et maîtrisées,
- ensuite elle facilite l'intégration des capteurs (accéléromètre, température...), de l'électronique, micro relais et de l'initiateur,
- elle apporte une parfaite compatibilité des technologies de fabrication permettant ainsi un très bon interfaçage et sûrement un niveau d'intégration plus important,

- et enfin, on peut espérer ainsi une bonne fiabilité des assemblages sachant qu'ils seront qui seront soumis à des accélérations et gradients thermiques importants.

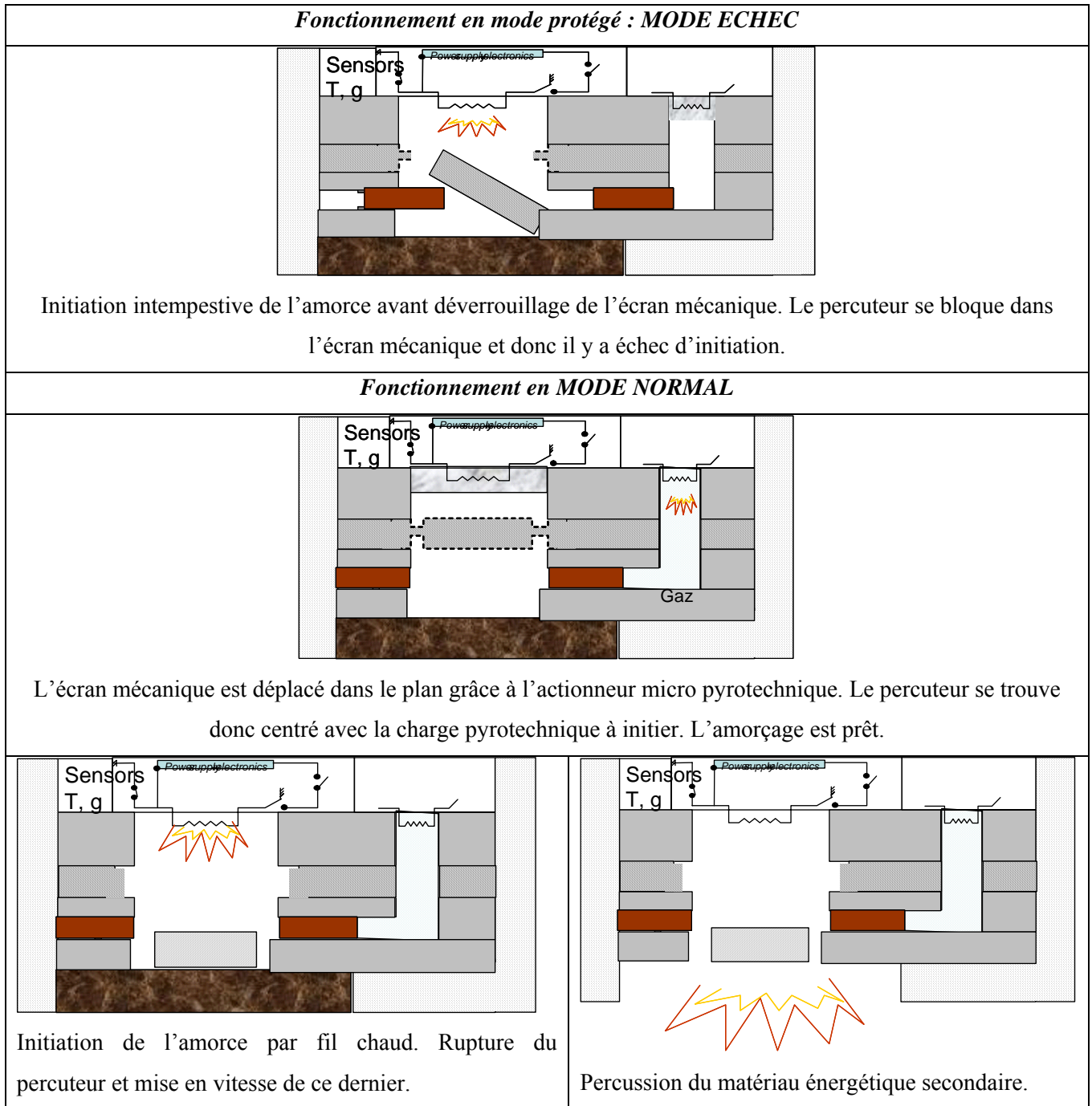


Figure 39. Design et illustration du fonctionnement de notre dispositif de mise à feu miniature hautement sécurisé : en mode échec et en mode normal

Cette approche est en cours de validation en termes de dimension, performances attendues conformes aux exigences de la DGA et faisabilité technologique.

2.6. Validation du microsysteme initiateur sécurisé sur silicium

Des caractérisations ont été mises en œuvre pour valider le bon fonctionnement :

- de chacun des micro relais : avant, pendant et après actionnement,
- des fonctionnalités de l'amorce conçue conformément aux spécifications qui ont été définies : armement, dé-armement, stérilisation.

En résumé,

1. le micro relais normalement ouvert est bistable et nécessite 500mW pendant 20ms pour passer à l'état fermé. La rupture de la piste est réussie à 90% en utilisant un propergol double base. Ce résultat peut être amélioré en travaillant sur le matériau énergétique et sur le design du micro relai en positionnant par exemple la piste à rompre sur la résistance chauffante et non pas à côté.
2. le micro relais normalement fermé est aussi bistable et requiert 200mW pendant 15s pour passer à l'état ouvert. Dans la configuration du démonstrateur, la résistance électrique résultante de la formation de l'intermétallique entre les deux pistes de cuivre et la bille de Sn est de 0.008ohm. L'isolation électrique à l'état fermé (avant formation de l'intermétallique) est validée pour des tensions appliquées allant jusqu'à 100V.

Les résultats très encourageant de ces caractérisations ont été publiés [23] et ne seront donc pas repris dans ce manuscrit.

2.7. Conclusion

En proposant une micro amorce tout silicium doublement sécurisée, nous avons répondu aux doubles déficits exprimés par la DGA :

1. la sécurisation électronique de la mise à feu ; notre système permet de maîtriser et sécuriser la mise à feu de l'explosif par l'ajout de micro relais mono coups, bistables, commandables électriquement,
2. la sécurisation de l'intégration et du montage par les manipulateurs ; nous proposons un écrantage mécanique en silicium cassable qui permet tout d'abord,
 - a. en cas de défaillance de la sécurisation de l'initiateur, de prévenir l'initiation de la charge pyrotechnique.
 - b. Lors de l'armement définitif, il sert de percuteur à la charge pyrotechnique.

Ainsi, le système obtenu est très compact (gain de 100 par rapport à la technologie classique), répond à une réelle demande dans les dispositifs de mise à feu miniatures, autonomes et hautement sécurisés. Le choix d'une intégration tout silicium facilite l'intégration de composants de type capteur,

accéléromètre et de l'électronique. L'utilisation d'une pièce mécanique en silicium comme écran et percuteur est une innovation tout à fait intéressante car elle remplit deux fonctions simultanées en fonction de l'état du système (veille ou amorçage) et amène ainsi un gain de poids et place et de sécurité intéressant.

3. Le micro amorçage « intelligent » pour les applications civiles

Pour les armes de loisir, la sécurisation concerne essentiellement le verrouillage par codage ou biométrie et déverrouillage de l'amorce si les conditions d'utilisation sont approuvées.

D'autres contraintes très pénalisantes et inhérentes à l'application sont à prendre en compte pour la conception:

- l'opération d'identification de l'utilisateur doit être doublement vérifiée,
- les délais de mise à feu (entre l'ordre et l'initiation de la poudre) sont très courts (<30ms),
- l'énergie d'initiation est restreinte car l'amorce est un système miniature et embarqué (dans la douille),
- la communication entre la douille et l'arme est sans fil pour des raisons évidentes de configuration de l'environnement de la douille,
- le système sans fil doit permettre de transmettre les codes pour le verrouillage/déverrouillage ainsi que l'énergie à l'initiation de la poudre,
- et enfin, le coût de l'amorce doit être extrêmement réduit pour garder la compétitivité par rapport aux amorces simples par percussion actuelles.

Là se situe un vrai déficit technologique pour réaliser un système d'amorce miniature (<9mm) ayant des capacités de communication, de traitement d'information (codage/décodage, décision), de stockage de l'énergie (avant mise à feu) et répondant à des critères de coût extrêmement contraignants. Ce déficit, concevoir et réaliser une micro amorce « intelligente », qui nous a été posé par FN Herstal³⁰ en 2001, se situe à deux niveaux du système:

1. **au niveau de la technique d'amorçage.** Aujourd'hui et depuis des siècles, les douilles sont amorcées par percussion mécanique (cf. Figure 40). Il faut reconsidérer cette technique et mettre en œuvre des mises à feu électriques permettant la compatibilité avec des fonctions électroniques de codage, stockage et traitement.

³⁰ www.fnherstal.com : industriel de l'armement Américano-Belge

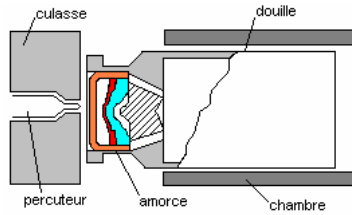


Figure 40. Architecture avec amorce traditionnelle petit calibre

2. **au niveau de la mise en œuvre technologique** : les technologies manufacturières classiques bien maîtrisées par les fabricants d'arme à feu depuis des siècles trouvent là leur limite. Seules les micro technologies -de part leurs atouts bien connus- permettent d'envisager de faire cohabiter les fonctions de communication, de mise à feu, de traitement...dans un volume $< \text{cm}^3$.

Nous avons essayé d'apporter des éléments de réponse technologique à ces deux problèmes en concevant et validant dans les principes une micro amorce « intelligente » hybride.

3.2. Le système d'amorce proposé par le LAAS

Le système complet est constitué de deux parties (cf. Figure 41): une partie primaire qui contient la source d'énergie et l'électronique de codage et décodage. Cette partie, intégrée dans l'arme, ne constitue pas de difficulté technologique car elle n'est pas soumise à des contraintes d'encombrement et de coût réduit. La deuxième partie appelée secondaire constitue la micro amorce « intelligente » et contient l'initiateur, la poudre, l'électronique de commande et le module de transfert énergétique. Seule la partie micro amorce intelligente a fait l'objet d'un effort de conception, de choix technologiques particulièrement réfléchis pour répondre aux contraintes et spécifications de l'application.

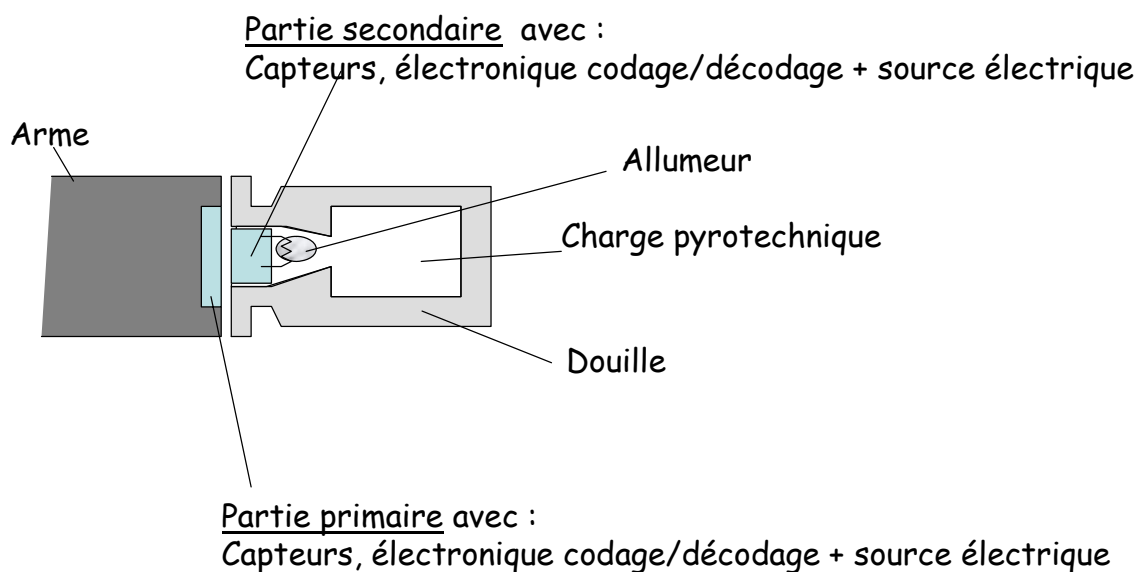


Figure 41. Schéma de principe du concept SMARTINT

La Figure 42 donne l'architecture de notre approche qui comprend 3 couches superposées :

- une couche supérieure comprenant l'initiateur et les composants électroniques,
- une couche inférieure de transmission puissance et signaux assurant l'alimentation électrique transitoire et les interactions avec l'outil opérateur,
- Entre les deux, les interconnexions métalliques et le blindage assurant un rendement de transfert électromagnétique suffisant même en milieu conducteur.

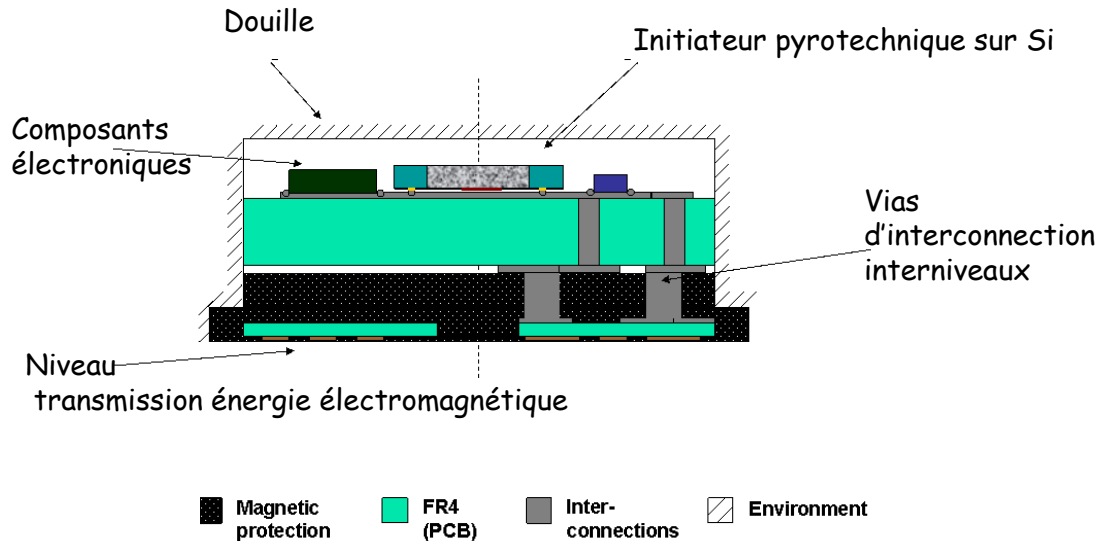


Figure 42. Schéma de principe de notre approche SMARTINIT

Afin de valider que les objectifs de la micro amorce « intelligente » en terme de fonctionnalité, de coût et d'encombrement sont accessibles, pour ensuite proposer une technologie d'intégration microsystème, nous avons suivi plusieurs étapes dans la conception :

- La **conception système** allant jusqu'à la réalisation d'une **maquette électronique** sur table pour valider la faisabilité fonctionnelle (« intelligence » du système),
- La **conception « Microsystème »** en identifiant des technologies de fabrication et d'assemblage qui pourraient être retenues dans une étape de pré-industrialisation ; une maquette microsystème de la micro amorce a permis de valider les choix technologiques.
- Une analyse théorique et expérimentale permettant de choisir le meilleur mode de **transfert de l'énergie électrique qui est un point clé du projet** qui fixe la performance et le coût.

3.2.1. La conception système

Après un recensement des différentes techniques d'allumage électriques basse énergie et miniaturisées trouvées dans la littérature [17-21], nous avons choisi de mettre en œuvre, pour la démonstration sur maquette, la technologie d'initiation sur membrane $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ qui permet d'atteindre des niveaux d'énergies d'initiation très bas. Cependant, dans une deuxième étape, d'autres

supports que le silicium comme le plastique ou l'époxy peuvent être envisagés pour réduire encore les coûts de fabrication. Pour la partie électronique de sécurisation, d'abord, nous avons analysé les fonctions électroniques à intégrer pour répondre au cahier des charges et avons fait la conception électronique dans la définition des concepts sécuritaires qui conditionnent les technologies.

Le schéma de la Figure 43 détaille l'architecture électronique du système qui réalise les fonctions suivantes :

- **Authentification du porteur d'arme** par un code d'entrée à la mise en route,
- Compatibilité arme/cartouche par **l'envoi automatique d'un code entre secondaire et primaire,**
- Armement de la mise à feu par un **circuit élévateur de tension 3V→25V**, et chargement d'une capacité de stockage,
- Mise à feu par décharge électronique de la capacité.

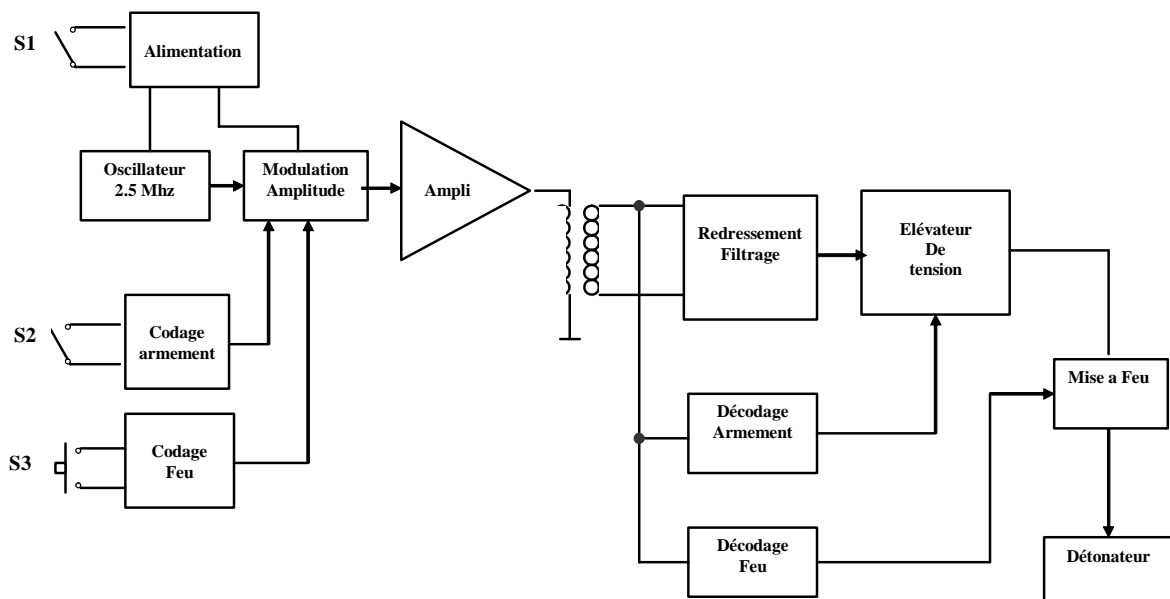


Figure 43. Synoptique du circuit électronique conçu et mis en œuvre sur circuit PCB³¹

Une maquette électronique sur table a été fabriquée et utilisée pour valider la conception système.

³¹ Printed Circuit Board

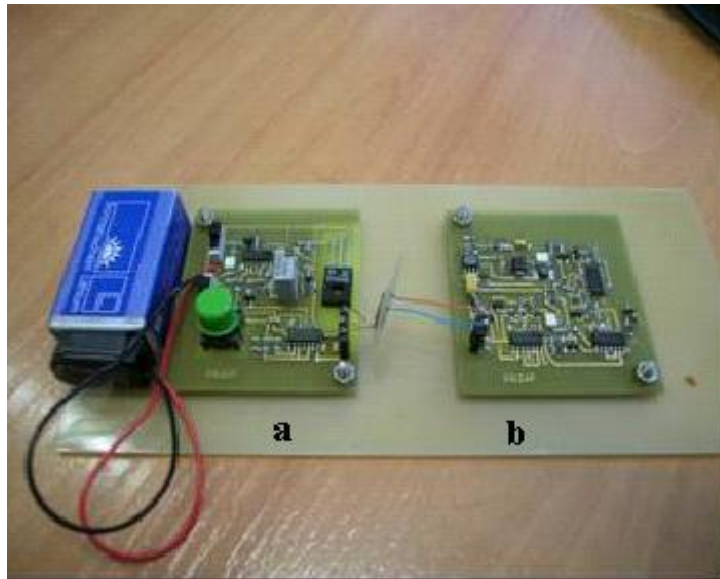


Figure 44. Photo de la maquette électronique de SMARTINIT sur circuit PCB

3.2.2. Le module de transfert de puissance

C'est un point clé de la faisabilité technologique de la micro amorce car le module de transfert de puissance fixera la faisabilité en terme d'encombrement, coût et capacité à intégrer les fonctions électroniques. Le niveau d'énergie électrique à transmettre est de l'ordre de 8 à 10mJ, dans un délai de l'ordre de 10 à 20ms. Après une analyse des différentes techniques de transmission de l'énergie sans contact (capacitif, électromagnétique haute et basse fréquence), nous avons opté pour le couplage magnétique pour la simplicité de mise en œuvre et son coût réduit: il suffit de réaliser des bobinages de fils de cuivre. Dans ce cas, le système de transfert d'énergie est constituée par deux enroulements, l'un « primaire » disposé sur l'arme, l'autre « secondaire » disposé sur la micro amorce « intelligente ». Deux sous options ont été considérées dont l'une à basse fréquence pour limiter les pertes par courants de Foucault et l'autre dans les hautes fréquences (>MHz). Nous avons choisi d'explorer plus précisément la voie haute fréquence qui permet d'envisager la réalisation de bobines à plat avec quelques tours de fils et d'obtenir des selfs de l'ordre du microHenry à des fréquences de quelques mégaHertz. Les pertes magnétiques par courant de Foucault seront réduites par un blindage magnétique contenant de la ferrite.

3.2.3. La conception microsysteme

Le dernier point concerne le choix des technologies microsystemes et des matériaux pour mettre en œuvre l'assemblage terminal afin qu'il réponde aux contraintes d'encombrement, de coût et de fonctionnalité. Nous avons privilégié un assemblage hybride d'un inflammateur (initiateur pyrotechnique) avec des composants électroniques discrets (CMS³²) et un module de transfert

³² Composants montés sur Substrat

énergétique de type micro bobine planaire sur circuit PCB (cf. Figure 42 et Figure 44). Pour limiter les pertes de Foucault dans l'environnement métallique de la douille et de l'arme, les bobines ont été intégrées dans un moule de silicone chargé en particules de Ferrite (1/1). Les interconnexions entre les trois niveaux sont réalisées au travers de vias prédéfinis.

Tous ces points (blindage, conception bobine plate) ont constitué une innovation importante car aucun système de transmission de puissance (>250mW) miniature n'avait été jusque là réalisé dans un encombrement aussi réduit [24].

La Figure 45 montre une photo d'un démonstrateur de micro amorce assemblé suivant le principe schématisé sur la Figure 42 qui a permis de valider le concept et les technologies.

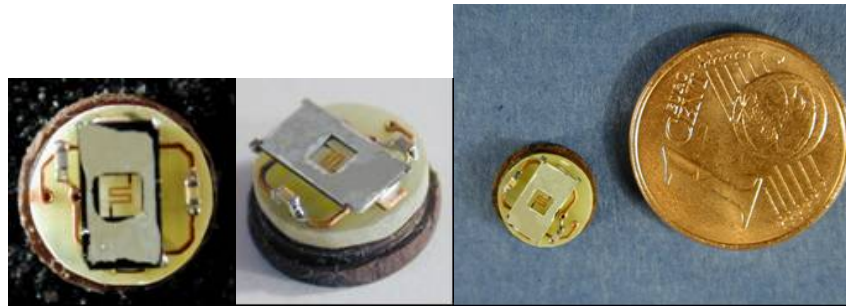


Figure 45. Photo du démonstrateur de la micro amorce SMARTINIT [24, 25]

3.2.4. Principaux résultats

La microamorce hybride Si/FR4/PDMS+ferrite a été testée pour en évaluer ses performances et en valider le concept technologique [25]. Les résultats des caractérisations ont montré que l'option de transfert électromagnétique HF (13.56MHz) est possible en consacrant un travail important sur le blindage magnétique pour limiter les courants de Foucault. Ils ont aussi permis de valider la technologie d'intégration consistant à utiliser de bobines à plat sur circuit imprimé et d'une électronique intégrée incluant un micro initiateur pour lequel il faudra optimiser les échanges thermiques (fil chaud ou autre) pour éviter la surconsommation électrique. L'estimation de la complexité système a été appréciée par la maquette réalisée ou toutes les fonctions sécuritaires ont été câblées et validées. Au bilan, les faisabilités système et technologiques ont été démontrées. Les résultats sont encourageants mais perfectibles puisque nous obtenons des rendements de transmission d'énergie de 50% à 13.56MHz alors calculé à 70%.

3.3. Conclusion

L'originalité de notre approche tient fondamentalement au concept lui-même, capable d'identifier l'opérateur et de ne réaliser la mise à feu qu'après vérification par un système de diagnostic évaluant la conformité complète : opérateur et procédure. L'application de ce concept suppose que l'initiateur embarque une capacité de calcul, une procédure mémorisée servant de référence et un algorithme de diagnostic évaluant la conformité et gérant la mise à feu. **L'originalité tient aussi à la technologie de réalisation** qui permet la miniaturisation en utilisant les technologies microsystèmes et microélectronique: micro initiateur sur silicium usiné, assemblage de puces électroniques en CMS, réalisation de micro bobine sur circuit imprimé pour le transfert électromagnétique et assemblage 3D en couches superposées moulées.

Notre analyse a montré que les objectifs de développement d'une micro amorce « intelligente » sont accessibles mais qu'il faudra y consacrer un travail important tant sur **l'intégration technologique** que sur la conception et **la mise en œuvre de module de transfert de puissance performant** pour atteindre les objectifs de puissance, de coût et d'encombrement donnés par l'application.

4. Conclusions et perspectives

Pour les deux applications, le défi qui nous a été proposé par la DGA et FNHerstal a été de miniaturiser et sécuriser un système d'amorce pyrotechnique :

- en position de veille, aucun événement extérieur (de nature électromagnétique, humaine ou autre) ne doit pouvoir initier la mise à feu,
- sur décision de plus haut niveau (système ou opérateur), on doit pouvoir déverrouiller rapidement cette sécurité et permettre l'opération de mise à feu.

Nous avons -à partir des technologies micropyrotechnie disponible au LAAS- proposé et développé une filière technologique compatible pour la commande et la sécurisation d'amorces pyrotechniques.

Pour les applications militaires, nous avons suivi une intégration tout silicium permettant d'intégrer sur une ou plusieurs puces de silicium les fonctions d'initiation, sécuritaires (micro relais), les capteurs, l'électronique. Alors que pour les applications civiles, une intégration microsystème hybride a été suivie pour des raisons de coût.

Dans les deux cas, nos contributions ont montré qu'il est possible :

- de réduire grandement les dimensions des amorces classiques aujourd'hui basées principalement sur la percussion mécanique,
- d'améliorer la sécurisation des amorces en intégrant de l'électronique ou des composants MEMS pour coder, décoder, interrompre... la commande de l'amorçage.

Nos approches sont extrêmement intéressantes car elles **ouvrent la voie à l'intégration totale des systèmes de mise à feu qui à terme représentera une avancée considérable dans le domaine de l'amorçage sécurisé.**

CONCLUSION, STRATEGIE GENERALE ET PROGRAMME DE TRAVAIL

Dans les années 90, alors que naissait le concept de microsystème, l'étude d'un dispositif d'administration transdermique de médicament nous a conduit à proposer un nouveau champ de recherche : la micropyrotechnie et les pyroMEMS.

L'idée de base se résume à l'intégration sur silicium de matériaux très énergétiques libérant leur énergie à un niveau de température propre au matériau. Sa mise en œuvre sur une plate-forme micro usinée a contribué très efficacement au succès, d'abord dans l'administration de médicament où sont apparus de nouveaux concepts sur l'injection sans aiguille, ensuite avec la micropropulsion pour l'espace où nous avons déposé un brevet avec le CNES et plus récemment avec le micro amorçage sécurisé où nous avons déposé un brevet avec NOVATEC.

De part la très forte énergie embarquée dans un pyroMEMS, cette idée a suscité très vite un vif intérêt dans la communauté académique internationale mais aussi dans l'industrie où émergent des applications grand volume de type air-bag. Durant ces dix dernières années, de nombreux travaux ont été publiés dans le monde qui ont été identifiés et commentés dans ce document. Nous avons, nous même, apporté une contribution que nous pouvons résumer comme suit.

Jusqu'aux dernières décennies du siècle dernier, les applications pacifiques de la pyrotechnie se réduisaient à la dynamite pour les travaux publics, aux feux d'artifices, et aux cartouches de chasse. Une révolution lente a eu lieu, puisqu'en 50 ans, la pyrotechnie miniaturisée s'est introduite dans notre vie quotidienne. Ce phénomène s'est particulièrement accéléré dans les 10 à 15 dernières années avec :

- ◆ Les coussins gonflables et prétensionneurs de ceintures de sécurité,
- ◆ Les balises SOS pyrotechniques,
- ◆ Les systèmes d'injections thérapeutiques basées sur la pyrotechnie,
- ◆ Les fusées de pluie avant qu'elle ne se transforme en grêle,
- ◆ Les dispositifs de sécurité pyrotechniques.

En parallèle de cette diversification des applications civiles de la pyrotechnie, les systèmes pyrotechniques ont suivi la tendance générale de miniaturisation et de complexification comme nous l'avons mentionné dans la première partie de ce mémoire. Les avancées les plus spectaculaires en micro pyrotechnie sont intervenues dans le domaine de la sécurité automobile : l'airbag consiste en un matériau pyrotechnique spécifiquement élaboré pour les effets souhaités et cohabitant avec un système multi capteurs (température, accéléromètre, force) comprenant aussi un actionneur thermique et bien sûr l'électronique. Les domaines de la sécurité et de la santé sont tous aussi concernés comme nous l'avons vu dans la deuxième partie, confirmant le caractère très dual d'une discipline technologique jusque là essentiellement cantonnée à la Défense et à l'Espace. Notre activité recherche s'est donc inscrite naturellement dans cette évolution et a été suscitée par les besoins des applications.

Au terme de ces dix années de recherche, des savoir-faire et une compétence certaine ont été acquis au LAAS dans le domaine de la micropyrotechnie et du micro actionnement embarqué à partir de matériaux énergétiques. Nous avons réussi à mettre en place les principes de base de cette discipline pour des micro actionneurs de taille millimétriques.

Un certain nombre d'objectifs ont été atteints :

♦ **Des procédés de fabrication ont été standardisés et une plate-forme technologique est disponible pour le prototypage de micro actionneur pyrotechnique** comprenant la réalisation de plates-formes chauffantes sur membranes très performantes, de réservoir en silicium ou Foturan et des structures plus complexes comme les microtuyères silicium.

♦ **Les mécanismes de base mis en jeu en micropyrotechnie millimétrique sont assimilés et nous avons aujourd'hui quatre plates-formes de modélisation et de conception disponibles pour le prototypage de micro actionneurs pyrotechniques:**

- o μ PROPULSEUR_UNIT. Ce logiciel sous matlab avec interfaçage SIMULINK permet rapidement de faire de la conception systématique et de prédire les performances en dynamique de micropropulseurs à propergol solide en fonction des caractéristiques géométriques et du propergol.
- o μ ACTIONNEUR_UNIT. Ce programme en Fortran permet de faire la conception des micro générateurs de gaz pyrotechniques et de calculer le volume de matériau énergétique à intégrer en fonction des caractéristiques de l'actionneur et de son environnement.
- o μ COMB. Ce programme écrit sous matlab permet de prédire en fonction de l'environnement et des caractéristiques énergétiques d'un matériau choisi, ses limites de combustion. Il permet alors de choisir, en fonction de la taille du système, les matériaux de structures et le matériau énergétique.
- o μ INIT est un programme écrit en fortran qui permet de prédire à partir des caractéristiques géométriques de l'initiateur et de la puissance d'alimentation, les courbes d'initiation (échauffement du matériau énergétique en fonction du temps et de l'épaisseur). Bien sûr cette plate-forme est adaptée à la conception de micro initiateurs sur membrane $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$.

♦ **Nous avons essayé, compte tenu du contexte économique, de développer plusieurs dispositifs innovants** pour des domaines d'applications variés qui sont la santé (injection de médicament), le spatial (micropropulsion), le militaire (micropropulsion, micro amorce sécurisée) et

le civil (systèmes de sécurité, micro génération électrique...). Certain d'entre eux ont abouti à des produits industriels comme le système d'injection de médicament ou sont à un niveau de maturation technologique suffisant pour être transférés.

Si l'on trace le bilan, la micropyrotechnie a été un axe de recherche fort de part les défis scientifiques, technologiques qu'elle a soulevés et les applications variées qu'elle a générées. Mais aussi, en 10 ans, elle a connu d'importants progrès et évolutions : **miniaturisation extrême et complexification des systèmes**. Le micro actionneur pyrotechnique qui a été développé en 99 avait un volume de quelques mm³ et consiste en un composant unique fabriqué et reporté ensuite dans un système macroscopique; aujourd'hui pour des applications similaires, les dimensions sont réduites en dessous du mm³ et les systèmes sont des plates-formes multi fonctionnelles ou cohabitent des opérations mécaniques, chimiques, fluidiques, thermiques, électroniques... La micropyrotechnie doit donc évoluer pour s'adapter à ce besoin si elle veut continuer à vivre et répondre au besoin sociétal.

Notre avis est qu'il faut viser l'intégration de fonctions nano actionnements pyrotechniques multiples et mettre au point les technologies pour faire les faire cohabiter avec d'autres fonctions fluidiques, électroniques, mécaniques et chimiques. Ce qui amène de nouveaux défis scientifiques et nécessite de lever de nouveaux verrous technologiques qui constituent les axes de notre programme de travail à venir.

- la maîtrise de la réduction des dimensions (<mm), pour garder des systèmes puissants et intégrables dans des systèmes de plus en plus complexe,
- les choix et synthèse de nouveaux « micro matériaux énergétiques » qui conditionneront les performances et la capacité des nouveaux actionneurs. C'est un point extrêmement important.
- l'intégration technologique multi- matériaux, multi-process est une issue technologique qui n'est pas complètement résolue.

Pour répondre à ces 3 points, les défis scientifiques se situent au moins à trois niveaux :

- o la **maîtrise des mécanismes de base pour gérer finement l'énergie d'actionnement** afin d'obtenir des nano actionneurs précis, contrôlables et ajustables en pression et température. Des effets de température négligeables au mm³ deviennent nuisibles au μm³. Une compréhension fine des phénomènes mis en jeu pour l'actionnement est nécessaire si l'on veut atteindre les objectifs de précision et d'intégration. Il faudra donc mettre en place des modèles multiphysiques et multi-échelles complexes inexistant actuellement qui permettront à terme de faire de la conception précise.

- o la **recherche et la synthèse de nouveaux matériaux énergétiques** nano composés à partir de la chimie des matériaux pour obtenir des matériaux très performants mêmes aux très petites dimensions. Deux équipes américaines méritent d'être mentionnées pour leur travaux sur l'élaboration en couches très minces (quelques couches atomiques) de composés métalliques à base de $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}$ à partir des nanotechnologies. Leur réaction de type $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al} \rightarrow \text{Fe} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \Delta H$ est très énergétique ($\Delta H = 0.4\text{J}/\text{cm}^2$) et permet donc pour la réalisation de nano actionneurs thermiques embarqués puissants. Ces travaux sont très récents (2004 et certains sont en cours de parution) et ouvrent sans aucun doute la voie de l'intégration d'actionneurs thermiques pour demain. Un programme de recherche aussi ambitieux pour le micro actionnement mécanique amènerait des progrès intéressants dans le nano actionnement embarqué de précision.

- o **L'intégration micro technologique 3D** et l'intégration système est naturellement issue de la réduction des dimensions et de la volonté de faire cohabiter différentes fonctionnalités ou/et matériaux. C'est sûrement un des points technologiques centraux et parmi les plus difficiles. La problématique de l'intégration n'a été que très peu abordée au cours des 10 ans précédents car les dimensions des systèmes permettaient de faire du report de puce. Maintenant, faut-il favoriser une intégration monolithique tout silicium ou s'orienter vers des intégrations hétérogènes? Une réponse définitive serait risquée puisqu'en fonction des applications les deux options seront envisagées. Ce point s'appuiera bien sûr sur les micro/nanotechnologies disponibles au LAAS.

Notre vision à long terme est que la micropyrotechnie s'insère totalement dans une démarche d'intégration microsysteme.

Notre stratégie générale

En considérant les microsystemes comme un secteur technologique en évolution, caractérisé par une tendance à l'intégration de technologies multiples pour pouvoir réaliser des microsystemes multifonctionnels de plus en plus complexes, nous voyons l'apport de notre technologie et des pyroMEMS de deux manières complémentaires :

A. l'une est de positionner la micropyrotechnie au centre de la filière technologique, comme nous l'avons fait avec les exemples de la sécurité de mise à feu ou de

l'amorce intelligente. Pour progresser dans cette voie, au-delà du « pixel pyrotechnique », nous avons apporté deux éléments principaux dans nos travaux antérieurs :

- les matrices de « pixels technologiques » qui permettent de dépasser le blocage du mono coup d'actionnement et d'envisager des commandes proportionnelles et répétitives. Certes, il y a des limites à cette approche mais nos propositions peuvent ouvrir à des applications nouvelles.
- Les « logiques pyrotechniques » qui permettent de configurer un circuit de commande électrique et de le sécuriser. La définition de relais (off-on, on-off) ouvrent de réelles perspectives pour la configuration de circuits ou pour la sécurisation de systèmes de commande dont la caractéristique est de pouvoir subir de long temps de stockage et être configuré avec un minimum d'énergie électrique.

De plus nous avons déjà exploré, avec l'intégration de diodes d'adressage [1], la compatibilité possible de la micropyrotechnie et des technologies microélectroniques. La micropyrotechnie n'ayant pas d'exigence de structure, toute la liberté est laissée aux opérations microélectronique pour autant qu'elles soient effectuées au début du procédé de fabrication du pyroMEMS.

Tout ça nous paraît ouvrir des perspectives à un mariage à long terme, extrêmement intéressant et attractif, entre nos technologies et les technologies silicium dans la gestion d'énergie. Nous y voyons trois axes d'application.

1. Les pyro actionnements thermiques.
2. Les pyro actionnements mécaniques.
3. La génération d'électricité.

1 & 2. Les pyro actionnements thermiques et mécaniques

Pour proposer dans ces deux axes, il faut dégager des sujets d'application où cette option technologique présenterait des avantages certains : la mise à feu intelligente et sécurisée paraît une application parfaitement adaptée à notre problématique. Elle concerne les applications militaires mais aussi civiles et spatiales.

Notre stratégie serait dans cet axe d'applications de monter un grand projet national où seraient associés des équipes de recherche et des utilisateurs multiples. Le projet aurait à définir une filière technologique que chaque utilisateur pourrait adapter aux spécificités de son domaine d'application.

3. La génération d'électricité

Il faut faire un cas particulier de cette application pour des raisons de stratégie générale que nous avons explicitée déjà à plusieurs reprises sur les microsystèmes autonomes

communiquant. L'énergie concentrée dans un matériau est considérable (0.5MJ/kg) comparée aux micro batteries et autres micro dispositifs de génération électrique. Face aux besoins en énergie, il paraît de bonne stratégie de transformer cette énergie stockée en énergie électrique.

Pour ce faire deux voies sont possibles :

- la voie thermique : des tentatives de conversion thermo électrique ont été proposées par le LAAS [2] et dans la littérature [3]. Notre système même si il n'a pas été finalisé faute de financement a permis d'établir une estimation de la performance possible pour la filière.

- la voie gazeuse. Le MIT dans les années 1998 a proposé les microturbin [4]. L'idée pourrait être de marier cette proposition à celle d'un générateur de gaz à partir d'un pyroMEMS. Dans l'état de nos connaissances, ces questions de microturbin ne sont pas encore réglées. Pour l'instant notre compétence interne nous conduirait à explorer davantage la voie thermo électrique dans la mesure où parallèlement à nos travaux, des travaux ont continué sur la détection Infra-Rouge par microsystèmes thermoélectriques Al/Si [5]. Si la demande externe le permet, c'est donc cette voie stratégique que nous privilégierons.

B. l'autre voie est de positionner la micropyrotechnie comme une technologie complémentaire utile à intégrer dans une filière plus ouverte à des objectifs variés.

Compte tenu des limitations que nous avons soulignées sur le nombre d'actionnements possibles, l'idée vient naturellement à l'esprit d'explorer le domaine médical où une grande partie des produits à développer doivent être « jetables » pour des raisons bien établies d'éviter toute contamination microbienne, bactérienne ou virale. L'idéal d'application que nous puissions envisager est celle de la Figure 46.

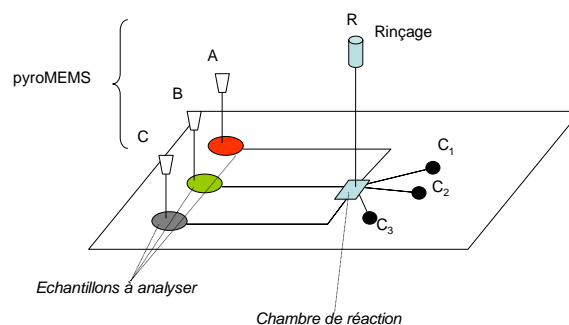


Figure 46. Exemple d'application des microactionneurs pyrotechniques pour le diagnostic jetable

Sur un substrat préparé avec différents agents biochimiques, on vient déposer un échantillon à analyser par des capteurs C_1 , C_2 , C_3 ... disposés dans une chambre de réaction ou à l'extérieur de la chambre (mesure optique sans contact par exemple). Sur l'exemple de la Figure 46, l'actionnement des fluides peut intervenir en A, B ou C, au moment choisi pour la mesure et en faisant en sorte que le système soit et reste hermétiquement clos. L'actionneur pyrotechnique va donc ici s'intégrer à une technologie dont la base est plutôt fluide. Dans l'état actuel des orientations prises au LAAS, la filière visée comporte des capteurs silicium, des micro canalisations « plastiques » (BCB, SU8) et des micro actionneurs pyrotechniques. Sur cette base, deux axes applicatifs peuvent être envisagés :

1. Le test en laboratoire sur « biopuces » et les « lab-on-chips » pour la santé et science du vivant.
2. Celui du test « in-vivo ».

1. Le test en laboratoire (Bio puce et lab-on-a-chip).

La contribution des pyroMEMS pourrait consister en **l'intégration dans des micro canalisations fluidiques de matériaux énergétiques à très fort rendement de gaz pour réaliser des microsources de pression et donc des micro actionneurs totalement intégrés.** L'intégration mais aussi la précision de l'actionnement, sont à notre avis les clés de l'émergence de cette technologie. Cette approche est séduisante car elle fait suite aux travaux d'injection de médicament et elle suscite de nouveaux défis et challenges technologiques (taille très réduite, problèmes de compatibilité technologique, précision) qui permettront à la micropyrotechnie de s'adapter aux nouvelles spécifications des systèmes.

2. La mesure « in vivo ».

L'axe paraît plus neuf et plus ouvert. Il est lié au développement de la chirurgie « mini invasive ». C'est une chirurgie où l'on pratique des incisions où l'on place un ... grâce auquel on peut entrer et sortir des micro instruments qui pourront travailler « in vivo ». Cette pratique peut se développer sur deux fronts :

- La mesure « in vivo » qui pose les mêmes problèmes généraux que les bio puces sinon que le prélèvement d'échantillon est simultané dans la mesure.
- La chirurgie qui peut nécessiter des besoins d'actionneurs puissants mais éloignés de toutes sortes de sources d'énergie : poser des micro agrafes, cautérisation.

Dans les deux cas, la dynamique de recherche est forte et notre volonté est d'en surveiller l'évolution des besoins pour y proposer nos solutions.

Notre programme de travail

Nous avons indiqué, dans la première partie de cette conclusion, les grands défis de recherche de base posés par le développement des pyroMEMS: **la maîtrise des phénomènes de base, le développement de nouveaux matériaux énergétiques et l'intégration 3D de plus en plus complexe**. Nous venons de voir plusieurs axes d'applications qui définissent aussi des options technologiques complémentaires.

Nous avons tenté de rassembler toute cette analyse sur un seul schéma de la Figure 47 pour en dégager une stratégie générale de progrès et identifier notre propre contribution.

Tout d'abord, notre idée est de se positionner en amont des applications, de maintenir et de renforcer l'activité consacrée à la modélisation et à la simulation. En effet, de nombreux mécanismes de base ont été imaginés et mis en œuvre qui n'ont pas de modèles « prédictifs » associés. Nous voulons progressivement construire une bibliothèque de modèles. L'objectif étant que cette bibliothèque puisse servir la demande de conception pyroMEMS que l'on développe au LAAS.

Nous souhaiterions que ce travail se développe dans une démarche multi-niveaux :

- le niveau moléculaire pour la description des matériaux énergétiques : nous savons que aux petites dimensions, la réaction ne peut s'auto entretenir et nous voudrions exploiter cette caractéristique pour définir des actionneurs thermiques contrôlés aux très basses dimensionnalités.
- le niveau composant, ce que l'on a appelé le pyroMEMS, pour la modélisation prédictive des mécanismes de base des composants en fonctions des choix de matériaux, de formes, des dimensions....
- le niveau système par l'implémentation de modèles permettant de faire le « prototypage virtuel » de nos systèmes complexes et multifonctionnels.

Quels que soient les choix applicatifs, cet objectif de modélisation sera maintenu.

Sur le plan des applications, nous ne sommes pas maîtres de nos choix dictés souvent par des actions contractuelles où nos intérêts scientifiques se mêlent avec les intérêts industriels. Pour autant que l'on puisse gérer les choses, notre idée est de suivre deux voies :

- celle d'une intégration où la pyrotechnie est maîtresse de la filière : ce serait le cas d'un système sécuritaire complètement intégré où l'on aborderait sérieusement l'empilement des plaques de silicium dans une perspective d'intégration monolithique. L'application choisie est celle de la sécurisation des amorces militaires (cf. Partie 2, exemple3).
- celle d'une intégration de micro actionneurs pyrotechniques embarqué dans la filière microfluidique pour l'analyse sur plates-formes multifonctionnelles pour les applications sciences du

vivant et santé. C'est un domaine d'application qui nous paraît rassembler tous les défis scientifiques et challenges technologiques mentionnés. C'est d'ailleurs un domaine d'application particulièrement stimulant et riche que nous avons choisi et qui fait l'objet d'une thèse de doctorat.

La maîtrise des mécanismes de base, la miniaturisation et l'intégration sont donc les axes qu'il convient d'approfondir et de privilégier dans les 5 prochaines années avec au centre le lancement de travaux fondamentaux sur les matériaux énergétiques nouveaux nanostructurés et intégrables sur silicium à partir des micro/nanotechnologies

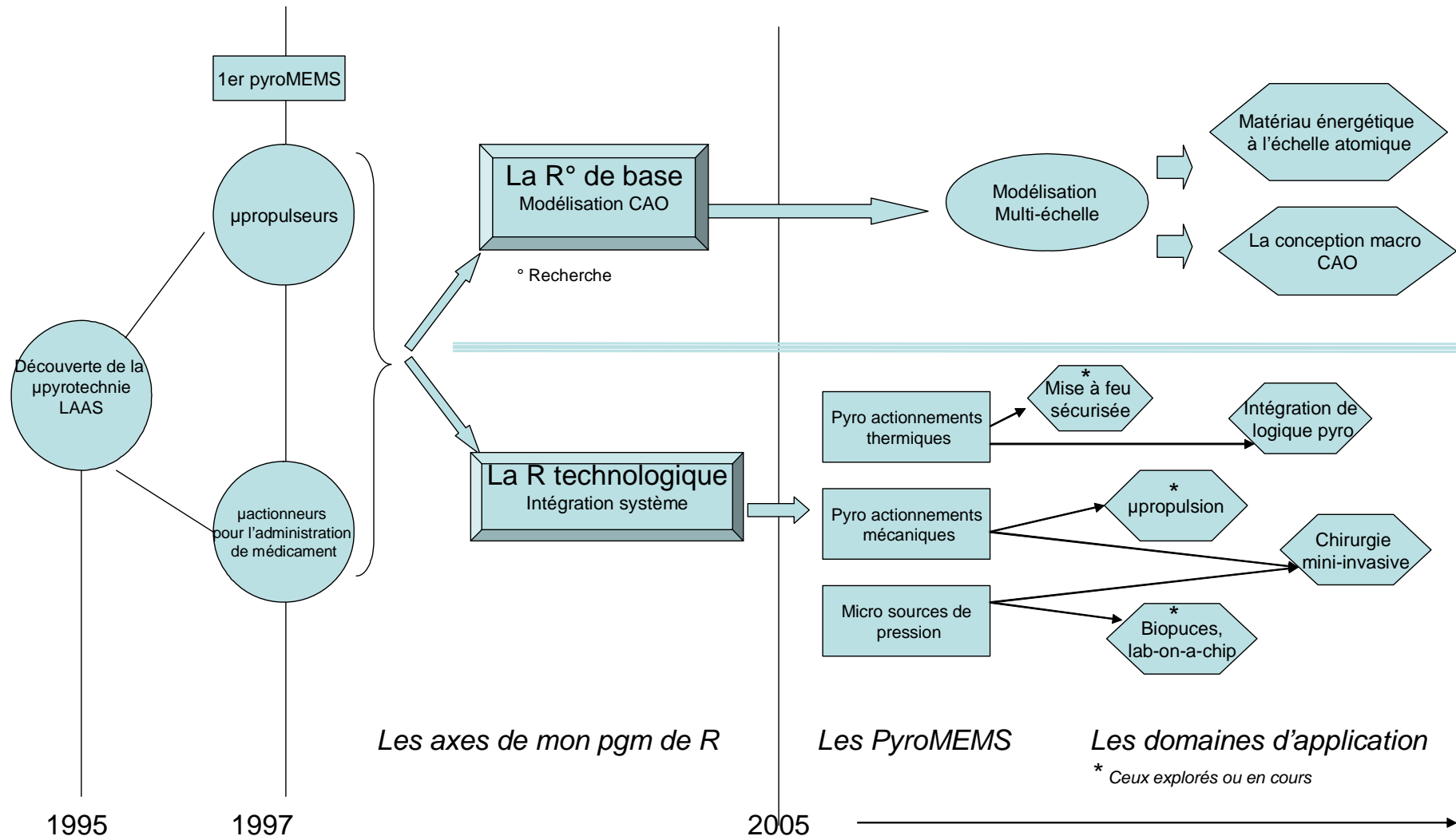


Figure 47. Diagramme : bilan et perspective de mon activité de recherche

II. CV,
PRODUCTION SCIENTIFIQUE,
FORMATION PAR LA
RECHERCHE

Curriculum vitae

Née en 1971 à Sète (34)

Mariée, 2 enfants

Ingénieur INSA, Docteur, chargée de Recherche au CNRS

LAAS-CNRS

7 ave du colonel Roche

31077 Toulouse cedex 4

tel. 05 61 33 63 01 fax. 05 61 33 62 08

mel. rossi@laas.fr

Etudes – diplômes

1997 Doctorat au LAAS-CNRS (UPR8001) à Toulouse (Mention très honorable, Félicitations du jury)

Titre : Conception et réalisation d'un système de réhydratation pour patch transdermique à partir de micro actionneurs pyrotechniques

Dir . Thèse : Dr. Daniel Estève

1994 Diplôme d'ingénieur INSA (Institut National des Sciences Appliquées) - Toulouse

1994 D.E.A Physique du Solide – Université Paul Sabatier – Toulouse

Expérience professionnelle

Depuis Chargée de recherche au LAAS animant une équipe de recherche (3 étudiants en
1998 thèse) sur la thématique de la micropyrotechnie pour la réalisation de micro et nano systèmes énergétiques embarqués.

Objectif de recherche: Explorer les nouvelles idées et les concepts innovants pour la réalisation de micro/nano actionneurs embarqués puissants pour l'actionnement microfluidique visant des applications santé et sciences du vivant.

1997-1998 Postdoct à Berkeley Sensors & Actuators Center from the University of California

Mentor: Prof. K.S. PISTER

Titre: Development of micropyrotechnic microrockets for smart dust applications

Distinction

Prix de l'innovation de la ville de Barcelone en 2004 (projet injection de médicament par moteur pyrotechnique)

Expertise scientifique

Membre du comité d'organisation et scientifique de la conférence CANEUS 2004

Expert et animatrice scientifique de l'Observatoire des Micro et Nano Technologie (OMNT) dans la thématique « micro sources d'énergie »

Coordinatrice du projet Européen (5^{ème} PCRD), μ pyros

“Reviewer” pour les revues Sensors and Actuators (Elsevier), Journal of Micromechanics and Microengineering (IoP), Journal of MEMS.

“Reviewer” pour les conférences internationales IEEE Microfluidique et CANEUS

Production scientifique

Revue scientifique internationale à comité de lecture

Design, fabrication and characterization of a MEMS safe pyrotechnical igniter integrating arming, disarming and sterilization functions

P Pennarun, C. Rossi, D. Estève, D. Bourrier, **J. Micromech. Microeng.** **16**, 92-100

Design, fabrication and operation of a wireless and miniature ignition system

Gustavo A. Ardila Rodriguez, Carole Rossi, Daniel Estève, **Sensors and Actuators A: Physical**, vol. 126, Issue 1, 26 January 2006, Pages 201-210

Final characterizations of millimeter scale pyrotechnical microthrusters

C. Rossi, D. Lagrange, B. Larangot, A. Chaalane, **Sensors and Actuators**, Vol 121/2 (2005) pp 508-514

Matrix of 10×10 addressed solid propellant microthrusters: review of the technologies

C. Rossi, M. Dumonteuil, T. Camps, D. Briand, Phuong Q. P., N. F. de Rooij, **Sensors and Actuators A: Physical**, Volume 126, Issue 1, 26 January 2006, Pages 241-252

Micropyrotechnics, a new technology for making energetic microsystems: review and prospective

C. Rossi, D. Estève, **Sensors and Actuators A120/2 (2005) 297-310**

Thrust stand for ground tests of Solid Propellant Microthruster

S. Orioux, C. Rossi, D. Estève, **Review of Scientific Instruments**, Vol. 73, Number 7, pp 2694-8, July 2002

Compact model based on a lumped parameter approach for the prediction of Solid Propellant Micro Rocket performance

S. Orioux, C. Rossi, D. Estève, **Sensors and Actuators A101 (2002) 383-391**

Design, Fabrication and Modeling of Solid Propellant Microrockets - Application to Micropropulsion

C. Rossi, S. Orieux, B. Larangot, T. Do Conto, D. Estève, **Sensors and Actuators A99 (1-2) pp 125-33, avril 2002**

Design, Fabrication and modeling of MEMS based microthrusters for Space Application

C. Rossi, T. DoConto, D. Estève, B. Larangot, **Smart Materials and Structures, 10 (2001) 1156-1162**

Prediction of the performance of a Si-micromachined microthruster by computing the gas flow inside the thruster

C. Rossi, M. Djafari Rouhani, D. Estève, **Sensors and Actuators A87 (2000) 96-104**

Pyrotechnic actuator: a new generation of Si integrated actuator

C.Rossi, D.Estève, C.Mingues, **Sensors and Actuators A74, 1-3, pp.211-215, Avril 1999**

Residual stress in low pressure chemical vaport deposition SiNx films deposited from silane and ammonia

P.Temple Boyer, C.Rossi, E.Saint Etienne, E.Scheid, **Journal of Vacuum Science and Technology A, Vol.16, N°4, pp.2003-2337, Jul/Aug 1998**

Realization, characterization of micro pyrotechnic actuators and FEM modelling of the combustion ignition, C.Rossi, D.Estève, P.Temple Boyer, G.Delannoy, Sensors and Actuators, Vol.A70, N°1-2, pp.141-147, Octobre 1998

Realization and performances of thin SiO2/SiNx membrane for microheater applications

C.Rossi, P. Temple Boyer, D.Estève, **Sensors and Actuators A, Vol.A64, pp.241-245, Janvier 1998**

Theoretical and experimental study of silicon micro machined micro heater with dielectric stacked membranes

C.Rossi, E.Scheid, D.Estève, **Sensors and Actuators A, Vol.63, N°3, pp.183-189, Décembre 1997**

Conférences invitées dans des congrès

Micropropulsion for Space - solid Propellant Technology

C. Rossi, **Space and Microsystem Workshop, San Francisco, 22-23 November 2001**

Development of Solid Propellant μ Rockets for Space application

C. Rossi, **Micro/Nano Technology Development for Aerospace Application, CANEUS 2002, 25-30 August 2002, Montreal**

MEMS based safe electro-thermal pyrotechnic igniter for a new generation of microfuze

C. Rossi, **SPIE conference on the Microtechnologies for the new millennium, 9-12 May 05, Sevilla, Spain**

Conférences internationales à comité de lecture - Proceedings

Main directions of solid propellant micro-propulsion activity at LAAS, A. Chaalane, C. Rossi, B. Larangot, D. Estève, CANEUS'04. Conference on Micro-Nano-Technologies for Aerospace Applications, Monterey (USA), 1-5 Novembre 2004

Miniaturization of solid propellant thrusters for space applications, D. Briand, Q. P. Pham, C. Rossi, N. DeRooij, 5th Round table on Micro/Nano technologies for space, 3-5/10/05, Noordwijk, Netherland

Development of MEMS based safe electro-thermal pyrotechnic igniter for a new generation of microfuze, P.Pennarun, C. Rossi, D. Estève, V. Conédéra, Proceeding of the SPIE conference on the Microtechnologies for the new millennium, 9-12 May 05, Sevilla, Spain

Ignition and combustion investigation on pyrotechnical solid microthruster, B. Larangot, C. Rossi, A. Chaalane, H. Granier, P.F. Calmon, 17th European Conference on Solid-State Transducers (EUROSENSORS XVII), Guimaraes (Portugal), 21-24 Septembre 2003, pp.744-747

Solid propellant thrusters for space application, Rossi, C; Briand, D., De Rooij, N.; Larangot, B., Chaalane, A., Conédéra V. Pham Q, 4th Round Table on Micro/Nano Technologies for Space, 20-22 May 2003, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands

Electronic Circuitry development in a Micropyrotechnic system for micropropulsion applications, M. Puig-Vidal; J. López; P. Miribel-Català; E. Montané; JM López-Villegas; J. Samitier, C. Rossi, T. Camps, M. Dumonteuil, Proceedings-of-the-SPIE-The-International-Society-for-Optical-Engineering. 2003; 5116: 260-9.

Design and implementation of a dedicated electronic circuitry to control the ignition of pyrotechnical systems, M. Puig Vidal, P. Miribel, E. Montane, S. Marco, M. Salleras, J. Samitier, C. Rossi, B. Larangot, A. Chaalane, **Design of Circuits and Integrated Systems Conference (DCIS 2003), Ciudad Real (ESPAÑA)**

Smart drug delivery system based on pyrotechnical actuation, M. Puig Vidal, J. Lopez, P. Miribel-Catala, J. Samitier, C. Rossi, **Proceedings of the SPIE The International Society for Optical Engineering, 2003; 5119:226-35**

Downscaling of solid propellant pyrotechnical microsystems, P.Q. Pham, D. Briand, C. Rossi, N.F. De Rooij, **Proceeding Transducers'03, June 8-12, 2003, Boston, p 1423-26**

Solid Propellant Micro-rockets – Towards a New Type of Power MEMS, 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, Nano, **AIAA Nanotech 02, Houston, Sept 9-11, 2002**

Solid propellant micro thruster: theory of operation and modelling strategy, E. B. Rudnyi, T. Bechtold, J.G. Berthold, C. Rossi, **Proceedings of the AIAA Nanotech 02, Houston, Sept 9-11, 2002**

Solid propellant microthruster: an alternative propulsion device for nanosatellite

B. Larangot, P. Dubreuil, V. Conédéra, T. Do Conto, C. Rossi, **Aerospace Energetic Equipment 2002, Avignon (France), 12-14 Novembre 2002, 10p.**

Micro propulseur propergol solide pour des applications spatiales, C. Rossi, B. Larangot, S. Orieux, D. Estève, **Colloque de la Société Hydrotechnique de France "Microfluidique", Toulouse (France), 3-5 Décembre 2002, pp.257-262**

Design, Fabrication and Modeling of Solid Propellant Microrockets - Application to Micropropulsion
C. Rossi, S. Orieux, B. Larangot, T. Do Conto, D. Estève, **E-MRS Symposium H: Materials Aspects in Microsystem Technologies, Strasbourg (France), 16-19 June 2001.**

Virtual prototyping of MEMS for Microsatellite : development of a micro-earth sensor and microthruster, J.Y Fourniols, C. Rossi, G. Soto-Romero, J. Simonne, G. Coste, T. Pain, J Alburquerque, A. Bardoux, **International Conference on Integrated Nano/Microtechnology for Space Applications (NanoSpace 2000), Houston (USA), 23-28 Jan 2000**

MEMS based microthrusters for microspacecraft applications, C.Rossi, D.Estève, N. Fabre, T. Do COno, V.Conédéra, D.Dilhan, Y.Guélou, **Proceedings of the Micro/Nanotechnology for Space Applications (MNT'99), Pasadena (USA), 10-15 April 1999**

Design, fabrication and thrust prediction of solid propellant microthrusters for space application
C.Rossi, N. Fabre, V.Conédéra, D.Estève, **Symposium SPIE on Design, Test, Microfabrication of MEMS and MOEMS, Paris (France), 30 March – 1 April 1999, pp.906-916**
Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering, 1999 pt. 1-2, 3680 : 906-16

Pyrotechnic actuator: a new generation of Si integrated actuator, C.Rossi, D.Estève, C.Mingues
E-MRS Symposium H: Materials Aspects in Microsystem Technologies, Strasbourg (France), 16-19 June 1998, 6p.

Nanosatellite in the microsystems world, D.Estève, J.Y Fourniols, N.Lestrade, C.Mingues, C.Rossi, J.Simonne, G.Vialaret, G.Coste, G.Corlay, **International Conference on Integrated Nano/Microtechnology for Space Applications (NanoSpace 98), Houston (USA), 1-6 Novembre 1998, 14p.**

Pyrotechnic micro actuators, C.Rossi, D.Estève, **11th European Conference on Solid-State Transducers (EUROSENSORS XI), Varsovie (Pologne), 21-24 Septembre 1997, Vol.2, pp.771-774**

Trends in microsystems applied to biomedical sensors
C.Bergaud, A.M.Gue, C.Rossi, J.Tasselli, D.Estève, **Franco-Japon Workshop "From nano to macroscale science and technology through microsystems", Tokyo (Japon), 21-23 Mai 1997, 8p.**

Technologies for dimensional mastering in biomedical microsystems, D.Estève, C.Rossi, A.Akheyar
18th IEEE Engineering in Medicine and Biology Society Conference, Amsterdam (Pays-Bas), 31 Octobre - 3 Novembre 1996, 4p.

New generation of silicon based microthrusters for space application, C. Rossi, B. Larangot, D. Estève, Y. Guélou, F. Bourrières, C. Kaiser, D. Dilhan, **Third International Conference on Spacecraft Propulsion, SP – 465, 2000 : 229-33**

Contribution à des ouvrages

A survey of MEMS based micro thrusters and their solid propellant technology

Carole Rossi

Sensors Update volume 10, Wiley, Janvier 2002

Colloques sans comité de lecture

Conception and realisation of microthrusters array for microsattellites attitude control

B. Larangot, C. Rossi, S. Orioux, Journées Micro et Nanotechnologies, Paris (France), 13-14 Novembre 2001

Les matériaux énergétiques comme source d'énergie embarquable, Etat de l'art, bilan et perspective,

C. Rossi, OMNT (Observatoire Micro et NanoTechnologies) , 02 juin 05, Grenoble

Générateur thermoélectrique basé sur la combustion d'un propergol solide

C. Rossi, Journées Nationales du Réseau de Recherche en Micro et Nano Technologies, Lille (France), 3-4 Novembre 2003

Quels challenges pour la micropropulsion spatiale de demain ?

C. Rossi, Journées CCT-MTCE, CNES, Toulouse, le 14-16 juin 05

Brevets

- ◆ Dispositif embarqué hautement sécurisé de mise à feu intégrant des micro interrupteurs pyrotechniques monocoups prévus à cet effet, Brevet en cours de dépôt
- ◆ Vanne miniature pour le remplissage du réservoir d'un appareil d'administration transdermique de médicament - Brevet FR9614230 / EP97947111.7
- ◆ Vanne miniature et son procédé de fabrication - Brevet FR9706613
- ◆ Système de micro propulsion à poudre et procédé de réalisation d'un tel système de micropropulsion - Brevet FR 99.07626
- ◆ Actionneur à base de micro impulseurs pyrotechniques, Brevet FR2811036 et EP1295043 et WO0201078

Participation à des articles dans des revues de vulgarisation

Micropyrosystems for Generating a Mechanical Force, MST News, N°3, June 04

La micropropulsion pour l'espace , Air et Cosmos N° 1867, 29 Novembre 2002

Little bangs, Scientific American , November 1998

Pyrotechnic materials integrate with micromachined silicon to produce space probes, *OE, SPIE, August 1998*

La micropropulsion s'adapte aux petits satellites, L'usine Nouvelle, 21 octobre 1999

La "micropyrotechnie" ... vers des microsystèmes silicium très énergétiques : les MICROPYROSYSTEMES, Micronora information (revue du salon international des microtechniques), Mars 200, N° 81

Rocket Chips to Propel small satellites, Kimberly Patch and Eric Smalley, TRN, January 30, 2002

Autres - rapports de contrats

C. Rossi, A. Chaalane

Définition de micropropulseurs à base de Silicium pour le contrôle d'assiette des drones,

Rapport LAAS 04596, Contrat PROTAC, Novembre 2004, 14p.

Conception d'une "amorce intelligente" par couplage magnétique HF et compatible douille 9 mm.

Réalisation d'une maquette de validation de concept

C. Rossi, G. Ardila, D. Estève

Rapport LAAS No03309 , Contrat SMART INIT, Juin 2003-2004

Assessment study on the capability of solid propellant thruster to respond to small satellite station keeping

C. Rossi, G. Ardila

Rapport LAAS N°02263 Contrat ESA N°15845/01/NL/PA, Octobre 2003, 53p.

Specification and design of a drug delivery device using a pyrotechnic gas generator

C. Rossi

Rapport LAAS N°02237 - Rapport contrat ESA 15780/00/NL/JD

Modèle analytique pour l'étude de micropropulseurs silicium

S. Orioux, C. Rossi

Rapport LAAS, N°01522, Nov 2001, 28p

Etude de micropropulseurs sur silicium

C. Rossi

Rapport LAAS, N° 00564 – Rapport de contrat CNES 712/99/CNES/8033/00

Développement de matrices de micropropulseurs intégrées sur silicium pour des applications spatiales

C. Rossi

Rapport LAAS No03268 - Contrat Région RECH/99001197, Juin 2003, 15p.

Formation par la recherche / Activité d'encadrement

Post-Doctorat

Nom - date	Sujet de recherche	Financement	Encadrement
Stéphane Orieux Oct 99-oct 00	Développement de module de micropropulsion	CNES	100%
Axel Berthold Dec. 00, Juin 03	Conception, fabrication et caractérisation d'un module thermoélectrique à partir de la combustion de propergol	Européen	100%

Doctorat

Nom - date	Sujet de recherche doctorat	Bourse	Encadrement
Benoit Larangot Oct 99, Jan 04	Conception, fabrication et caractérisation de matrices de micropropulseurs pyrotechniques sur silicium	MENRT	70%
Amar Chaalane Oct 02, Jan 06	Conception, fabrication et caractérisation de matrices de micropropulseurs pyrotechniques sur silicium pour la correction d'assiette des drones	MENRT	70%
Pierre Pennarun Depuis oct 03	Conception et développement d'une micro amorce pyrotechnique sécurisée sur silicium	DGA	70%
Gustavo Ardila Depuis oct 04	Développement de micro sources de pression totalement intégrables à partir de pyroMEMS pour l'actionnement micro fluïdique	MENRT	100% (Dérogation)

DEA – MASTER DE RECHERCHE

Nom - date	Sujet de recherche doctorat	Encadrement
Jérôme Galy 02-06 1998	Etude de micropropulseur	100%
Benoit Larangot 02-07 1999	Fabrication technologique d'initiateurs pour micropropulseurs et test de résistance à l'arrachement d'une résine époxy	100%
Amar Chaalane 02-07 2002	Dimensionnement de matrices de propulseurs à propergol solide pour réaliser le maintien à poste et la manœuvre de désorbitation de nanosatellites sur orbites circulaires basse	100%
Pierre Pennarun 03-08 2003	Modélisation et optimisation numérique de micro initiateurs pyrotechniques	100%
Gustavo Ardila 02-08 2004	Développement d'une amorce pyrotechnique sans contact	50%
Jorge Curtidor 01-09-2005	Réalisation de matrice de micro actionneurs pyrotechnique adressée pour validation spatiale	100%

DESS- MASTER PROFESSIONNEL

Nom - date	Sujet de recherche doctorat	Encadrement
Nicolas Cavalié 04-06 2005	Caractérisation de microswitches ON-OFF et OFF-ON et caractérisation de micropropulseurs	100%

Gestion de contrat

PYRAC: Projet ANR

Durée : dec 2005 - dec 2008

Titre: Nouvelle génération d'actionneurs embarqués basés sur la décomposition contrôlée de matériaux énergétiques ; intégration microsystèmes pour l'instrumentation en chimie et biologie

Responsable projet : Carole Rossi - LAAS

Partenaires : LCC- UPR 8241, IMRCP –UMR 5623

MICROPYROS : EC project : IST-29 047

Durée : oct 2000- oct 2003

Titre: Development of an emerging technology based on Micropyrotechnics - Applicative Exploration of Energetic Microsystems : *MicroPyroSystems*

Responsable projet : Carole Rossi - LAAS

Partenaires : IMT of University of Neuchâtel, IMTEK of the university of Freiburg, SIC of the University of Barcelona, ASTC of the University of Uppsala and LACROIX.

DGA/PROTAC contract

Durée : oct 2003- oct 2004

Titre : Développement de matrices de propulseurs pour le contrôle d'assiette de drones

Responsable projet: Carole Rossi

SMART INIT : Industrial project

Duration : oct 2003- oct 2004

Title : "Design, Fabrication and Operation of a Wireless and Miniature Ignition System based on micropyrotechnics"

Project leader : Carole Rossi – LAAS

CNES (French space agency) contract :

Duration : jan 1999- june 2003

Title : Development of solid propellant micropropulsion module for small satellite

Project leader : Carole Rossi – LAAS

ESA contract : N°15780/00/NL/PA

Duration : jan 2001- oct 2003

Title : Development of a drug injector microsystem based on pyrotechnics

Project leader : Manel Puig – SIC

ESA contract : N°15845/01/NL/PA

Duration : jan 2000- oct 2003

Title : Assessment study on the capability of solid propellant thruster to respond to small satellite station keeping

Project leader : Carole Rossi – LAAS

DGA contract

Duration : oct 2003- oct 2006

Title : Development of security functions based on micropyrotechnics for the securisation of ignition: one shot secure switch

Project leader : Carole Rossi – LAAS

Bibliographie

Introduction

- [1] R. T. Howe and R. S. Muller, Polycrystalline and amorphous silicon micromechanical beams: annealing and mechanical properties, *Sensors and Actuators*, 4, 447-454, (1983).
- [2] R. T. Howe and R. S. Muller, Stress in polycrystalline and amorphous silicon thin films, *J. of Applied Physics*, 54, 4674-4675, (1983).
- [3] R. T. Howe and R. S. Muller, Polycrystalline silicon micromechanical beams, *J. of the Electrochemical Society*, 130, 1420-1423, (1983).
- [4] R. T. Howe, Silicon Microdynamic Systems: Recent Developments in Microactuators and Micromachinery, (invited paper), IEEE WESCON, San Francisco, California, November 14-16, 1989, pp. 202-204.
- [5] R S Muller and R T Howe, Technologies for microdynamic devices, *Nanotechnology* 1 8-12, (1990)
- [6] K. E. Petersen, Dynamic micromechanics on silicon: Techniques and devices, *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-25, pp. 1241-1250, Oct. 1978.
- [7] Y.-C. Tai and R. S. Muller, Frictional Study of IC-Processed Micromotors, *Sensors and Actuators*, A21-A23, 180-83, (1990).
- [8] Y.-C. Tai and R.S. Muller, IC-processed electrostatic synchronous micromotors, *Sensors and Actuators*, 20, 48-56, November 15, (1989).
- [9] G. Poulin, E. Sarraute, F. Costa, Generation of electrical energy for portable devices: Comparative study of an electromagnetic and a piezoelectric system, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 116, 3, 29 October 2004, Pages 461-471.
- [10] Z. Yang, S. Matsumoto, R. Maeda, A prototype of ultrasonic micro-degassing device for portable dialysis system, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 95, 2-3, 1 January 2002, Pages 274-280.
- [11] L. Cao, S. Mantell, D. Polla, Design and simulation of an implantable medical drug delivery system using microelectromechanical systems technology, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 94, 1-2, 31 October 2001, Pages 117-125.
- [12] M. Pasquale, Mechanical sensors and actuators, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 106, 1-3, 15 September 2003, Pages 142-148.
- [13] D. Bosch, B. Heimhofer, G. Mück, H. Seidel, U. Thumser and W. Welser, A silicon microvalve with combined electromagnetic/electrostatic actuation, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volumes 37-38, June-August 1993, Pages 684-692.
- [14] D. Niarchos, Magnetic MEMS: key issues and some applications, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 106, issues 1-3, 15 September 2003, Pages 255-262.
- [15] O. Millet, P. Bernardoni, S. Régnier, P. Bidaud, E. Tsitsiris, D. Collard, L. Buchaillet, Electrostatic actuated micro gripper using an amplification mechanism, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 114, issues 2-3, 1 September 2004, Pages 371-378.
- [16] Y. Sun, D. Piyabongkarn, A. Sezen, B. J. Nelson and R. Rajamani, A high-aspect-ratio two-axis electrostatic microactuator with extended travel range, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 102, issues 1-2, 1 December 2002, Pages 49-60.

- [17] W. van der Wijngaart, H. Ask, P. Enoksson, G. Stemme, A high-stroke, high-pressure electrostatic actuator for valve applications, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 100, Issues 2-3, 1 September 2002, Pages 264-271.
- [18] Distributed Micro-Electro-Mechanical Systems Processing Environment, http://www.darpa.mil/mto/mems/summaries/Projects/The_13.html
- [19] Air et Cosmos, Les paris technologiques de la NASA , Avril 2001, page 19.
- [20] A.A. Berlin, K.J. Gabriel, Distributed MEMS: New Challenges for Computations, *IEEE Computational Sciences & Engineering*, 12-16, Jan-March 1997.
- [21] J. Hill, R. Szewczyk, et al, System Architecture Directions for Networked Sensors, *ACM 9th Int. Conf on Architectural Support for Programming Language*, ACM Sigplan Notices, vol 35, pp 93-105 (2000).
- [22] B. Warneke, B. Liebowitz, and K.S. Pister, "Smart dust : communicating with a cubic-millimeter computer", *Computer*, Jan 2001, pp44-51.
- [23] Viral Mehta, Joyce Smith Cooper, Revue and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing, *Journal of Power Source*, 114, 32 (2003).
- [24] H. Maynard, J.P. Meyers, Miniature fuel cells for portable power : design considerations and challenges, *Journal of vacuum Science & Technology B* 20 (4), 1287 (2002).
- [25] J.R. Lim, C.K. Huang, J.P. Fleurial, Thermoelectric micro device fabricated by a MEMS-like electrochemical process, *Nature Materials* 2, 528 (2003)
- [26] Polymer based photovoltaics : a concept for cost efficient renewable energy, *MST News*, sept 2003, p215.
- [27] 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).

Partie 1 : la micropyrotechnie : état de l'art, enjeux scientifiques et technologiques

- [1] C. Rossi, D. Estève, Faisabilité d'un assemblage pour l'injection transcutannée, Rapport LAAS No95314, contrat Laboratoire Fournier SCA, N°1410491-00, Juillet 1995.
- [2] C. Rossi, D. Estève, Pyrotechnic micro actuators, *EUROSENSORS XI*, Varsovie (Pologne), 21-24 Septembre 1997.
- [3] 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.
- [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] 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.
- [6] D. H. Lewis Jr., S. W. Janson, R. B. Cohen and E. K. Antonsson, Digital Micropropulsion, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 80, issue 2, 10 March 2000, pp 143-154.
- [7] G. Lamedica, M. Balucani, A. Ferrari, P. D. Tromboni, M. Marchetti, Microthruster in Silicon for aerospace application, *IEEE AESS Systems Magazine*, September 2002, pp22-27.

- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] E. Diaz, P. Brousseau, G. Ampleman, E.E. Prud'homme, Polymer Nanocomposites from Energetic Thermoplastic Elastomer and Alex®, *Propellant, Explosives, Pyrotechnics*, 28, N°4, 2003.
- [11] 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 February 2000
- [12] K. Engelen, M. H. Lefebvre, Properties of Gas-Generating Mixtures Related to different fuel and Oxidizer Composition, *Propellant, Explosives, Pyrotechnics* 28, 2003, N°4, pp49-76.
- [13] Pile à combustible pour l'alimentation d'appareils électroniques, notamment portables, Brevet FR2 818 808
- [14] A.N. Ali, S.F. Son, M.A. Hiskey, D.L. Naud, Novel High Nitrogen Propellant Use in Solid Fuel Micropropulsion, *Journal of Propulsion and Power*, Vol 20, N°1, Jan-Feb 2004.
- [15] Vanne miniature pour le remplissage du réservoir d'un appareil d'administration transdermique de médicament, Brevet FR9614230 / EP97947111.7.
- [16] D. W. Youngner, S.T. Lu, E. Choueiri, J.B. Neidert, R. E. BlackIII, K. J. Graham, D. Fahey, R. Lucus, X. Zhu, MEMS Megapixel Micro-thruster arrays for small satellite StationKeeping, 14th Annual/USU Conference on Small satellite, 2000.
- [17] K. Takahashi, H. Ebisuzaki, H. Kajiwara, T. Achiwa, K. Nagayama, Design and Testing of Mega-Bit Microthruster arrays, Nanotech AIAA conference, Houston, 9-12 Septembre 2002.
- [18] 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.
- [19] Y. Zheng, Z. Gaofei, L. Baoxuan, H. Songqi, Design, Fabrication and Test of MEMS Propulsion with Solid Propellant, 4th round table on micro/nano technologies for space, ESA-ESTEC, Mai 2003.
- [20] Y. Zhao, B.A. English, H. DiBiaso, G. Yuan, M. G. Allen, Polymeric microcombustors for solid-phase conductive fuel, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 111, Issues 2-3, 15 March 2004, pp 260-266.
- [21] D. Teasdale, V. Milanovic, P. Chang, K. Pister, K. Bohringer, Microrocket for smart dust, *Smart Materials and structure*, 10 (6), 2001, pp1145-1155.
- [22] W. Lindsay, D. Teasdale, V. Milanovic, K. Pister, C. Fernandez-Pello, Thrust and electrical power from solid propellant microrockets, *Technical-Digest.-MEMS-2001.-14th-IEEE-International-Conference-on-Micro-Electro-Mechanical-Systems.*, 2001, 606-10. Piscataway, NJ, USA.
- [23] 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.
- [24] B.A. English, Microcombustor based on controllable solid fuel element, *Proceedings of IMECE'03*, 2003.
- [25] C.C. Hong, S. Murugesan, G. Beaucage, J.W. Choi, C.H. Ahn, A fonctionning on-chip pressure generator using solid chemical propellant for disposable lab-on-a-chip, *Lab-on-a-Chip*, Nov. 2003, 3(4), pp 281-286.
- [26] T. Troianello, Precision foil resistors used as electro-pyrotechnic initiators, *Proceedings of the 51st Electronic Components and Technology Conference*, 29 May-1 June 2001, Orlando, Florida.

- [27] D. S. Stewart, Miniaturization of explosive technology and microdetonics, XXI ICTAM, 15-21 August 2004, Warsaw, Poland.
- [28] L. Menon et al, Ignition studies of Al/FeO₃ energetic nanocomposites, Applied Physics letters, Vol 84, N° 23.
- [29] 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) 338-345
- [30] D. S. Stewart et al, Towards Miniaturization of explosive technology, Shock Waves, (2002), 11, pp 467-473.
- [31] M. Du Plessis, C. Conradie, Nano-explosions in silicon, 12th International Conference of Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, MIXED, Krakow, Poland, 22-25 June 2005.
- [32] L. K. Gusachenko, V. E. Zarko, A. D. Rychkov, N. Shokina. Yu, Filtration Combustion of an Energetic Material in a Cocurrent Flow of Its Combustion Products. Critical Combustion Conditions. Combustion Explosion & Shock Waves. 39(6):694-700, November/December 2003.
- [33] B. Larangot, Conception, fabrication et caractérisation de matrices de micropropulseurs pyrotechniques sur silicium, Doctorat de l' Université Paul Sabatier, Toulouse, 23 Janvier 2004.
- [34] K.L. Zhang, S.K. Chou, S.S. Ang, Development of a low temperature co-fired ceramic solid propellant microthruster, J. Micromech. Microeng. 15 (2005) 944-952.
- [35] 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.
- [36] 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
- [37] D. Combes, D. King., Electronic safety and arming unit, brevet WO 2004/079290 A1, Sept. 2004.
- [38] P.Pennarun, C. Rossi, D. Estève, V. Conédéra, Development of MEMS based safe electro-thermal pyrotechnic igniter for a new generation of microfuzes, Proceeding of the SPIE conference on the Microtechnologies for the new millennium, 9-12 May 05, Sevilla, Spain.
- [39] C. Rossi, D. Estève, P. Temple Boyer, G. Delannoy, Realization, characterization of micro pyrotechnic actuators and FEM modelling of the combustion ignition, Sensors and Actuators, Vol.A70, issues 1-2, October1998, pp 141-147.
- [40] C. Bruno, E. Giacomazzi, Chemical microthrusters : effects of scaling on combustion, Nanotech AIAA 2002-5758, Houston, 9-12 Septembre 2002.
- [41] P. Broyer et al, ElectroActive Lab on Card, Journées Nationales du Réseau de Recherche en Micro et Nano Technologies, Cassis, 11-13 octobre 2004, France.
- [42] Dispositif de remplissage de zones ouvertes situées en creux par rapport à une surface, Brevet FR2845858
- [43] P. Temple Boyer, B. Haji, J. L. Alay, J. R. Morante, A. Martinez, Properties of SiO_xN_y films deposited by LPCVD from SiH₄/N₂O/NH₃ gaseous mixture, Sensors and Actuators A: Physical, Vol.74, N°1-3, Avril 1999, pp52-55
- [44] E. Saint Etienne, P. Pons, G. Blasquez, P. Temple Boyer, V. Conédéra, M. Dilhan, X. Chauffleur, R. Plana, An efficient technological process for millimetric waves circuits on silicon, 11th European Conference on

- Solid-State Transducers (EUROSENSORS XI), Varsovie (Pologne), 21-24 Septembre 1997, Vol.3, pp.1185-1188.
- [45] C. Rossi, Conception et réalisation d'un système de réhydratation pour patch transdermique a partir de micro actionneurs pyrotechniques, Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, Toulouse, 18 Décembre 1997, N Ordre 455.
- [47] H. Bartuch, D. Clément, D. Kovalev, H. Laucht, Silicon initiator, from the idea to functional tests, Airbag 2004 conference, Karlsruhe, 30 novembre 2004.
- [48] 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.
- [49] P. Pennarun, Modélisation de micro initiateurs pyrotechniques, comparaison de plusieurs technologies, rapport de stage DEA, Ingénieur INSA, rapport LAAS 05 296.
- [50] 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
- [51] A Tappan et al, Micro energetic materials – microscale energetic material processing and testing, 41st AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno NV, January 6-9, 2003
- [52] C. Rossi, Micropyros, IST-1999-29047, Development of an emerging technology based on Micropyrotechnics. Applicative exploration of Energetic Microsystem, rapport LAAS ..., Final Report – contrat 5ème PCRD
- [53] 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
- [54] Microstructure électromécanique intégrée comportant des moyens de réglage de la pression dans une cavité scellée et procédé de réglage de la pression, Brevet FR0213325 2002-10-24

Exemple 1. Les microsystèmes d'injection de médicament micropyrotechniques

- [1] 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
- [2] B. Larangot, Conception, fabrication et caractérisation de matrices de micropropulseurs pyrotechniques sur silicium, Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 23 Janvier 2004.
- [3] Gustavo A. Ardila Rodriguez, Carole Rossi, Daniel Esteve Design, fabrication and operation of a wireless and miniature ignition system, Sensors and Actuators, Decembre 05, Sous presse
- [4] P. Pennarun, C. Rossi, D. Estève, V. Conédéra, Development of MEMS based safe electro-thermal pyrotechnic igniter for a new generation of microfuze, Proceeding of the SPIE conference on the Microtechnologies for the new millennium, 9-12 May 05, Sevilla, Spain
- [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] S. Orieux, C. Rossi, D. Estève, Compact model based on a lumped parameter approach for the prediction of Solid Propellant Micro Rocket performance, Sensors and Actuators A101 (2002) 383-391

- [7] C. Rossi, M. Djafari Rouhani, D. Estève, Prediction of the performance of a Si-micromachined microthruster by computing the gas flow inside the thruster, *Sensors and Actuators A87* (2000) 96-104
- [8] C. Rossi, M. Puig Vidal, Specification and design of a drug injection device using a pyrotechnic gas generator, *Rapport LAAS No02237, ESA Contrat N° 15780/00/NL/JD*, Juin 2002
- [9] C. Rossi, M. Puig Vidal, Drug injector microsystem based on pyrotechnics, *Rapport LAAS No03424, Contrat ESA N°15780/00/NL/PA*, Octobre 2003
- [10] J.R. Robinson, V. H. Lee, Eds, *Controlled Drug Delivery : Fundamentals and applications*, Marcel Dekker, New York, 1998
- [11] Hee Cham Kim, You Han Bae, Sung Wan Kim, Innovative Ambulatory Drug Delivery System Using an Electrolytic Hydrogel Infusion Pump, *IEEE Transactions on biomedical engineering*, Vol 46, N6, June 1999
- [12] E.W. Smith, H.J. Maibach, *Percutaneous Penetration Enhancers*, CRC Press, Boca Raton, FC, 1995
- [13] P.G. Green, Iontophoretic delivery of peptide drugs, *J. Control. Rel.*, 1996, 41:33-48
- [14] Prausnitz, M.R. Berner, B., Dinh, S. M., Eds, CRC Press : Boca Raton, FL,, *Electroporation. In Electronically Controlled Drug Delivery*, in press
- [15] Kost, J., Ultrasound induced delivery of peptides, *J. Control. Rel.* 1993, 24, 247-255
- [16] Gardeniers, H.J.G.E.; Luttge, R.; Berenschot, E.J.W.; de Boer, M.J.; Yeshurun, S.Y.; Hefetz, M.; van't Oever, R.; van den Berg, A.; Silicon micromachined hollow microneedles for transdermal liquid transport, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Volume: 12 , Issue: 6 , Dec. 2003
- [17] Mukerjee, E.V.; Issseroff, R.R.; Collins, S.D.; Smith, R.L.; Microneedle array with integrated microchannels for transdermal sample extraction and in situ analysis, *TRANSDUCERS, Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 12th International Conference on, 2003 , Volume: 2 , 8-12 June 2003 Pages:1439 - 1441 vol.2*
- [18] McAllister, D.V.; Kaushik, S.; Patel, P.N.; Mayberry, J.L.; Allen, M.G.; Prausnitz, M.R.; Microneedles for transdermal delivery of macromolecules, *Engineering in Medicine and Biology, 1999, Proceedings of the First Joint Annual Fall Meeting of the Biomedical Engineering Soc. BMES/EMBS Conference, 1999., Volume: 2, 13-16 Oct. 1999, vol.2, p836*
- [19] Henry, S.; McAllister, D.V.; Allen, M.G.; Prausnitz, M.R.; Micromachined needles for the transdermal delivery of drugs, *Micro Electro Mechanical Systems, 1998. MEMS 98. Proceedings., The Eleventh Annual International Workshop on , 25-29 Jan. 1998 Pages:494 – 498*
- [20] M. Puig Vidal, J. Lopez, P. Miribel-Catala, J. Samitier, C. Rossi, Smart drug delivery system based on pyrotechnical actuation, *Proceedings of the SPIE The International Society for Optical Engineering, 2003; 5119:226-35*
- [21] Priyanka Aggarwal; Kaler, K.V.I.S.; Badawy, W.; Design and implementation of MEMS based microneedles for biomedical applications, *Electrical and Computer Engineering, 2003. IEEE CCECE 2003. Canadian Conference on , Volume: 3 , 4-7 May 2003, Pages:1505 - 1508 vol.3*
- [22] A. Rodriguez, D. Molinero, E. Valera, T. Trifonov, L.F. Marsal, J. Pallarès and R. Alcubilla, Fabrication of silicon oxide microneedles from macroporous silicon, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Available online 18 April 2005
- [23] S. Rajaraman and H.T. Henderson, A unique fabrication approach for microneedles using coherent porous silicon technology , *Sensors and Actuators B: Chemical*, Volume 105, Issue 2, 28 March 2005, Pages 443-448

- [24] Ren Yang, Tianning Chen, Hualing Chen and Wanjun Wang, Microfabrication of biodegradable (PLGA) honeycomb-structures and potential applications in implantable drug delivery, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Volume 106, Issue 2, 13 May 2005, Pages 506-511
- [25] C.T.S. Ching, I. Camilleri and P. Connolly, A low-cost, programmable device for versatile current delivery in iontophoresis applications, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol./Iss.: 106, 2
- [26] Geometrical effects in mechanical characterizing of microneedle for biomedical applications, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Volume 102, Issue 2, 13 September 2004, Pages 226-234 P. Aggarwal and C. R. Johnston
- [27] Griss, P.; Stemme, G.; Novel, side opened out-of-plane microneedles for microfluidic transdermal interfacing, *Micro Electro Mechanical Systems*, 2002. The Fifteenth IEEE International Conference on, 20-24 Jan. 2002, Pages:467 – 470
- [28] J. Santini et al, A controlled-released microchip, *Nature*, Vol. 397, January, 28th, 1999
- [29] Scheidt, R.A.; Santini, J.T., Jr.; Richards, A.C.; Johnson, A.M.; Rosenberg, A.; Cima, M.J.; Langer, R.; Microchips as implantable drug delivery devices, *Microtechnologies in Medicine and Biology*, 1st Annual International, Conference On. 2000, 12-14 Oct. 2000, Pages:483 – 486
- [30] Yawen Li; Shawgo, R.S.; Langer, R.; Cima, M.J.; Mechanical testing of gold membranes on a MEMS device for drug delivery, *Microtechnologies in Medicine & Biology 2nd Annual International IEEE-EMB Special Topic Conference on*, 2-4 May 2002, Pages:390 – 393
- [31] Dash A.K., and Cudworth G.C., Therapeutic applications of implantable drug delivery systems, *J. Pharmacol. Toxicol. Methods*, 40, 1-12, 1998
- [32] Allen D.G. and Sefton M.V., A model of insulin delivery by a controlled release micropump, *Ann. Biomed. Eng.*, 14, 257-76, 1986
- [33] Il Maillefer, D et al, A High performance silicon micropump for disposable drug delivery system, *Technical-Digest of the 14th-IEEE-International-Conference-on-Micro-Electro-Mechanical-Systems*, 2001. Piscataway, NJ, USA.
- [34] C. Grosjean et al, A thermopneumatic microfluidic system, *MEMS2000*
- [35] S. Bütefisch et al, Novel micro-pneumatic actuator for MEMS, *Sensors and Actuators*, A97-98 (2002), 638-645.
- [36] C.C. Hong et al, A disposable on-chip air detonator for driving fluids on point-of-care systems, *μTAS 2002*, Vol2, 949-951.
- [37] C.C. Hong et al, A functional on chip pressure generator using solid chemical propellant for disposable lab-on-a-chip, *Lab on Chip*, 2003, 3, 281-286.
- [38] Ju Yeoul Baek, Ji Young Park¹, Jong Il Ju¹, Tae Soo Lee and Sang Hoon Lee, A pneumatically controllable flexible and polymeric microfluidic valve fabricated via in situ development, *J. of Micromech. Microeng.* 15 (2005) 1015–1020
- [39] Sin and Lin, Water-powered Microdrug delivery system, *J. of MicroMechanical Systems*, Vol132, N°1,, February 2004
- [40] K. Y. Weng, Thermolysis Reaction Actuating Pumps, *Proceeding μTAS 2001conference gas*, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 111, Issue 1, 1 March 2004, pp 8-13

-
- [41] C. Rossi, D. Estève, Micropyrotechnics, a new technology for making energetic microsystems: review and prospective, *Sensors and Actuators A* 120 (2005), 297-310
- [42] Vanne miniature pour le remplissage du réservoir d'un appareil d'administration transdermique de médicament - Brevet FR9614230 / EP97947111.7
- [43] Vanne miniature et son procédé de fabrication - Brevet FR9706613
- [44] C. Rossi, Conception et réalisation d'un système de rehydratation pour patch transdermique à partir de micro actionneurs pyrotechniques, Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, Toulouse, 18 Décembre 1997, N Ordre 455
- [45] Going From Needles to Needle-Free Injectables, By: Dhiraj Ajmani, Pharmaceutical and Biotechnology Group, Frost & Sullivan; <http://www.drugdeliverytech.com/cgi-bin/articles.cgi?idArticle=318>
- [46] Les poudres et explosives N° 3, J. Quinchon, J. Tranchan, M. Nicolas, Tec&doc LAVOISIER
- [47] 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

Exemple 2. La micropropulsion pyrotechnique intégrée sur silicium

- [1] DEMETER ; http://www.cnes.fr/html/_112_319_320_.php
- [2] S.W. Janson, Chemical and Electrical Micropropulsion Concept for Nanosatellite, 30th AIAA/ASME/SAE/ASEE joint Propulsion conference, Indianapolis, IN, June 27-29, 1994
- [3] S. Janson, H. Helvajian, E. Robinson, The concept of Nanosatellite for Revolutionary Low-Cost Space Systems, 44th Congress of the international astronautics federation, Oct. 16-22, 1993, Graz, Austria
- [4] S. Janson, A. Huang, W. Hansen, H. Helvajian, Development of an inspector Satellite Propulsion module using photostructurable glass ceramic materials, Caneus 2004- conference on micro nano technologies for aerospace applications, Monterey, California, 1-5 november 2004.
- [5] J. Mueller et al, JPL Micro-Thrust Propulsion Activities, Proceeding of the conference Proceedings of the AIAA Nanotech 02 conference, Houston, USA, September 9-11, 2002.
- [6] M. Behringer, F. Rüdener, and W. Steiger, Spaceproven indium liquid metal field ion emitters for ion microthruster applications, AIAA Paper 97-3057, 33rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Seattle, WA, USA, 6-9 Juillet 1997.
- [7] J. Mitterauer, Micropropulsion for Small Spacecraft: a new Challenge for FEPP (Field Effect Electric Propulsion) and MILMIS Microstructured Liquid Metal Ion Sources, Proceedings of the AIAA Nanotech 02 conference, Houston, USA, September 9-11, 2002.
- [8] C. Kitts, M. Swartwout, Autonomous Operations Experiments For the Distributed Emerald Nanosatellite Mission, 14th Annual USU Conference on Small Satellites, SSC00-IX-5, 2000.
- [9] F. M. Pranajaya, Progress on Colloid Micro-Thruster Research and Flight Testing, Proceeding of the 13th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, Logan, Utah, August 2000.
- [10] M. Gamero-Castaño, V. Hruby, Characterization of a Colloid Thruster Performing in the micro-Newton Thrust Range, 27th International Electric Rocket Propulsion Conference, Pasadena, CA, 15-19 Octobre 2001.

-
- [11] J. Xiong, Z. Zhou, X. Ye, X. Wang, Y. Feng, Y. Li, A colloid micro-thruster system, *Microelectronic Engineering* 61-62 pp1031-1037, 2002.
- [12] J. Stark, B. Stevens, B. Kent, M. Sandford and M. Alexander, Micro-Fabrication and Operation Nano Emitters Suitable for a Colloid Thruster Array, 4^{ème} table ronde sur les micro/nano technologies pour l'espace, ESTEC-ESA, Noordwijk, Netherland, 21 Mai 2003.
- [13] Morash, D. H. and Stand, L., Miniature Propulsion Components for the Pluto Fast Flyby Spacecraft, AIAA Paper 94-3374, Indianapolis, IN, Juin 1994.
- [14] R. Bayt, K. Breuer, Systems Design and Performance of Hot and Cold Supersonic Microjets AIAA-2001-0721, 39th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Reno, Nevada, 8-11 Janvier 2001.
- [15] L. Vaccari, F. De Grandis, F. Santoni, A. Gerardino, F. Perennes and P. Miotti, Design and prototyping of a micropropulsion system for microsattellites attitude control and orbit control, *Journal of Vacuum Science & Technology B* pp2793-2797, Novembre-Décembre 2002.
- [16] X. Y. Ye, F. Tang, H.Q. Ding, Z.Y. Zhou, Study of a vaporizing water micro-thruster, *Sensors and Actuators A* 89 pp159-165, 2001.
- [17] Tae Goo Tang, Sang Wook Kim, Young-Ho Cho, High impulse, low power, digital microthrusters using low boiling temperature liquid propellant with high viscosity fluid plug, *Sensors and Actuators A* 3324 pp1-6, 2002.
- [18] G. Lamedica, M. Balucani and A. Ferrari, Microthrusters in Silicon for Aerospace Application, *IEEE AESS Systems Magazine*, Septembre 2002.
- [19] K.L. Zhang, S.K. Chou, S.S. Ang, Development of a low-temperature co-fired ceramic solid propellant microthruster, *J. Micromech. Microeng.* 15 (2005) 944-952
- [20] K. L. Zhang, S. K. Chou, and Simon S. Ang, MEMS-based Solid Propellant Microthruster Design, Simulation, Fabrication and Testing, *IEEE/ASME Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 13, No. 2, pp. 165-175, 2004.
- [21] K. L. Zhang, S. K. Chou, and Simon S. Ang, Development of a Solid Propellant Micro-thruster with Chamber and Nozzle Etched on a Wafer Surface, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 785-792, 2004.
- [22] K. L. Zhang, S. K. Chou, Simon S. Ang, X. S. Tang, and J. S. Phang, Investigation of Solid Propellant Microthrusters, *International Journal of Computational Engineering Science*, Vol. 4, No. 3, pp. 517-520, 2003.
- [23] D. Platt, A Monopropellant Milli-Newton Thruster System for Attitude Control of Nanosatellites, 16th Annual USU Conference on Small Satellites, SSC02-VII-4, 2002.
- [24] M.S. Rhee, C.M. Zakrzewski, M.A. Thomas, Highlights of Nanosatellite Propulsion Development Program at NASA-Goddard Space Flight Center, 14th Annual USU Conference on Small Satellites, SSC00-X-5, 2000.
- [25] D. L. Hitt, C. M. Zakrzewski, M. A. Thomas, MEMS-based satellite micropropulsion via catalyzed hydrogen peroxide decomposition, *Smart Materials and Structures*, Volume 10, pp1163-1175, 2001.
- [26] Development of a Monopropellant Microrocket Engine as a Step Towards a High-Performance Bipropellant Microrocket, ASTC, TNO, SSTL, Qinetiq, Workshop power MEMS 03, Makuhari (Tokyo, Japon), p161, 2003.
- [27] K. A. Polzin, E. Y. Choueiri, P. Gurfil, and N. J. Kasdin, Plasma Propulsion Options for Multiple Terrestrial Planet Finder Architectures, *Journal of spacecraft and rockets*, Vol. 39, No 3, pp347-356, Mai-Juin 2002.
- [28] , E.V. Murkerjee et al, Vaporizing Liquid Microthruter, *Sensors & Actuators* 83 (2000), 231-236

- [29] K. Takahashi, H. Ebisuzaki, H. Kajiwara, T. Achiwa, K. Nagayama, Design and Testing of Mega-Bit Microthruster arrays, Proceedings of the AIAA conference Proceedings of the AIAA Nanotech 02 conference, Houston, USA, September 9-11, 2002.
- [30] 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, pp 47-51, 2003.
- [31] D. H. Lewis Jr., S. W. Janson, R. B. Cohen and E. K. Antonsson, Digital Micropropulsion, Sensors and Actuators, A80(2) (2000) 143-154.
- [32] Brevet EP 0 903 487 A2, 1999, Integrated pulsed propulsion system for microsatellite
- [33] D. W. Youngner, S.T. Lu, E. Choueiri, J.B. Neidert, R. E. BlackIII, K. J. Graham, D. Fahey, R. Lucas, X. Zhu, MEMS megapixel micro-thruster arrays for small satellite station keeping, 14th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellite, Logan, Utah (USA) 21-24, Août 2000
- [34] 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..
- [35] K. Takahashi, H. Ebisuzaki, H. Kajiwara, T. Achiwa, K. Nagayama, Design and testing of mega-bit microthruster arrays, Proceedings of the AIAA Nanotech 02 conference, Houston, USA, September 9-11, 2002.
- [36] Y. Zheng, Z. Gaofei, L. Baoxuan, H. Songqi, Design, Fabrication and Test of MEMS Propulsion with Solid Propellant, 4th round table on micro/nano technologies for space, ESA-ESTEC, May 2003.
- [37] P.Q. Pham, D. Briand, C. Rossi, N.F. De Rooij, Downscaling of solid propellant pyrotechnical microsystems Tech. Digest Transducers'03, June 8-12, 2003, Boston, USA, pp. 1423-1426.
- [38] B. Larangot, C. Rossi, A. Chaalane, H. Granier, P. F. Calmon, Ignition and combustion investigation on pyrotechnical solid microthruster, Proceedings of the 17th European Conference on Solid-State Transducers (EUROSENSORS XVII), Guimarães, Portugal, Septembre 21-24, 2003, pp.744-747
- [39] M. Tosin, F. Granziera, L. Gibim, S. Canola, A solid propellant micro thruster design – a brief discussion about its viability and application, Conference on micro nano technologies for aerospace applications, Caneus, Monterey, California, 1-5 november 2004.
- [40] D. Estève, J. Simonne, C. Rossi, G. Vialaret, D. Borodaty, B. Jammes, C. Lancelle, Application des microsystemes aux systemes spatiaux , Rapport LAAS No96304, Contrat CNES N 808/2/95/0018, Juillet 1996, 42p.
- [41] C. Rossi, M. Dumonteuil, T. Camps, D. Briand, P. Q. Pham, N. F. de Rooij, Matrix of 10×10 addressed solid propellant microthrusters : review of the technologies, Sensors and Actuators 2005, sous presse
- [42] C. Rossi, N. Fabre, V. Conédéra, D. Estève, Design, fabrication and thrust prediction of solid propellant microthrusters for space application, Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering, 1999 pt. 1-2, 3680 : 906-16
- [43] Système de micro propulsion à poudre et procédé de réalisation d'un tel système de micropropulsion - Brevet FR 99.07626
- [44] D. Teasdale et al, Microrocket for smart dust, Smart Materials and structure, 10 (6), pp1145-1155, 2001
- [45] C. Rossi, G. Ardila, Assessment study on the capability of solid propellant microthruster to respond to small satellite station keeping , Rapport LAAS N°02263 Contrat ESA N°15845/01/NL/PA, Octobre 2003, 53p.

-
- [46] T. Bechtold, E. B. Rudnyi and J. G. Korvink, C. Rossi, Efficient modelling and simulation of 3D electro-thermal model for a pyrotechnical microthruster, PowerMEMS 2003, Makuhari, Japan, 4-5 December 2003
- [47] S. Orioux, C. Rossi, D. Estève, Compact model based on a lumped parameter approach for the prediction of Solid Propellant Micro Rocket performance, Sensors and Actuators A101 (2002) 383-391
- [48] A. Freitag. "mgt mikroglass technik AG", URL: <http://www.mikroglas.com>, 2003.
- [49] C. Rossi, Quels challenges pour la micropropulsion spatiale de demain ? Etat de l'art des développements récents en micropropulsion, Journée CCT CNES , 7 et 8 juin 05, <http://www.cnes.fr/>
- [50] Bayt, R.L., Ayon A.A, Breuer K.S, A performance evaluation of MEMS based micronozzles, AIAA Paper 97-3169, July 1997
- [51] Bayt R. L, Analysis, Fabrication and Testing of a MEMS based micropropulsion system, PhD dissertation, Dept of Aeronautics and Astronautics, MIT, Cambridge, MA June 1999
- [52] Badcock, K.J., Richards, B.E, Woodgate, M. A, Elements of computational fluid dynamics on block structured grids using implicit flow solver, Progress in Aerospace Sciences, Vol 36, 2000, pp 351-392
- [53] Menzies R.D.D, Richards B.E., Badcock K.J., Computational Investigation of 3D flow effect on micronozzles, J. Spacecraft, vol 39, N°4, Engineering notes
- [54] C. Rossi, A. Chaalane, Définition de micropropulseurs à base de Silicium pour le contrôle d'assiette des drones, Rapport LAAS 04596, Contrat PROTAC, Novembre 2004
- [55] C. Rossi, A survey of MEMS based micro thrusters and their solid propellant technology, Sensors Update volume 10, Wiley, January 2002 – chap2.5
- [56] C. Rossi, D. Estève, Etude de micropropulseurs sur silicium, Rapport LAAS, N° 00564 – Rapport de contrat CNES 712/99/CNES/8033/00
- [57] C. Rossi, Développement de matrices de micropropulseurs intégrées sur silicium pour des applications spatiales , Rapport LAAS No03268 - Contrat Région RECH/99001197
- [58] C. Rossi, Micropyros Final Report, IST contract # 99-29047, Development of an emerging technology based on Micropyrotechnics. Applicative exploration of Energetic Microsystem, rapport LAAS 05349
- [59] B. Larangot, Conception, fabrication et caractérisation de matrices de micropropulseurs pyrotechniques sur silicium, Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 23 Janvier 2004 , rapport LAAS 04049
- [60] A. Chaalane, B. Larangot, C. Rossi, H. Granier, D. Estève, Main directions of solid propellant micro-propulsion activity at LAAS, Conference on Micro-Nano-Technologies for Aerospace Applications, CANEUS, Monterey (USA), 1-5 Novembre 2004.
- [61] C. Rossi, S. Orioux, Modèle analytique pour l'étude de micropropulseurs silicium, Rapport LAAS, N°01522, Nov 2001
- [62] C. Rossi, M. Djafari Rouhani, D. Estève, Prediction of the performance of a Si-micromachined microthruster by computing the gas flow inside the thruster, Sensors and Actuators A87 (2000) 96-104
- [63] S. Orioux, C. Rossi, D. Estève, Thrust stand for ground tests of Solid Propellant Microthrusters , Review of Scientific Instruments, Vol. 73, Number 7, pp 2694-8, July 2002
- [64] Microstructure électromécanique intégrée comportant des moyens de réglage de la pression dans une cavité scellée et procédé de réglage de la pression, Brevet FR0213325 2002-10-24

Exemple 3. Le micro amorçage sécurisé sur silicium

- [1] Airbags, prétensionneurs et SRP, sécurité passive, Renault, 2001.
http://www.febiac.be/documents_febiac/Training_Renault_Airbag_FR.pdf
- [2] CEA Technologies # 76, Mai-juin 2005
- [3] J.Y. Founiols, L. Perez, Etude de faisabilité d'une chaîne de capteurs microsystèmes dédiée à la détection d'intrusion : identification, filtrage et apprentissage, rapport LAAS No04168
- [4] E. Campo, M. Chan, Méthodes de diagnostic par apprentissage des habitudes pour la détection de situations de danger chez les personnes âgées, Conférence Internationale sur les Sciences Electroniques, Technologies de l'Information et des Télécommunications (SETIT'2004), Sousse (Tunisie), 15-20 Mars 2004
- [5] http://biometrie.online.fr/Press_2000_index.htm
- [6] STANAG (standardization agreement) 4187 : Fuzing systems – safety design requirement
- [7] MEMS arm fire and safe and arm devices, US patent number 6,431,071 B1, Aug. 2002
- [8] Electronic safety and arming unit, patent number WO 2004/079290 A1, Sept. 2004
- [9] Michael S. Baker, Larry L. Howell, On chip actuation of an In-plane compliant bistable micromechanism, Journal of micromechanical systems, vol.11, n°5, Oct. 2002, p.566-573
- [10] Xi-Qing Sun, Farmer K.R., Carr W.N., A bistable microrelay based on two-segment multimorph cantilever actuator, MEMS 98. Proceedings., The Eleventh Annual International Workshop on, 25-29 Jan. 1998, p. 154 - 159
- [11] S. Majumber, J. Lampen, R. Morrison, J.Maciél, 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, pp 12-15
- [12] Eniko T. Enikov and Kalin Lazarov, PCB-integrated metallic thermal micro-actuators, Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 105, Issue 1, 15 June 2003, pp 76-82
- [13] M. Ruan, J. Shen and C. B. Wheeler, Latching microelectromagnetic relays, Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 91, Issue 3, 15 July 2001, pp 346-350
- [14] K.N Tu, K. Zeng, Tin-Lead (SnPb) solder reaction in flip chip technology, *Material Science and engineering*, R 34, 2001, pp 1-58
- [15] M. Scafer, R.A. Fournelle, J. Liang, Theory for Intermetallic Phase Growth Between Cu and Liquid Solder Based on Grain Boundary Diffusion Control, Journal of Electronic Materials, Vol.27, No. 11, 1998, pp 1167-1176
- [16] Dispositif d'allumage sans fil à résonance, brevet 0507074
- [16] Brevet CNRS/NOVATEC en cours de dépôt , Dispositif embarqué hautement sécurisé de mise à feu intégrant des micro interrupteurs pyrotechniques monocoups prévus à cet effet
- [17] H. Bartuch, D. Clément, D. Kovalev, H. Laucht, Silicon initiator, from the idea to functional tests, Airbag 2004 conference, Karlsruhe, 30 novembre 2004
- [18] Élément résistif pour initiateur pyrotechnique, Brevet FR 2 807 157-A1
- [19] T. Troianello, Precision foil resistors used as electro-pyrotechnic initiators, Proceedings of the 51st Electronic Components and Technology Conference, Orlando, Florida, 29 May-1 June 2001
- [20] Initiateur électro-pyrotechnique à pont en couche mince et à très basse énergie de fonctionnement, brevet FR 2 809 806-A1
- [21] The Carbon resistor igniter by Bob DAHLQUIST

- [22] P. Pennarun, C. Rossi D. Estève, V. Conédéra, Development of a safe electro-thermal pyrotechnic igniter on silicon, proceedings of the SPIE, Conference on the microtechnologies for the new millennium 2005, 9-11 may 2005, Sévillla, Spain
- [23] P.Pennarun, C. Rossi, D. Estève, D. Bourrier, Development of MEMS based safe electro-thermal pyrotechnic igniter for a new generation of microfuzze, Journal of MicroMechanical System , décembre 2005, sous presse
- [24] 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
- [25] 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

Conclusion, stratégie générale et programme de travail

- [1] C. Rossi, M. Dumonteuil, T. Camps, D. Briand, Phuong Q. P., N. F. de Rooij, Matrix of 10×10 addressed solid propellant microthrusters: review of the technologies, Sensors and Actuators sous presse, dec. 05
- [2] 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
- [3] W. Lindsay, D. Teasdale, V. Milanovic, K. Pister, C. Fernandez-Pello, Thrust and electrical power from solid propellant microrockets, Technical-Digest of the 14th-IEEE-International-Conference-on-Micro-Electro-Mechanical-Systems,.2001, 606-10. Piscataway, NJ, USA
- [4] A.H. Epstein et al, PowerMEMS and microengines, Transducers'97 -1997 International Conference on SolidState Sensors and Actuators, Chicago, June 16-19, 1997, 755
- [5] C. Escriba, E. Campo, D. Estève, J.Y. Fourniols, Complete analytical modeling and analysis of micromachined thermoelectric uncooled IR sensors, Sensors and Actuators A, Vol.120, N°1, pp.267-276, 2005.

Table des illustrations

Figure 1. Schéma d'une plate-forme chauffante sur membrane diélectrique fine	20
Figure 2. Etapes de fabrication des plates-formes chauffantes	21
Figure 3. Photos de quelques plates-formes ainsi réalisées pour des applications micropyrotechnie	22
Figure 4. Profil d'une membrane $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ avec résistance en polysilicium pour différentes puissances d'alimentation (mesures réalisées par IMT-University of Neuchatel).....	22
Figure 5. Schéma d'une plate-forme chauffante avec résistance en Ni/Cr sur substrat de verre ou Alumine utilisé pour la modélisation	23
Figure 6. Schéma d'une plate-forme chauffante avec résistance en poly silicium sur membrane fine utilisée pour la modélisation.....	23
Figure 7. Température au niveau de la résistance en fonction de la puissance électrique d'alimentation pour différents types de plates-formes	24
Figure 8. Temps d'initiation en fonction de la puissance électrique pour deux types de plates-formes chauffantes : verre et membranes $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$	25
Figure 9. Flux thermiques lors de l'initiation et profil thermique dans l'épaisseur du matériau énergétique lors d'une initiation réussie.....	27
Figure 10. Temps d'initiation en fonction de la densité de puissance électrique incidente (P_{elect}/S) ($T_i=300^\circ\text{C}$)	28
Figure 11. Durée d'initiation en fonction des puissances électriques d'allumage en supposant que le point d'allumage est en surface.....	29
Figure 12. Courbes d'initiation lors d'un contact thermique matériau énergétique/plate-forme non intime [33]	30
Figure 13. Profil thermique dans un tube de propergol en combustion à section carré.....	31
Figure 14: Vitesse de combustion (V_r) en fonction du côté d'un tube de propergol à base de PAG (a) contenu dans un réservoir en verre (pertes par conduction).....	33
Figure 15. Illustration de la fonction éjecteur pyrotechnique [20]	49
Figure 16. Illustration de la fonction de micro vanne intégrée dans une canalisation ((1) sans et (2) avec micro filtre à particules).....	52
Figure 17. Schéma d'un micro système d'injection pyrotechnique conçu à partir de micro actionneurs pyrotechniques	53
Figure 18. Exemple de résultats : évolution de la pression, température dans la chambre de combustion et volume de liquide en fonction du temps	57
Figure 19. Photo du démonstrateur fabriqué (en blanc) et assemblé sur son boîtier de commande et de mesure	58
Figure 20. Schéma de la seringue sans aiguille à générateur de gaz pyrotechnique industrialisée par cross site technology.....	60
Figure 21. Performances actuelles (2005) des systèmes de propulsion en terme de ΔV et impulsion total [49,55]	68

Figure 22. Poussée obtenue et efficacité des différentes options de micropropulsion.....	69
Figure 23. Schéma d'un propulseur et principe de fonctionnement	70
Figure 24. Schéma des 2 structures de micropropulseurs possibles (a) planaire et (b) vertical.	74
Figure 25. Schéma et dimensions du démonstrateur μ pyros	76
Figure 26. Photo d'une matrice de 16 propulseurs μ pyros non adressés assemblés.....	79
Figure 27. Photos de la partie silicium : tuyère et initiateur.....	80
Figure 28. Photos d'un vecteur assemblé (en blanc : Macor) et en cours d'expérimentation.....	80
Figure 29. Exemple d'un dispositif de mise à feu tout silicium hautement sécurisé (conçu au LAAS).....	92
Figure 30. Architecture d'une micro amorce sécurisée sur silicium a l'état veille sécurisé tel que nous l'avons conçue [16]	93
Figure 31. Schéma des différents états de l'amorce sécurisée: (a) amorce armée; (b) amorce dé-armée; (c) amorce stérilisée	93
Figure 32. Illustration du fonctionnement d'un relai pyro électrique « normalement ouvert »	95
Figure 33. Vue éclatée d'un relai pyro électrique « normalement ouvert ».....	95
Figure 34. Illustration du fonctionnement d'un micro relai thermique « normalement fermé ».....	97
Figure 35. Vue éclatée d'un micro relai thermique « normalement fermé ».....	97
Figure 36. Procédé de fabrication d'une amorce sécurisée sur silicium.....	98
Figure 37. Photos des micro relai (a) normalement ouvert et (b) normalement fermé.....	99
Figure 38. Photo de l'amorce complète en position veille sécurisée.....	99
Figure 39. Design et illustration du fonctionnement de notre dispositif de mise à feu miniature hautement sécurisé	100
Figure 40. Architecture avec amorce traditionnelle petit calibre.....	103
Figure 41. Schéma de principe du concept SMARTINT.....	103
Figure 42. Schéma de principe de notre approche SMARTINIT	104
Figure 43. Synoptique du circuit électronique conçu et mis en œuvre sur circuit PCB.....	105
Figure 44. Photo de la maquette électronique de SMARTINIT sur circuit PCB.....	106
Figure 45. Photo du démonstrateur de la micro amorce SMARTINIT [24, 25]	107
Figure 46. Exemple d'application des microactionneurs pyrotechniques pour le diagnostic jetable	118
Figure 47. Diagramme : bilan et perspective de mon activité de recherche.....	122
Tableau 1. Pression d'actionnement pour les différents mécanismes de micro actionnement	12
Tableau 2. Expression de la vitesse de combustion et du diamètre critique de combustion de matériaux énergétiques	32
Tableau 3. Bilan des matériaux de structures utilisables en micropyrotechnie	37
Tableau 4. Résumé des besoins en micropropulsion pour le spatial et le militaire	66
Tableau 5. Caractéristiques principales des différentes options de micropropulsion trouvées dans la littérature	67
Tableau 6. Etat de l'art des différentes options en micro propulsion sur silicium et projets associés	72
Tableau 7. Comparaison des deux architectures développées	75

Tableau 8. Résumé des dimensions d'un micro propulseur unitaire de type μ pyros : pression et poussée prédites.

77

Tableau 9. Résumé des choix technologiques et des caractéristiques de fabrication des matrices de type μ pyros

78

Tableau 10. Résultats des caractérisations de la poussée sur les propulseurs du démonstrateur μ pyros _____ 83



