



HAL
open science

Conception et réalisation d'un microsystème d'initiation pyrotechnique intelligent et sécurisé pour applications spatiales

Guillaume Taton

► **To cite this version:**

Guillaume Taton. Conception et réalisation d'un microsystème d'initiation pyrotechnique intelligent et sécurisé pour applications spatiales. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2013. Français. NNT: . tel-00989770

HAL Id: tel-00989770

<https://theses.hal.science/tel-00989770>

Submitted on 13 May 2014

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

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



Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

Présentée et soutenue par :

Guillaume TATON

Le lundi 16 décembre 2013

Titre :

Conception et réalisation d'un microsysteme d'initiation pyrotechnique
intelligent et sécurisé pour applications spatiales

ED GEET : Micro et Nanosystèmes

Unité de recherche :

LAAS-CNRS

Directeur(s) de Thèse :

Carole ROSSI

Rapporteurs :

Manel PUIG-VIDAL - Professeur Université de Barcelone

Tarik BOUROUINA - Professeur ESIEE Paris

Autre(s) membre(s) du jury :

Frédéric MORANCHO - Professeur Université Paul Sabatier

Fabien JOUOT - Ingénieur CNES

Sébastien GOUZOU - Ingénieur DGA

Laurent RENAUD - Ingénieur Dassault-Aviation

THESE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE TOULOUSE

Délivré par : *Université Paul Sabatier*

Spécialité : *Micro et Nano Systèmes*

Présentée et soutenue par *Guillaume TATON*

Le *16 décembre 2013*

Titre : *Conception et réalisation d'un microsystème d'initiation pyrotechnique intelligent et sécurisé pour applications spatiales*

JURY

<i>Tarik BOUROUINA</i>	<i>Rapporteur</i>	<i>Professeur ESIEE Paris</i>
<i>Manel PUIG VIDAL</i>	<i>Rapporteur</i>	<i>Professeur Université de Barcelone</i>
<i>Frédéric MORANCHO</i>	<i>Examineur</i>	<i>Professeur Université Paul Sabatier</i>
<i>Fabien JOUOT</i>	<i>Examineur</i>	<i>Correspondant CNES</i>
<i>Laurent RENAUD</i>	<i>Invité</i>	<i>Correspondant Dassault-Aviation</i>
<i>Sébastien GOUZOU</i>	<i>Invité</i>	<i>Correspondant DGA</i>
<i>Carole ROSSI</i>	<i>Directrice de Thèse</i>	<i>Directrice de recherche CNRS</i>

Ecole Doctorale : *Génie Electrique, Electronique, Télécommunications*

Unité de recherche : *LAAS-CNRS*

Directrice de Thèse : *Carole ROSSI*

REMERCIEMENTS

Ce mémoire de thèse présente les travaux de recherche que j'ai effectués au Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS, au sein de l'équipe Nano Ingénierie et Intégration des Systèmes. Je remercie Mr Raja Chatila, Mr Jean Louis Sanchez et Mr Jean Arlat, directeurs successifs du LAAS-CNRS, ainsi que Mr Jean-Yves Fourniols, responsable du groupe N2IS, pour m'avoir accueilli pendant mes trois années de thèse. Je remercie par ailleurs l'ensemble des personnels des services administratifs et supports ainsi que des services techniques pour m'avoir permis d'évoluer dans un environnement de travail de qualité durant ces trois dernières années. Merci enfin au Centre National d'Etudes Spatiales et à Dassault-Aviation pour le financement de ces travaux.

Je tiens à remercier l'ensemble des membres du Jury d'avoir accepté de participer à la soutenance. Merci au président du Jury, Mr Frédéric Morancho, d'avoir accepté d'endosser ce rôle moins d'une semaine avant la soutenance et merci d'avoir animé cette « cérémonie » dans la bonne humeur. Merci aussi aux rapporteurs Mr Tarik Bourouina, et Mr Manel Puig-Vidal, ainsi qu'aux examinateurs Mr Fabien Jouot, Mr Sébastien Gouzou et Mr Laurent Renaud pour vos questions et vos remarques pertinentes sur mes travaux.

Ces travaux de thèse ont été réalisés sous la direction de Carole Rossi, que je souhaite particulièrement remercier pour sa confiance, sa disponibilité et pour avoir su me pousser à toujours faire mieux, en particulier en utilisant habilement les leviers puissants que son mon orgueil et mon égo ! Merci surtout de m'avoir guidé en continu durant ces trois années, et d'avoir sacrifié beaucoup de ton temps et ton énergie pour faire de cette thèse une réussite.

Je tiens à remercier chaleureusement Mr Laurent Renaud, responsable technique de l'étude chez Dassault-Aviation, pour sa participation ô combien active à ces travaux. Les quelques 900 e-mails et autant de coups de fil échangés au cours de la thèse ne suffisent pas à témoigner de ton implication. Merci à toi pour ta grande disponibilité, ta confiance, ton ouverture d'esprit, et surtout tes nombreuses bonnes idées... Merci aussi de m'avoir toujours impliqué dans chacune des phases de ce projet passionnant que je souhaite voir se réaliser un jour !

Merci aux industriels, partenaires de ce projet : ID-MOS, Conesys Europe, HCM.Systrel, Serma Ingénierie, Faulhaber, Preci-dip, IPDiA.

Bien entendu, je souhaite remercier mes collègues du LAAS pour leur aide dans mes travaux, et avec qui j'ai pu partager de nombreux bons moments. Pour le soutien technique en salle blanche, je remercie l'ensemble du service TEAM, avec une mention particulière pour Véronique Conédéra pour ses judicieux conseils, Ludovic Salvagnac pour les nombreux dépôts de thermites et Samuel Charlot pour son travail de chirurgien dans les assemblages complexes de microsystèmes. Merci aussi à Nicolas Mauran et Denis Lagrange du service I2C pour leur participation concernant les caractérisations électriques. Merci à Daniel Médale

pour la fabrication des PCB et à Xavier Dollat pour l'usinage des nombreux prototypes et dispositifs en tous genres.

Merci aux permanents, post docs, doctorants et stagiaires que j'ai pu côtoyer pendant la thèse : Marine, Ilyes, Cédric, Jean-Marie, Anne, Georges, Théo, Mathilde, Marc, Sébastien, Jérémy, Andrès, Sabeha, Stéphane... Merci aussi aux délicats personnages peuplant la salle de sport du LAAS pour vos ateliers « poésie et romantisme ». Merci évidemment à mes deux compagnons d'armes, Cloé et Mehdi, avec qui nous avons traversé cette aventure ensemble. Mehdi, merci de m'avoir supporté dans ton bureau pendant presque 3 ans, sans jamais un reproche et toujours avec le sourire qui te caractérise. Cet exploit est d'autant plus remarquable que je concède volontiers avoir un caractère parfois/souvent détestable... Cloé, toi aussi tu as réalisé un exploit : celui de supporter notre humour de « mâle »/m..... pendant trois ans ! Merci pour ton amitié, nos discussions engagées sur le féminisme, notre amour commun pour la bière... Ludovic, digne successeur de mes travaux, merci d'avoir été à mes côtés pour cette dernière année de thèse. J'avoue avoir eu du mal à accepter de passer le flambeau, mais ta motivation, ton entrain et ta bonne humeur m'ont rendu la tâche moins amère. Je te souhaite bon courage et j'espère que tu amèneras ce projet le plus loin possible ! Adrien enfin, tu as en quelques sortes joué le rôle de parrain bienveillant, sûrement sans le savoir. Tes conseils avisés m'ont probablement évité bien des soucis... Merci d'avoir posé des congés rien que pour ma soutenance ! Et merci pour ton amitié.

Pour finir, je souhaite remercier tous les membres de ma famille et de ma belle famille pour m'avoir soutenu et encourager tout au long de cette aventure. Je remercie tout particulièrement mes parents, qui ont sacrifié beaucoup pour me permettre de faire des études ainsi que pour leur amour, qui est le premier des soutiens. Merci aussi à Caro et Gaby et les jeunes Jeanne et Timothée pour votre hospitalité lors de mes nombreux déplacements en région parisienne.

J'achève ces remerciements par celle qui compte le plus, celle qui a partagé ma vie durant les trois années de cette belle aventure. Fanny, tu as toujours été là pour me soutenir, m'encourager, me conseiller, me rassurer... Tu es celle qui équilibre le personnage excessif que je suis, qui tente de faire de moi quelqu'un de sociable, de diplomate. Au cours de ces trois années, mon travail n'a pas toujours simplifié notre vie à deux et je m'en excuse. Aucun des mots que j'écris ici ne pourra témoigner de ce que je te dois... merci !

SOMMAIRE

SOMMAIRE	1
ABREVIATIONS	5
INTRODUCTION GENERALE	7
CHAPITRE 1 : PROBLEMATIQUE – LA MINIATURISATION DES SYSTEMES PYROTECHNIQUES	11
1. Introduction	12
2. Contexte.....	12
3. La pyrotechnie dans un lanceur – l’architecture Ariane 5.....	15
3.1. L’architecture classique pyrotechnique Ariane 5 et les différents équipements pyrotechniques constitutifs.....	16
3.2. Les limites de ce type d’architecture	21
4. Vers une architecture pyro-numérique	22
4.1. L’architecture opto-pyrotechnique.....	22
4.2. L’architecture électrique	23
4.3. L’architecture pyro-numérique.....	24
4.4. Résumé et analyse des différentes architectures	24
5. Etat de l’art des initiateurs pyrotechniques sécurisés intelligents miniatures.....	27
5.1. Les différentes technologies d’initiateurs électro-pyrotechniques	27
5.2. Les différents matériaux énergétiques d’initiation	33
5.3. Les systèmes de sécurisation mécanique.....	38
6. Notre problématique	41
7. Objectifs et innovations de la thèse	42
8. Conclusions	43
CHAPITRE 2 : CONCEPTION DU SYSTEME INITIATEUR A FONCTIONS INTEGREES	45
1. Introduction	46
2. Cahier des charges	46
2.1. Exigences dimensionnelles	46
2.2. Connectique	47
2.3. Autonomie énergétique et décisionnelle.....	47
2.4. Sécurité, sureté et fiabilité	47
2.5. Tenue aux environnements.....	48
3. Architecture du système IFI	48
3.1. Inventaire des blocs fonctionnels du système	48
3.2. Architecture fonctionnelle.....	49
3.3. Choix préliminaire des technologies	50
4. Conception des fonctions constitutives de l’IFI	51
4.1. Interface mécanique et interconnexions électriques.....	51
4.2. Intelligence du système	53
4.3. Stockage local d’énergie	54
4.4. Sécurité électrique	55
4.5. Intégration mécanique de l’électronique de commande	59
4.6. Armement mécanique.....	60
5. Conversion électro-pyrotechnique	63

5.1.	Choix du type de thermitte utilisée.....	64
5.2.	Choix du substrat	64
5.3.	Géométries de la puce, du filament et de la thermitte	66
5.4.	La simulation thermique des structures sur pyrex, sur membrane SU-8 et sur film SU-8.....	67
6.	Conclusion.....	73
CHAPITRE 3 : FABRICATION ET ASSEMBLAGE DE L'INITIATEUR A FONCTIONS INTEGRES		75
1.	Introduction	76
2.	Fabrication du corps d'interface mécanique et électrique	76
3.	Fabrication d'un démonstrateur de l'électronique de l'IFI	78
4.	Mise au point du procédé de fabrication des puces de conversion électro-pyrotechnique sur membrane SU-8	79
4.1.	Mise au point du procédé de fabrication des membranes suspendues en SU-8.....	79
4.2.	Réalisation du filament et des plots de contact en or.....	88
4.3.	Dépôt et mise en forme de la thermitte	92
4.4.	Découpage du wafer en puces individuelles	93
5.	Fabrication des puces de conversion électro-pyrotechnique sur substrat Pyrex	94
6.	Fabrication et assemblage du système d'armement mécanique	94
6.1.	Report des puces sur la plateforme PCB porte puce	94
6.2.	Assemblage de la plateforme d'armement sur l'axe du moteur	96
6.3.	Réalisation des interconnexions entre le corps mécanique de l'IFI et le système d'armement mécanique.....	96
7.	Conclusion.....	99
CHAPITRE 4 : CARACTERISATIONS DE L'INITIATEUR A FONCTIONS INTEGRES		101
1.	Introduction	102
2.	Caractérisations du corps d'interface mécanique de l'IFI	102
2.1.	Tenue mécanique du filetage et du scellement à haute pression	102
2.2.	Mesure de la perméabilité des scellements de verre.....	103
3.	Validation de la carte de simulation de l'électronique de commande	104
3.1.	Validation de la communication avec le bus numérique.....	104
3.2.	Validation du pilotage des différentes fonctions de l'IFI.....	105
4.	Caractérisations en initiation des puces de conversion électro-pyrotechniques sur Pyrex et sur membrane SU-8	105
4.1.	Description du banc de test.....	106
4.2.	Comparaison des propriétés des puces sur substrat Pyrex et sur membrane SU-8.....	107
5.	Caractérisations de l'allumage de charges relais inflammables, propulsives et explosives	111
5.1.	Initiation de charges inflammables et propulsives.....	111
5.2.	Initiation de charges explosives.....	112
6.	Tenue des puces de conversion électro-pyrotechniques aux environnements.....	115
6.1.	Description des agressions réalisées sur les puces.....	116
6.2.	Résultats des essais de tirs	117
7.	Conclusion.....	118
CONCLUSION GENERALE		121
ANNEXE 1 : QUELQUES NOTIONS DE PYROTECHNIE.....		127

ANNEXE 2 : RECUEIL DES EXIGENCES DE SECURITE	131
ANNEXE 3 : RECUEIL DES EXIGENCES DE TENUE AUX ENVIRONNEMENTS	135
ANNEXE 4 : LES DIFFERENTES SOLUTIONS D'ADRESSAGE DES INITIATEURS	139
ANNEXE 5 : STRATEGIE DE CHARGE DU CONDENSATEUR DE STOCKAGE LOCAL D'ENERGIE	143
BIBLIOGRAPHIE	147

ABREVIATIONS

BSA	Boitier de Sécurité d'Armement
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
EAP	Etage d'Accélération à Poudre
ESA	European Space Agency
ESD	Electro Static Discharge
ESI	European Standard Initiator
GBSe	Nitroglycérine Nitrocellulose Sphérique écrasée
IFI	Initiateur à Fonctions Intégrées
ITAR	Internation Traffic in Arms Regulations
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems
MIL-STD	Military Standard
MIRA	Mélange d'Inflammation RApide
MLA	Micro Lanceur Aéroporté
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NSSDC	National Space Science Data Center
PCB	Printed Circuit Board
PEB	Post Exposure Bake
RDX	Hexogène
REACH	Registration, Evaluation, Authorization of Chemicals
RMV	Relais Multi Voies
RR	Relais Retard
SCB	Semi Conductor Bridge
STANAG	STANdard AGreement

INTRODUCTION GENERALE

Depuis les années 1950, le développement des lanceurs spatiaux est un secteur stratégique qui a connu de nombreuses évolutions, en particulier lors de la course à l'Espace entre les puissances soviétiques et américaines. Dérivée des armes de guerre comme le missile V2, l'astronautique s'appuie depuis l'origine sur des équipements pyrotechniques permettant l'allumage des moteurs, la propulsion, et le découpage des différents étages.

Jusqu'à présent, les évolutions des lanceurs ont consisté à augmenter leurs performances en particulier concernant la capacité d'emport, en augmentant les niveaux de poussées et de volume sous coiffe, conduisant à des lanceurs très lourds comme Ariane 5 en Europe, Atlas 5 aux USA, ou encore Proton en Russie. Aujourd'hui, les évolutions des lanceurs semblent principalement dictées par le marché commercial de la mise en orbite de satellites et poussent les industries du secteur à concevoir des lanceurs à plus faible coûts. Parallèlement à cette tendance, les progrès dans le secteur de la micro-électronique ont permis le développement des micro/nano-satellites, à l'origine d'une réduction des coûts des missions spatiales. Toutefois, le prix de mise en orbite de ces micro/nano-satellites reste un verrou, puisque la seule solution consiste aujourd'hui à placer ces petites charges utiles en tant que passager d'un vol commercial classique, à l'origine de contraintes logistiques et de coûts de lancement encore élevés. Ces difficultés poussent alors les agences spatiales à envisager de nouvelles solutions de lancement, comme par exemple les micro-lanceurs aéroportés. L'association de l'avion et du lanceur présente en effet des avantages en termes de performance, de flexibilité et de réactivité.

C'est dans ce contexte de développement de lanceurs nouvelles générations que s'inscrivent ces travaux de thèse qui visent la miniaturisation des systèmes pyrotechniques pour les applications spatiales. En effet, la miniaturisation de ces systèmes permettra un gain de masse à l'origine d'une plus grande rentabilité des lanceurs en accord avec les besoins du marché, mais permettra aussi l'émergence de micro-lanceurs pour lesquels les masses et encombrements des dispositifs pyrotechniques représentent un verrou technologique important.

Ce travail s'appuie sur le savoir faire du LAAS qui, dès 1995, a eu l'idée d'intégrer des matériaux pyrotechniques dans les microsystèmes, à l'origine du développement de la micropyrotechnie [1]. Utilisés en premier lieu pour des applications médicales [2], le potentiel de la micro-pyrotechnie a ensuite été exploité sur de nombreux projets comme la micro-propulsion de satellites [3] ou de drones [4], l'initiation sécurisée [5] [6] ou encore l'actionnement fluide [7]. Notre approche consiste ici à pousser l'intégration de ces PyroMEMS dans des systèmes plus complexes intégrant, en plus des fonctions pyrotechniques, des sécurités électriques et mécaniques, mais aussi de la testabilité et des fonctions de communication dans un volume extrêmement réduit. Notre objectif de miniaturisation implique alors de maîtriser l'interfaçage de fonctions de différentes

natures (électriques, mécaniques, pyrotechniques) en respectant les contraintes de fiabilité, de sécurité et de sûreté de fonctionnement dans les environnements sévères rencontrés au cours des missions spatiales. Se rajoutent à ces exigences, les contraintes nouvelles d'innocuité chimique apportées par les réglementations environnementales européennes.

Ce travail de recherche, financé par le CNES et Dassault-Aviation, tire parti des travaux antérieurs menés au LAAS ayant permis de réaliser des initiateurs pyrotechniques sécurisés en technologie MEMS [5] [6], mais aussi d'intégrer des matériaux énergétiques de types nano-thermites multicouches à l'aide des technologies de la micro-électronique [8]. Nous utiliserons alors ces briques technologiques comme point de départ pour la conception d'un initiateur pyrotechnique miniature sécurisé et intelligent permettant l'actionnement des fonctions classiques d'un lanceur. Ce manuscrit de thèse s'organise en quatre chapitres détaillant les travaux réalisés depuis l'identification de la problématique jusqu'aux essais réalisés sur le démonstrateur.

Dans le premier chapitre, nous commencerons par montrer les évolutions du contexte spatial, puis nous présenterons l'architecture et les différents équipements pyrotechniques actuellement utilisés sur Ariane 5 en y pointant les principales limitations. Nous évaluerons alors les avantages et inconvénients des différentes architectures possibles pour réaliser les systèmes pyrotechniques de demain et montrerons que l'architecture pyro-numérique répond à nos besoins de gains de masse, de volume et réduction de coûts. Cette architecture reposant sur le déploiement d'initiateurs pyrotechniques miniatures, sécurisés et intelligents, nous considérerons plus en détails les différentes technologies permettant de réaliser la conversion électro-pyrotechnique, mais aussi les matériaux pyrotechniques utilisables et enfin les solutions de désalignement des chaînes pyrotechniques utilisées dans les barrières de sécurité d'armement mécanique. Nous verrons alors qu'il n'existe pas de solution actuellement disponible permettant de répondre à la fois à nos besoins de miniaturisation, d'innocuité chimique, de sécurité et de sûreté de fonctionnement, impliquant alors la conception et la réalisation d'un Initiateur à Fonctions Intégrées (IFI) capable de réaliser des opérations de conversion électro-pyrotechnique, de sécurités électrique et mécanique, de stockage local d'énergie, de testabilité et de communication.

Le second chapitre sera consacré à la conception précise des différentes briques constitutives de l'IFI. Nous commencerons par établir le cahier des charges puis nous présenterons l'architecture fonctionnelle de l'IFI en détaillant les interactions existantes entre les différentes fonctions. Nous préciserons alors les choix technologiques puis la conception détaillée de chacune des fonctions : l'interface mécanique et électrique, l'intelligence du système, le stockage local d'énergie, la sécurisation électrique et l'armement mécanique. Concernant la conception de la fonction conversion électro-pyrotechnique, nous proposons d'adapter les technologies de la micro-fluidique [9] pour réaliser des puces d'initiation sur membrane polymère, permettant alors d'obtenir l'isolation

thermique des structures sur membranes, tout en conservant la bonne tenue mécanique du substrat. Nous réaliserons alors des simulations par éléments finis modélisant le comportement thermique de ces puces en comparaison des technologies aujourd'hui disponibles. Nous terminerons ce second chapitre par un résumé de nos choix technologiques en y pointant les innovations apportées par rapport aux solutions existantes.

Le troisième chapitre décrira les procédés utilisés pour réaliser les briques constitutives de l'IFI. Nous commencerons par le procédé de fabrication du corps d'interface mécanique et électrique puis nous détaillerons ensuite la fabrication d'un démonstrateur de l'électronique de commande et de contrôle de l'IFI. Nous détaillerons ensuite la mise au point du procédé de fabrication de puces de conversion électro-pyrotechnique sur membrane en technologie micro-électronique. Nous présenterons enfin les étapes d'assemblage permettant d'intégrer ces puces sur une plateforme d'armement mécanique puis les étapes d'intégration de cette plateforme sur le dispositif d'armement mécanique intégré dans l'IFI. L'objectif est ici de pouvoir disposer d'un démonstrateur complet permettant de réaliser les premières caractérisations pour valider et optimiser nos choix technologiques.

Le dernier chapitre de la thèse sera consacré aux caractérisations réalisées sur le prototype de l'IFI. Chaque brique technologique sera alors testée pour valider leur fonctionnalité, mais aussi leur tenue aux ambiances spatiales. Ainsi, la tenue mécanique et l'herméticité du corps d'interface mécanique seront évaluées, de même que la capacité de l'électronique de commande et de contrôle à communiquer et piloter les différents modules de l'IFI. Des caractérisations plus fines seront réalisées sur les puces de conversion électro-pyrotechniques permettant de connaître précisément leurs performances même après vieillissement accéléré, ainsi que leur capacité à initier des charges pyrotechniques inflammables, propulsives ou explosives. Finalement, nous présenterons une analyse globale des résultats et proposerons des éléments de prospective permettant d'optimiser la conception de l'IFI.



Chapitre 1

Problématique – La miniaturisation des systèmes pyrotechniques

1. Introduction

Le LAAS a eu l'idée dès 1995 d'intégrer des matériaux pyrotechniques dans des microsystèmes pour réaliser des actionnements puissants. Depuis les années 2005, les principes généraux et les bases technologiques de cette discipline technologique, appelée micro-pyrotechnie, ont été établis et la faisabilité et la pertinence [1] démontrées au travers de nombreuses applications dont l'injection de médicament [2], la micro-propulsion spatiale [3] et militaire [4], l'initiation sécurisée [5] [6] et l'actionnement micro-fluidique [7]. Tous ces développements ont pour base commune l'objectif de comprendre, de maîtriser et de sécuriser les mécanismes d'initiation des matériaux énergétiques et de tirer profit des technologies MEMS pour intégrer des systèmes plus ou moins complexes et sécurisés dans un moindre volume et coût. C'est aussi la problématique qui nous concerne ici. Seul le domaine d'application est différent puisque pour la première fois, l'application est celle de la pyrotechnie dans les lanceurs spatiaux.

Ce premier chapitre vise à préciser la place des systèmes pyrotechniques dans les lanceurs de manière à introduire et justifier les travaux que nous avons réalisés sur la conception et la réalisation d'un initiateur pyrotechnique miniature sécurisé intelligent appelé Initiateur à Fonctions Intégrées (IFI). Après avoir exposé le contexte qu'est la pyrotechnie appliquée aux lanceurs spatiaux, nous mettrons en évidence les besoins de miniaturisation et de modernisation des systèmes pyrotechniques utilisés sur les lanceurs. Nous présenterons un état de l'art pour lequel nous nous bornerons à une explication du principe de fonctionnement concernant les initiateurs pyrotechniques sécurisés. En conclusion de cet état de l'art, nous dresserons une analyse synthétique des différentes solutions existantes. Nous présenterons alors notre approche, que nous tenterons de positionner par rapport aux autres technologies. Nous terminerons ce premier chapitre par l'exposé des objectifs de ce travail de thèse en y pointant les innovations recherchées.

2. Contexte

L'accès à l'espace constitue un secteur stratégique qui a connu un développement rapide depuis les années 1950, motivé pendant longtemps par la course à l'espace entre les États-Unis et l'Union Soviétique. La fusée Véronique est le premier lanceur Français, permettant à la France dès 1952, d'être la troisième nation à disposer d'un accès à l'espace [10]. Sous l'impulsion du Général de Gaulle, le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) est créé en 1961 avec pour première mission de coordonner et animer le programme spatial Français. Un an plus tard, le gouvernement français demande à Dassault-Aviation de concevoir un missile balistique pour l'état d'Israël, c'est le début du programme MD-620 Jéricho. Ce missile balistique réalise son premier vol en février 1965. Le CNES atteint son objectif quelques mois plus tard, avec le lancement de la fusée Diamant A permettant l'envoi du premier satellite Français Astérix 1A en novembre 1965 [11].

De 1961 à 1981, la France se positionne en moteur de l'Europe spatiale et organise aussi l'activité à l'échelle nationale. Durant ces vingt années, elle développe les lanceurs, les

satellites, les pas de tirs, les laboratoires ainsi que les industries associées. L'Agence Spatiale Européenne (ESA) est fondée en 1975 pour supporter, entre autre, le programme Ariane 1 lancé en 1973 et financé au deux tiers par la France. Le premier vol d'essai à lieu avec succès en 1979 [12] permettant l'envoi du satellite CAT-1 pour Capsule Ariane Technologique (appelé aussi Obélix en raison de ses 1600 kg) [13]. Depuis Ariane 1, le lanceur évolue plusieurs fois pour aboutir à Ariane 4. Les évolutions consistent à augmenter les niveaux de poussée, la durée de la propulsion et l'augmentation du volume sous coiffe, pour répondre aux besoins du marché commercial, de plus en plus diversifié puisque les satellites deviennent de plus en plus lourds et imposants. De 1988 à 2003, 116 fusées Ariane 4 sont lancées avec un taux de fiabilité de plus de 97% [14]. C'est cette fiabilité qui fait le succès commercial d'Ariane 4 avec près de 60% du marché mondial des lancements commerciaux.

Début des années 1990, l'Europe anticipe les évolutions du marché et lance un programme de développement d'un lanceur encore plus puissant qu'est Ariane 5. Cette dernière version d'Ariane lui permet d'assurer son indépendance dans l'accès à l'espace et de maintenir sa position sur le marché des vols commerciaux, grâce à une réduction significative des coûts de lancement ainsi qu'un gain de capacité d'emport, jusqu'à 20 tonnes en orbite basse. Aujourd'hui, Ariane 5 représente plus de 50% du marché mondial des vols commerciaux en orbite géostationnaire [15].

Actuellement, l'activité commerciale est en légère augmentation et correspond aux renouvellements de satellites devenus obsolètes ainsi qu'au développement de la télévision par satellite. Il existe une large gamme de lanceurs commerciaux conduisant à une véritable guerre des prix entre opérateurs de lancements. Ainsi, le coût d'envoi d'un satellite en orbite de transfert géostationnaire peut varier de 13 000€ à 18 000€ par kg de satellite [16]. Malgré cette concurrence, ce prix reste prohibitif et deux constructeurs américains subventionnés par l'état se sont lancés dans le développement de lanceurs bas coût (le Falcon 9 de SpaceX vise un prix de 3 000\$/kg).

Dans ce contexte en évolution et pour répondre à ces nouveaux besoins du marché spatial, la France et l'Europe proposent le développement d'un nouveau lanceur plus moderne, Ariane 6, avec comme échéance, une disponibilité en 2021. Ce projet, accepté lors de la conférence ministérielle de l'ESA de 2012 [17], propose une nouvelle version de lanceur visant à accroître la flexibilité des lancements, de réduire les coûts de fabrication et de lancement pour augmenter la compétitivité. N'embarquant qu'un satellite à la fois, contrairement à Ariane 5, les lancements seront donc plus flexibles et réactifs. Les clients n'auront alors plus besoin d'attendre une combinaison de 2 satellites prêts en même temps et dont les masses et volumes sont compatibles avec les performances du lanceur.

La seconde tendance majeure qui marque le domaine spatial depuis le début du 21^{ème} siècle est la miniaturisation pour réduire le coût d'accès à l'espace. La tendance à la

miniaturisation et à l'exploration de petits satellites s'est amorcée dès les années 90, à contre courant des grands programmes spatiaux. Cette voie est explorée avec la plate-forme PROTEUS en 1996 (Plate-forme Reconfigurable pour l'Observation, les Télécommunications, et les Usages Scientifiques) qui veut répondre aux besoins de satellites de 500kg à 700kg placés en orbite basse. Le premier satellite s'appuyant sur cette plate-forme est Jason-1, lancé en 2001 [18]. Depuis 4 autres satellites (CALIPSO [19], CoRoT [20], Jason-2 [21], et SMOS [22]) ont été lancés.

La plateforme Myriades prend le relais de PROTEUS à partir de 1998 pour le développement de microsattelites de 100 à 150kg. Cette plateforme utilise largement des composants commerciaux à bas coûts présentant de hauts niveaux d'intégration, réduisant à nouveau massivement les coûts de fabrication et de lancement. A l'heure actuelle, 14 satellites reposant sur cette plateforme ont déjà été lancés aujourd'hui.

Enfin, les nano-satellites sont aujourd'hui une réalité. Le format CubeSAT défini par l'Université Polytechnique de Californie et l'Université de Standford (USA), correspondant à un cube de 10 cm de coté pour une charge utile de moins de 1,33kg permet aux universités de lancer des expériences spatiales à moindre coût. A titre d'exemple, lors du 1^{er} lancement de Vega en février 2012 [14], 8 nano-satellites de format CubeSAT ont été placés en orbite pour le compte de 8 universités européennes (Bologne, Vigo, Montpellier, Turin, Bucarest, Varsovie, Budapest, La Sapienza de Rome). Le LAAS a participé dans les années 2000 à cette évolution : en 1997, nous avons proposé le concept de matrice de micro-propulseurs digitaux sur Si [23] pour le contrôle d'attitude ou le maintien en orbite de nano-satellites (de poids < 20kg) et avons été en Europe les leaders de ce domaine de recherche avec, entre autre, la coordination d'un projet Européen, μ PYROS dans le 5^{ème} programme cadre [24].

Outre le problème du contrôle d'attitude ou du maintien à poste de ces petits engins qui aujourd'hui ont trouvé des solutions technologiques dans la propulsion électrique ou chimique, leur mise en orbite reste un verrou. Aujourd'hui, la seule solution pour les mettre en orbite consiste à les positionner en tant que passagers de l'envoi d'un satellite lourd avec l'un des lanceurs de la gamme disponible en Europe. La logistique nécessaire à ce type d'envoi est donc lourde puisqu'il doit y avoir concordance des disponibilités des satellites, et compatibilité des masses et volumes de satellites, ainsi que des orbites de missions. Cette logistique implique un surcoût, des délais, des contraintes et représente un frein au développement des micro/nano-satellites. C'est pourquoi le CNES, en collaboration avec le Centre de Développement Technologique pour l'Industrie espagnol (CDTI) et l'agence spatiale allemande (DLR) lancent en 2008 un projet de micro-lanceur (projet Aldebaran). L'étude retient le concept de Micro Lanceur Aéroporté (MLA) sous avion Rafale dans un vol subsonique et à fort angle d'incidence lors de la séparation. Outre la mission principale qu'est le lancement de micro/nano-satellites, ce projet doit aussi permettre de tester de nouvelles technologies qui pourraient être mises en œuvre sur Ariane 6 [25].

C'est dans ce contexte de développement de lanceurs nouvelles générations (gros lanceur Ariane 6 et micro-lanceur MLA) que s'inscrivent ces travaux de thèse qui visent la miniaturisation des systèmes pyrotechniques assurant des fonctions diverses avec pour objectif le maintien voire l'amélioration des performances et de la fiabilité qui ont fait le succès des lanceurs Européens.

3. La pyrotechnie dans un lanceur – l'architecture Ariane 5

Le fonctionnement et lancement d'une fusée fait appel à de nombreux équipements pyrotechniques. A titre d'exemple, lors du décollage d'Ariane 5, le démarrage de la turbopompe du moteur Vulcain, l'allumage de l'étage principal cryotechnique et des Etages d'Accélération à Poudre (EAP) sont réalisés grâce à des équipements pyrotechniques. Plus tard au cours du vol, la séparation et l'éloignement des différents étages utilisent également des équipements pyrotechniques.

Ces équipements pyrotechniques reposent principalement sur l'utilisation de substances énergétiques (explosifs, poudres et propergols) qui présentent la propriété de se transformer rapidement en libérant une énergie chimique importante. Intégrés dans des dispositifs, ces matériaux sont à ce jour le seul moyen de produire des effets mécaniques, thermiques, chimiques, sonores, lumineux... tout en présentant les atouts suivants :

- un faible encombrement pour une énergie intrinsèque importante
- une faible énergie d'activation
- une fiabilité importante

Les équipements pyrotechniques sont connectés mécaniquement et électriquement suivant des chaînes pyrotechniques permettant la génération et la distribution des ordres jusqu'à la fonction terminale (effet à réaliser). Une chaîne pyrotechnique consiste donc en une succession d'équipements distribués selon des architectures plus ou moins complexes permettant d'assurer le fonctionnement avec un niveau de fiabilité et succès satisfaisants. Un ensemble de chaînes pyrotechniques définit un système pyrotechnique.

Dans les paragraphes qui suivent, l'architecture des systèmes pyrotechniques d'un lanceur de type Ariane 5, puis les différents équipements constitutifs de cette architecture sont détaillés et analysés notamment en termes de masse et encombrement.

3.1. L'architecture classique pyrotechnique Ariane 5 et les différents équipements pyrotechniques constitutifs

Le lanceur Ariane 5 dispose de plusieurs chaînes pyrotechniques réparties dans les différents étages. Malgré la diversité des fonctions à générer, l'architecture générale d'une chaîne pyrotechnique sur Ariane 5 est **standardisée** (cf Figure 1). Elle obéit entre autre à un certain nombre de **règles** [26] permettant au lanceur d'être **Fail Safe** et **Fail Operational** et impose :

- une indépendance électrique (batterie) et géographique sans interférence d'une voie sur l'autre,
- des initiateurs pyrotechniques capables de transformer un signal électrique en signal détonique,
- des barrières de sécurités d'armement motorisées (notés BSA sur la figure 1 pour boîtiers de sécurité d'armement),
- une logique de transmission des ordres détoniques via des lignes de transmission, et des retards pyrotechniques pour assurer le séquençage des ordres sur les fonctions terminales,
- une redondance de transmission de l'onde de choc via l'utilisation de deux voies (le fonctionnement d'une voie étant suffisant pour assurer le fonctionnement du système),
- un équipement pyrotechnique final non redondé appelé fonction terminale (FT).

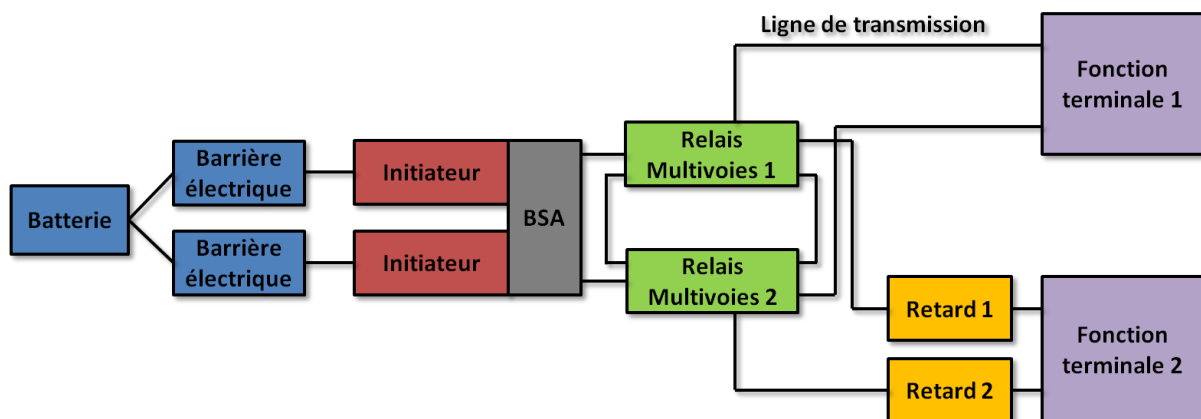


Figure 1. Architecture standard d'une chaîne pyrotechnique Ariane 5

Dans ce qui suit, nous détaillons chacun des éléments constitutifs, après la batterie et les protections électriques, c'est-à-dire, les initiateurs pyrotechniques, les BSA, relais, retards et fonctions terminales.

a. Les initiateurs pyrotechniques

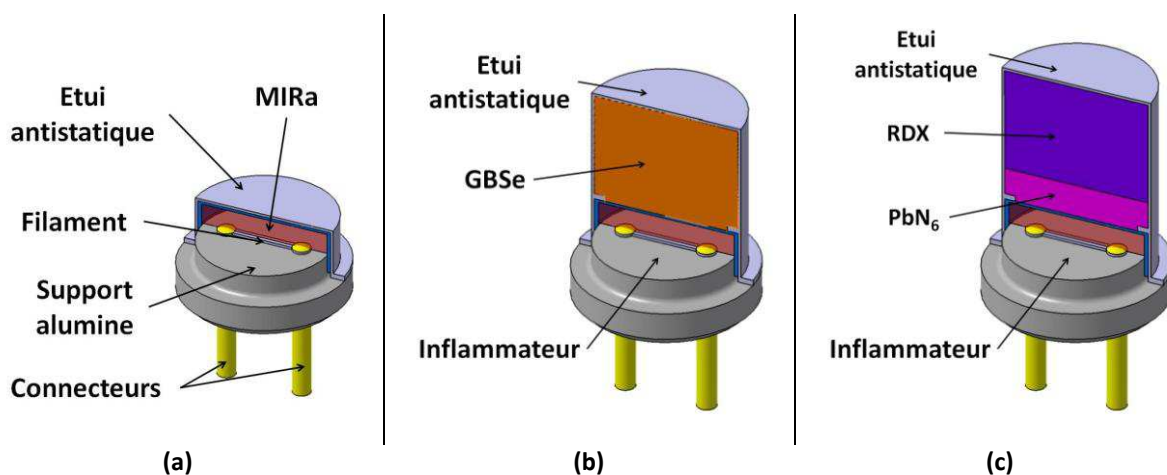
Les initiateurs pyrotechniques sont les premiers éléments d'une chaîne pyrotechnique. Leur rôle consiste à transformer un signal électrique en signal pyrotechnique. Il existe trois types d'initiateurs différents selon le type de signal et donc le mode de décomposition pyrotechnique désiré :

- L'inflammeur : génère une flamme (combustion)
- L'étoupille : génère une onde de pression supersonique dans l'air (déflagration)
- Le détonateur : génère une onde de choc supersonique dans le solide (détonation)

Un inflammeur (voir Figure 2a) est constitué d'un filament résistif placé sur un support en alumine. Une composition d'allumage de type MIRA (Mélange d'Inflammation RAPide) est placée au contact du filament. La composition pyrotechnique est chargée dans un étui antistatique pour la protéger contre les décharges électrostatiques (ESD). Lors du passage du courant, le filament s'échauffe par effet Joule et enflamme la composition d'allumage, réalisant ainsi **l'initiation de type combustion**.

Une étoupille (voir Figure 2b) consiste en un inflammeur coiffé d'un relais amplificateur chargé d'une composition propulsive de type GBSe (Nitroglycérine Nitrocellulose Sphérique écrasée). Lors de l'initiation de l'inflammeur, la GBSe contenu dans le relais réalise une **transition combustion-déflagration** au contact de la flamme, conduisant à la production de gaz, et donc de **pression**.

Un détonateur (voir Figure 2c) consiste en un inflammeur coiffé d'un relais chargé d'un explosif primaire de type Azoture de plomb (PbN_6), et d'un explosif secondaire de type hexogène (RDX). Lors de l'initiation de l'inflammeur, la flamme générée allume l'explosif primaire, qui réalise alors une **transition combustion-détonation**. L'explosif secondaire s'initie alors en détonation, conduisant à la génération d'une **onde de choc détonante**.



Les initiateurs pyrotechniques **sont montés sur les équipements par vissage**. L'interface mécanique d'un initiateur est standardisée pour être monté sur tous les équipements. Il s'agit d'un filetage M10 x 1 longueur 10 (voir Figure 3). Cette norme est celle des Initiateurs Standard Européens notée ESI (European Standard Initiator), mais aussi celle de la NASA notée NSI (NASA Standard Initiator).

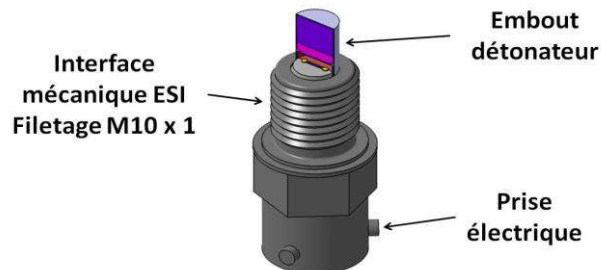


Figure 3. Initiateur Standard Européen (ESI) représenté ici coiffé d'un embout détonateur

Les initiateurs **répondent aussi aux exigences de sécurité du STANAG 4187** [27] : ils supportent sans mise à feu ni dégradation le passage d'un courant de 1A ou la dissipation d'une puissance de 5W pendant 5min. Le courant nominal de mise à feu préconisée est de 4,1A pendant 15ms. Leur masse est d'environ 15 grammes.

b. Les boîtiers de sécurité d'armement (BSA)

Les BSA ne sont pas des équipements pyrotechniques à proprement parler, dans la mesure où ils n'embarquent pas de matériau énergétique. Leur rôle consiste à intercepter le signal pyrotechnique émis par un détonateur. Un BSA est commun à deux voies pyrotechniques en redondance. Deux détonateurs sont vissés en entrée du BSA en vis-à-vis desquels se situent deux interfaces de sortie permettant le montage de deux lignes de transmission pyrotechniques. Une barrière mécanique permet d'intercepter ou non le signal pyrotechnique (onde de détonation) entre l'entrée et la sortie du BSA (interception en position sécurisée « S », passage en position armée « A »). La position de la barrière mécanique est pilotée par un moteur électrique couplé à un réducteur. Pour réaliser un armement ou un désarmement, la barrière effectue une rotation de 90° en 1,8s +/- 0,3s.

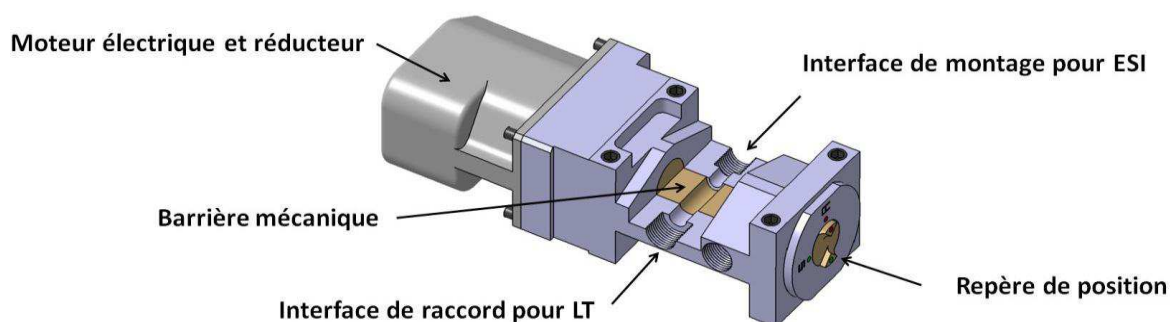


Figure 4. Schéma de principe d'un BSA (représenté ici en position Armée)

Les BSA sont initialement placés en position sécurisée. L'armement est réalisé juste avant le lancement. La masse d'un BSA est de 1,3 kg ce qui revient à 700 g par initiateur.

c. Les lignes de transmission (LT)

Comme leurs noms l'indiquent, les lignes de transmissions sont chargées de transmettre le signal pyrotechnique détonant d'une extrémité à l'autre de la ligne. Elles sont constituées de (voir Figure 5) :

- deux interfaces mécaniques (entrée et sortie) intégrant un relais pyrotechnique chargé de RDX.
- un cordeau de 1,5mm de diamètre de RDX sous plomb protégé par une gaine assurant son étanchéité avant et après fonctionnement.

Lorsqu'une onde de choc arrive au contact de l'entrée de la ligne, le relais chargé s'initie. L'onde de choc produite se propage alors le long de la ligne jusqu'au relais chargé de sortie qui transmet le signal à l'équipement sur lequel il est vissé.

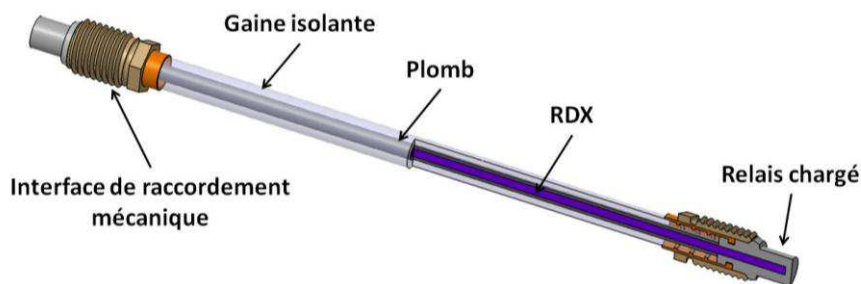


Figure 5. Schéma de principe d'une ligne de transmission détonique

Une ligne de transmission peut être cintrée avec un rayon de courbure minimum de 40mm sans subir de dégradation. La masse linéique d'une ligne de transmission est de 145g/m. Selon le type d'interface mécanique, les embouts de ligne ont une masse de 2 x 30g (embouts longs), ou 2 x 20g (embouts courts).

d. Les relais multi-voies (RMV)

Un relai multivoies permet de distribuer un ordre détonique d'entrée vers plusieurs sorties de manière synchronisée. Il est composé de 10 interfaces permettant de raccorder des lignes de transmission, interconnectées par un relais détonant de RDX sous plomb de forme annulaire (voir Figure 6). Ces interfaces peuvent servir aussi bien d'entrée comme de sortie du signal. Lorsque l'une des 10 voies reçoit une onde de choc détonante, le cordeau annulaire s'initie et distribue l'onde de choc sur les 9 autres voies. La masse d'un relai multivoies est de 356 g.

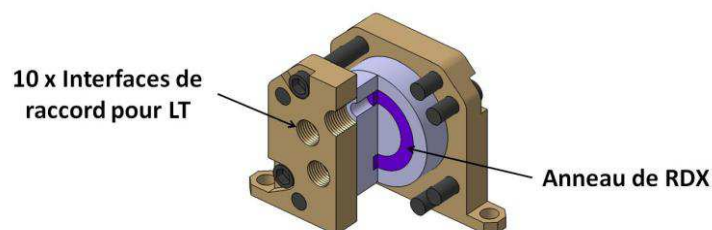


Figure 6. Schéma de principe d'un RMV

e. Les relais temporisés

Les relais temporisés appelés aussi relais retard (RR) (voir Figure 7) ont pour fonction de retarder la transmission d'une onde de détonation. Ils comportent une entrée et une sortie permettant chacune de recevoir une ligne de transmission, entre lesquelles se situent :

- Une amorce inflammatrice à percussion
- Un tube chargé de composition retardatrice (ou colonne retard)
- Un relais détonateur chargé de 50mg de PbN_6 et 30mg de RDX

L'onde de choc en entrée du retard vient taper un percuteur qui initie alors en combustion la composition inflammable. On réalise de cette manière une transition détonation-combustion. La flamme ainsi générée allume la composition retard puis se propage alors dans le tube jusqu'à sa sortie où se trouve le relais détonateur. La flamme initie alors l'azoture de plomb qui réalise une transition combustion-détonation. L'azoture de plomb initie alors le RDX et génère ainsi une onde détonante en sortie de relais retard.

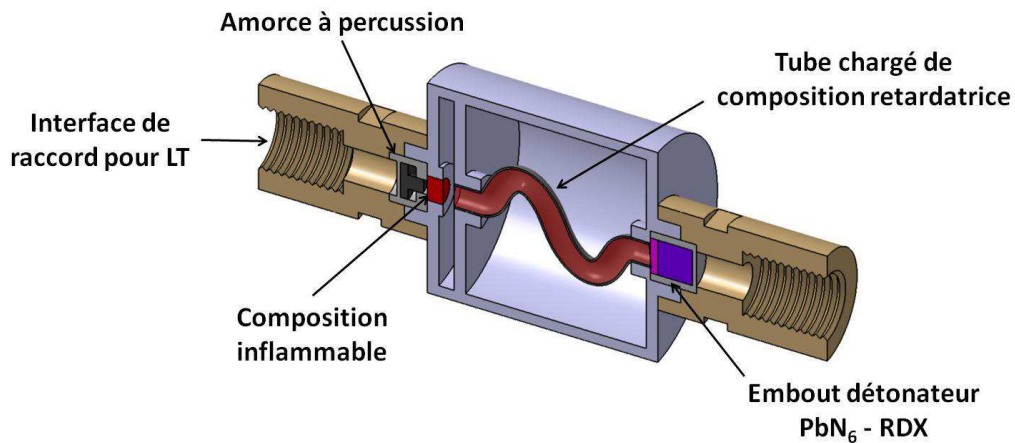


Figure 7. Schéma de principe d'un relais retard

Les durées des retards possibles et les masses de relais correspondants sont données dans le tableau suivant :

Durée du retard	Masse du Relais Retard
3 à 4 secondes	223 +/- 5 g
5 à 6 secondes	236 +/- 5 g
10 à 11 secondes	238 +/- 5 g
20 à 22 secondes	263 +/- 5 g

Tableau 1 : Durées et masses des retards pyrotechniques

f. Les fonctions terminales (FT)

Les fonctions terminales sont les derniers éléments d'une chaîne pyrotechnique. Toutes les fonctions terminales présentent deux entrées (redondance) permettant de connecter deux lignes de transmission pyrotechnique ou bien directement un initiateur pyrotechnique.

Il existe un grand nombre de fonctions terminales différentes qui permettent selon le besoin, de convertir le signal pyrotechnique en un autre signal pyrotechnique (démarreur turbopompe Vulcain, fusée d'éloignement EAP...) ou en un signal mécanique (vérin pyrotechnique, cisailles...).

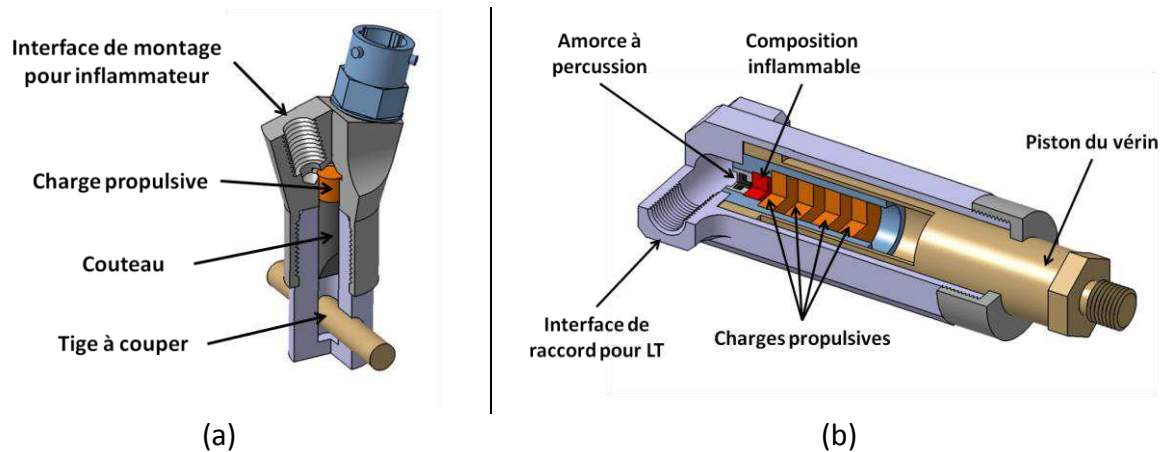


Figure 8. Exemples de différentes fonctions terminales : (a) Cisaille coupe tige (b) Vérin pyrotechnique

3.2. Les limites de ce type d'architecture

L'architecture Ariane 5 repose donc sur une transmission d'ordre par onde de choc détonique. Elle fait donc appel à de nombreux équipements pyrotechniques **volumineux et massifs**. Ils présentent un certain nombre de **contraintes de fabrication, de précautions de stockage et de transport, difficultés d'installation et de mise en œuvre liés à l'utilisation d'explosifs**. Ainsi, leur fabrication, le stockage et leur mise en œuvre sur lanceur nécessitent des personnels qualifiés, une surveillance particulière, ainsi qu'un nombre d'opérations simultanées restreintes visant à diminuer l'impact d'un éventuel accident. De plus, l'installation de ces équipements sur lanceur doit tenir compte des contraintes inhérentes aux équipements utilisés mais aussi aux environnements hostiles rencontrés par un lanceur (vibrations, température, rayonnements...). Par exemple, une ligne de transmission détonique ne peut excéder 15 mètres de longueur, ne peut être cintrée avec un rayon de courbure inférieure à 40mm, et doit être fixée sur le lanceur par des colliers avec une distance maximum de 250mm entre deux points de fixation (la longueur cumulée des lignes de transmission sur Ariane 5 est d'environ 530 mètres). **Ces contraintes sont à l'origine de surcoûts non négligeables qui nuisent à la compétitivité du lanceur.**

Par ailleurs, l'architecture Ariane 5 n'est pas testable puisque le seul moyen de tester un équipement consiste à le mettre à feu. **Le bon fonctionnement des systèmes pyrotechniques ne peut donc pas être testé avant lancement.** Toute la fiabilité de ces

équipements repose donc sur la qualité de la production et la bonne réception des matériels. Bien que les équipements soient redondés (voir triplés sur certaines chaînes sauvegarde), cette absence de testabilité constitue **une limitation en termes de sécurité et sûreté des systèmes.**

Enfin, **une grande partie des équipements pyrotechniques actuels ne sont pas compatibles avec la réglementation REACH.** En effet, dans le cadre de la réglementation REACH adoptée par l'union européenne en 2007, les substances chimiques les plus dangereuses doivent être bannies des produits mis sur le marché au sein de l'espace économique européen. Le remplacement pur et simple des compositions pyrotechniques impactées par REACH dans les équipements par des compositions dites « propres » est parfois possible mais ne constitue pas une solution économiquement viable dans la mesure où les produits devraient subir toutes les procédures de qualifications spatiales alors qu'ils ne répondent pas aux exigences dimensionnelles de demain. C'est donc un point de difficulté qu'il faut prendre en compte dans les développements futurs.

Une optimisation des équipements pyrotechniques (initiateurs, BSA, lignes de transmissions, relais...) ne présente qu'un gain potentiel faible en termes de masse et d'encombrement. Par contre, une modification profonde de l'architecture (mode de distribution des ordres et alimentation électrique) pourrait présenter un gain potentiel élevé. C'est pourquoi depuis quelques années, un certain nombre de réflexions se sont amorcées au CNES en lien avec ses partenaires industriels et des architectures pyrotechniques nouvelles ont été proposées, que nous allons détailler et analyser. **Le choix de l'architecture pyrotechnique globale optimale est important car il fixe ensuite le choix des technologies et des équipements électro-pyrotechniques et mécaniques qui la constituent. L'optimisation de chacun des équipements pyrotechniques ne peut être considérée que de façon compatible avec l'architecture choisie ce qui permettra un gain supplémentaire en termes de coût et fiabilité.**

4. Vers une architecture pyro-numérique

Les paragraphes suivants détaillent les différentes alternatives possibles à l'architecture détonique. Ces solutions seront alors comparées et celle répondant le mieux aux besoins de miniaturisations et de testabilité sera alors choisie.

4.1. L'architecture opto-pyrotechnique

Dans cette architecture schématisée en Figure 9, une **diode laser** réalise une conversion électro-optique. Le signal est transmis à l'aide d'une **fibre optique** jusqu'à un **initiateur opto-pyrotechnique** qui réalise une conversion opto-pyrotechnique. Le détonateur est monté sur un BSA dont la sortie est directement reliée à la fonction terminale. Une barrière optique est rajoutée sur la fibre optique reliant la diode laser à l'initiateur pour intercepter le signal en cas de besoin.

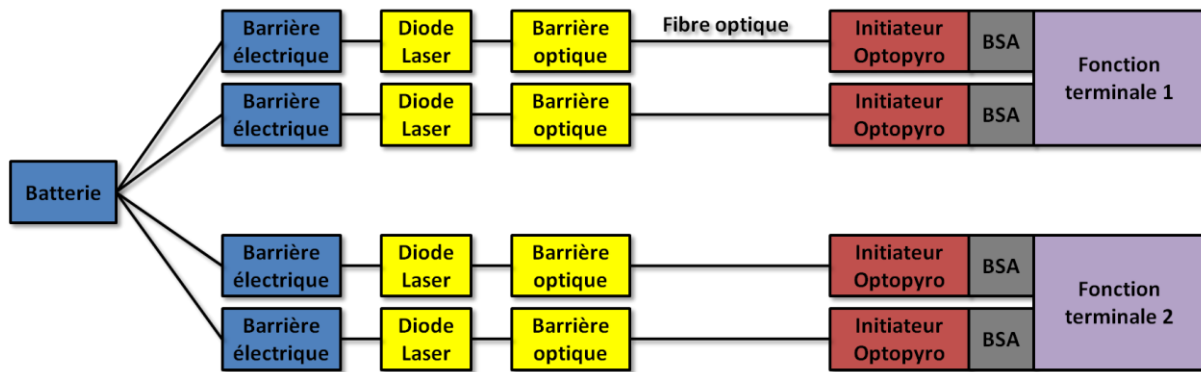


Figure 9. Architecture Opto-pyrotechnique

La mise à feu par signal optique simplifie l'architecture pyrotechnique puisqu'il n'y a plus besoin de lignes de transmission, de RMV, ni de relais retards.

Toutefois, cette architecture fait appel à des **fibres optiques coûteuses** et présentant des **contraintes d'installation** (propreté, rayon de courbure). De plus, pour réaliser une mise à feu, les diodes laser sont alimentées électriquement par une batterie. Lorsque plusieurs initiateurs, et donc plusieurs diodes doivent s'initier en même temps, **l'appel de courant sur la batterie peut se révéler important**, ce qui implique l'utilisation de **batteries de forte capacité et fort encombrement**.

4.2. L'architecture électrique

Dans cette architecture (voir Figure 10), **l'ordre est électrique**. L'ordre est transmis jusqu'à un **initiateur électro-pyrotechnique** par un simple **fil électrique**. L'initiateur est monté sur un BSA pour assurer la sécurité mécanique dont la sortie est directement reliée à la fonction terminale.

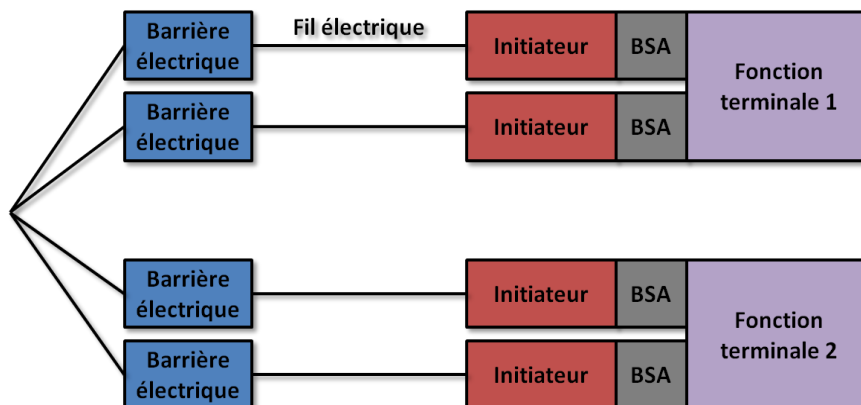


Figure 10. Architecture Electrique

Là encore, cette architecture permet un gain notable de complexité puisque les lignes de transmission, les RMV et les RR disparaissent.

De manière identique à l'architecture précédente, une mise à feu synchronisée de plusieurs initiateurs implique un **fort appel de courant**, d'où l'utilisation de **batterie forte capacité, ce qui est pénalisant en termes de gain de masse et de volume**.

4.3. L'architecture pyro-numérique

Dans cette architecture schématisée en Figure 11, proposée et brevetée par Dassault-Aviation en 2010, **plusieurs ordres électriques codés** circulent sur du **fil électrique** et peuvent être interceptés par une barrière d'interception électrique. Les ordres sont transmis jusqu'à plusieurs sous systèmes pyrotechniques appelés **Initiateurs électro-pyrotechniques à Fonctions Intégrés (IFI)** car ces derniers intégreront un initiateur électro-pyrotechnique, un BSA, un stockage local d'énergie et une électronique numérique capable de décoder le signal numérique. Tous les initiateurs disposeront alors d'une **adresse numérique** et ne traiteront que les messages qui leurs sont adressés. Chaque IFI sera directement monté sur une fonction terminale.

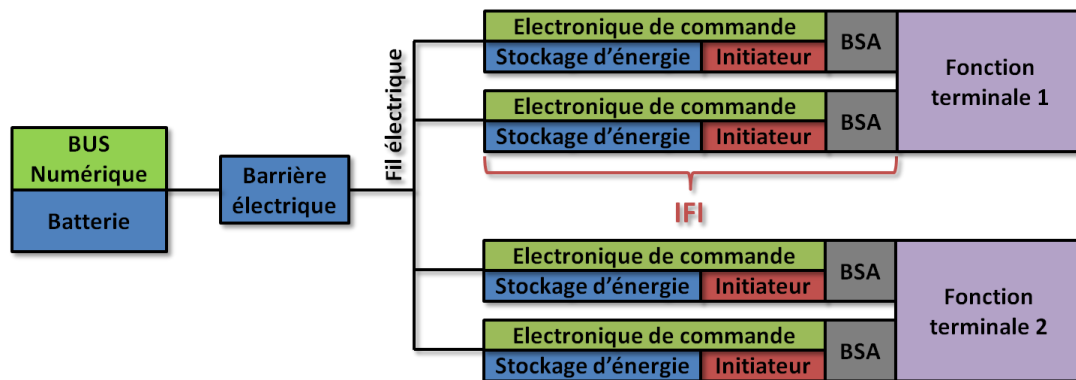


Figure 11. Architecture Numérique

Les atouts de cette architecture sont évidents. Le **stockage local d'énergie** est chargé par une batterie avant la mise à feu et sert à la mise à feu de l'IFI concerné. Ce stockage **est piloté numériquement** par l'électronique embarquée. Cette solution de stockage local permet de **réduire les appels de courant pour la mise à feu** simultanée des initiateurs et permet ainsi d'utiliser **des batteries de moins forte capacité**. En effet, le **chargement d'énergie** dans le stockage local est **étalé dans le temps** et à **faible courant**. L'utilisation d'un signal numérique permet par ailleurs une **communication à double sens** entre le gérant (par exemple le système de commande sol du lanceur) et les IFI. Les IFI peuvent ainsi réaliser des tests et transmettre des informations sur leur état au gérant. Ce dernier point constitue une **amélioration importante en termes de fiabilité, testabilité et sécurité des systèmes**.

4.4. Résumé et analyse des différentes architectures

Une comparaison des bilans de masses et de volumes des trois architectures par rapport à l'architecture classique d'Ariane 5 a été établie et est résumée dans les Tableau 2, Tableau 3 et Figure 12, Figure 13. Ces bilans ont été établis dans le cas d'un lanceur de type MLA.

▪ **Bilan massique :**

	Pyromécanisme kg	Distribution kg	Alimentation kg	Total kg	Réduction %
Ariane 5	15,2	40,3	82,2	138	-
Optopyro	15,2	51,7	26,5	93	32
Electrique	15,2	7,9	42,6	66	52
Numérique	15,2	8,1	9,7	33	76

Tableau 2. Comparaison des masses pour les différentes architectures

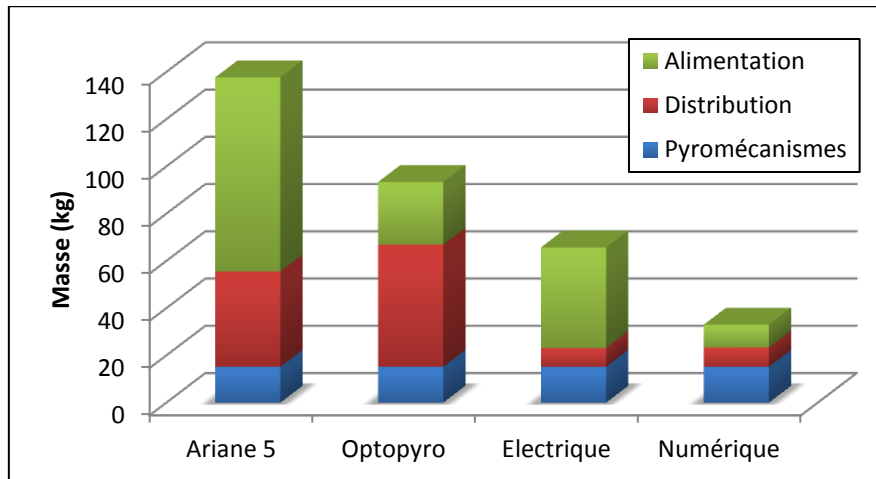


Figure 12. Comparaison graphique des masses pour les différentes architectures

▪ **Bilan volumique :**

	Pyromécanisme cm ³	Distribution cm ³	Alimentation cm ³	Total cm ³	Réduction %
Ariane 5	20175	24704	91403	136284	-
Optopyro	16156	7500	32160	55816	59
Electrique	20175	4579	35935	60691	55
Numérique	20175	4590	9296	34063	75

Tableau 3. Comparaison des volumes pour les différentes architectures

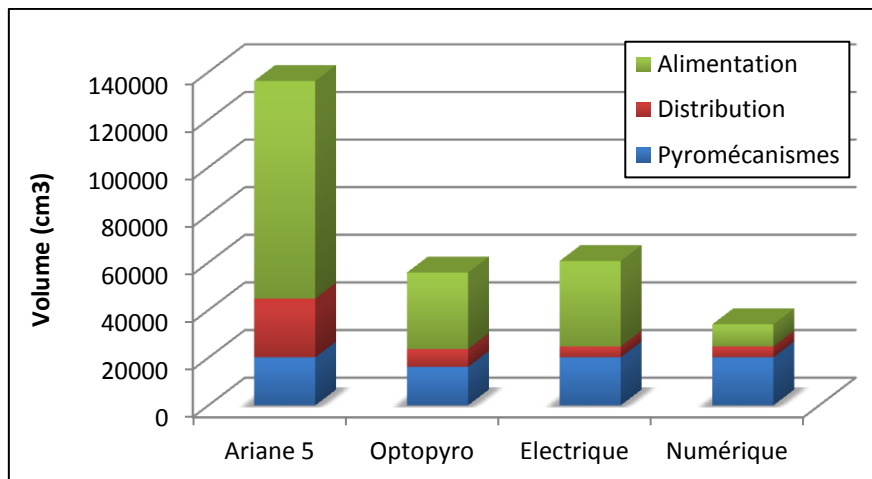


Figure 13. Comparaison graphique des volumes pour les différentes architectures

Les bilans de masse et encombrement établissent clairement la supériorité de l'architecture numérique, qu'il s'agisse de gain de **masse (76%)** ou de **volume (75%)**. L'utilisation de l'architecture numérique nécessite néanmoins un initiateur pyrotechnique à fonctions intégrées, sécurisé, miniature, autonome (énergétiquement et en décision) et intelligent, c'est à dire doté de :

- Source d'énergie embarquée permettant la mise à feu de façon autonome,
- Electronique numérique/analogique pour assurer l' « intelligence » du système (codage/décodage de la communication, autotest, ...)
- Modules mécanique et électrique assurant les exigences de sécurité pyrotechnique en cas de déclenchement intempestif sous l'effet de perturbations extérieures qu'elles soient électriques, magnétiques, issues de chocs ou d'élévation en température.

Ce type d'initiateur n'existe pas sur étagère, même si des développements de systèmes de mise à feu miniatures sécurisés et intelligents pour des applications à la défense et aussi civiles sont recensés dans la littérature (cf. Etat de l'art § 5). Comme indiqué précédemment, outre l'intelligence et l'aspect sécurité pyrotechnique, le critère taille/masse est un point important car **la miniaturisation des équipements pyrotechniques utilisés permettra un gain de masse supplémentaire**, d'autant plus flagrant que les équipements pyrotechniques dans un lanceur sont redondés, voire triplés sur certaines chaînes sauvegarde. D'autre part, cet initiateur à fonctions intégrées est inséré dans une chaîne pyrotechnique globale et doit donc répondre à des critères de compatibilité mécanique et de connectique.

L'évolution d'une architecture tout pyrotechnique basée sur des ordres détoniques telle qu'elle est aujourd'hui effective sur le lanceur Ariane 5 vers une architecture pyro-numérique apporterait un progrès technologique et fonctionnel important pour l'industrie spatiale mais elle est conditionnée par l'intégration (conception, fabrication et assemblage) d'un Initiateur à Fonctions Intégrées miniature (μ IFI) qui constitue le cœur de ce travail de thèse. Avant d'exposer en détail la problématique de la thèse, nous proposons ici donc de faire un état de l'art des Dispositifs Sécurisés de Mise à Feu miniaturisés appelés classiquement μ DSMF reportés dans la littérature et qui nous guideront dans nos choix de conception pour le μ IFI.

5. Etat de l'art des initiateurs pyrotechniques sécurisés intelligents miniatures

Les initiateurs pyrotechniques sécurisés intelligents miniatures sont développés depuis plusieurs dizaines d'années, en particulier dans le secteur militaire. Ces dispositifs **transmettent un signal d'entrée mécanique ou électrique** vers un matériau énergétique pour initier sa réaction. **Le signal de sortie est un signal pyrotechnique** (chaleur, pression, onde de choc). Par souci d'intégration et pour donner plus de souplesse à la commande, les systèmes les plus récents sont pour la plupart à **commande électrique**.

En plus de la fonction de conversion électro-pyrotechnique, ces dispositifs sont constitués de modules permettant par exemple d'assurer le **traitement de la commande**, la **sécurité électrique**, **l'autonomie énergétique**, la **sécurisation mécanique**, etc. La Figure 14 représente le synoptique d'un tel dispositif.

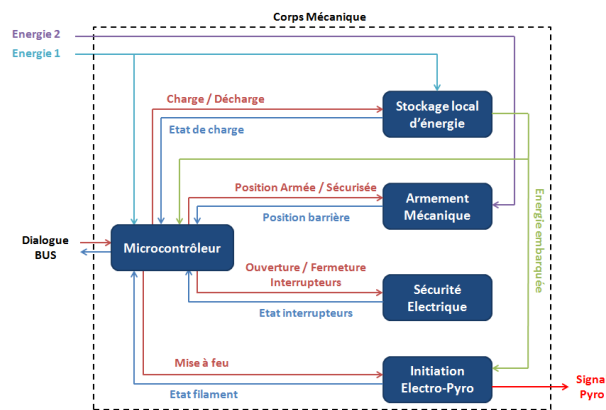


Figure 14. Synoptique d'un Initiateur à Fonctions Intégrées

5.1. Les différentes technologies d'initiateurs électro-pyrotechniques

L'initiateur électro-pyrotechnique assure la fonction principale car il permet de traduire un ordre électrique en signal thermique ou mécanique pour initier la réaction du matériau énergétique. Nous proposons de faire une revue des différentes solutions technologiques développées pour allumer une composition pyrotechnique et nous nous limiterons aux initiateurs à commande électrique. Nous avons choisi de classer les différentes technologies d'initiateurs par ordre croissant de puissance électrique nécessaire à leur fonctionnement. C'est en effet un critère qui nous semble de plus en plus important car il impacte directement la miniaturisation des systèmes électriques (gestion, sécurité et stockage). De plus nous mentionnerons lors de cet état de l'art, le critère « miniaturisation » ou « compatibilité avec les technologies MEMS » car notre ambition de thèse est de tirer profit des technologies de micro fabrication, savoir-faire du LAAS, pour réduire les masses, coûts et encombrement. Enfin, nous ne parlerons pas des compositions pyrotechniques d'allumage dans ce paragraphe et nous dédions une section à ce sujet en §5.2.

a. Les initiateurs à fil chaud ou Hot Bridge Wire (HBW) :

La solution d'initiation la plus simple à mettre en œuvre et la plus répandue consiste à placer une composition pyrotechnique au contact d'un fil chauffant. Il s'agit des initiateurs à fil chaud.

Dans cette technologie, **un filament métallique** (métal pur ou alliage) est placé sur un substrat isolant et la composition pyrotechnique à initier est placée au contact du filament.

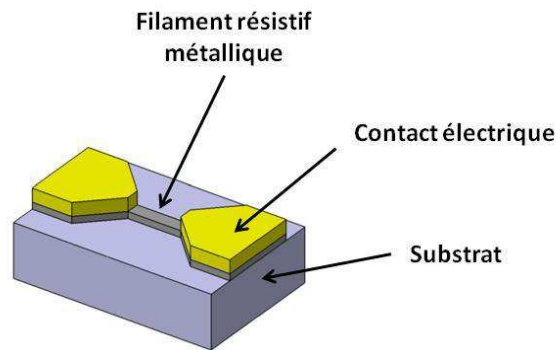


Figure 15. Initiateur à fil chaud (matériau énergétique non représenté)

Le **passage d'un courant**, typiquement de l'ordre de 5A sous 5V dans un **filament entraîne par effet Joule un échauffement** de celui-ci, conduisant à **l'initiation de la composition pyrotechnique**. Une fois la composition allumée, le filament fond et le dispositif se retrouve en circuit ouvert (cela peut être utilisé comme test de fonctionnement).

Cette solution a été utilisée pour la première fois en 1822 et perdure encore de nos jours. Elle est aujourd'hui mature et de conception très simple [28]. Les **puissances électriques** nécessaires pour réaliser une mise à feu sont **faibles, de l'ordre de la dizaine de Watt** et les **temps d'initiation sont de l'ordre de quelques millisecondes**. Ce type de technologie se prête facilement à la miniaturisation et à la production en série [29].

Cependant, les faibles puissances nécessaires à l'initiation rendent la sécurisation de ces initiateurs un problème majeur. Ce type d'initiateur est **sensible aux courants induits** par les champs électromagnétiques environnants, en particulier si les câbles d'alimentation couvrent une longue distance. De plus, **pour réaliser un détonateur**, l'usage d'un **explosif primaire est nécessaire**, ce qui implique l'utilisation de barrière de sécurité mécanique pour pallier à un éventuel déclenchement intempestif. Enfin, il arrive aussi qu'un mauvais contact entre le filament et la composition pyrotechnique puisse conduire à une défaillance de l'initiateur.

b. Les initiateurs réactifs

Les initiateurs réactifs sont une évolution récente des initiateurs à fil chaud. En effet, la **composition pyrotechnique utilisée est conductrice et joue le rôle de filament**. Ainsi, l'échauffement d'un fil d'aluminium plaqué de palladium conduit à une réaction chimique (création d'un alliage) qui libère une grande quantité de chaleur. Une variante très récente consiste à utiliser une composition sous forme de multicouches alternées Aluminium-Nickel ou Bore-Titane [30] comme matériau énergétique conducteur.

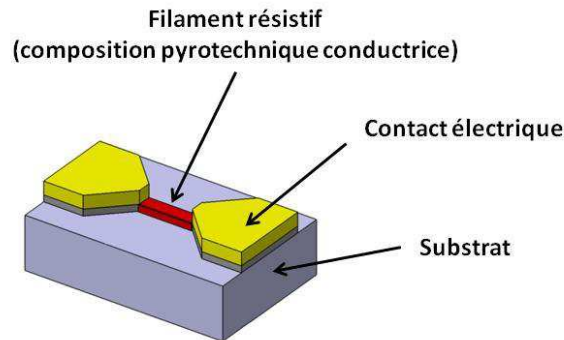


Figure 16. Initiateur réactif

Cette technologie retrouve globalement les **mêmes avantages et inconvénients que les initiateurs à fil chaud**, mis à part l'absence de problème de contact entre le filament et la composition pyrotechnique puisque réalisé par le même matériau. Le second avantage réside dans **l'intégration directe du matériau énergétique** sur le filament, évitant ainsi la manipulation de produits pyrotechniques dangereux.

c. Les initiateurs à pont semi-conducteurs ou Semi Conductor Bridge (SCB)

L'initiateur de type SCB est un concept plus récent développé dans les années 80 par le Sandia National Lab [31]. Il consiste en **un pont semi-conducteur** fortement dopé en silicium [32] ou en arséniure de gallium placé sur un substrat isolant. Une composition pyrotechnique est placée au contact du pont.

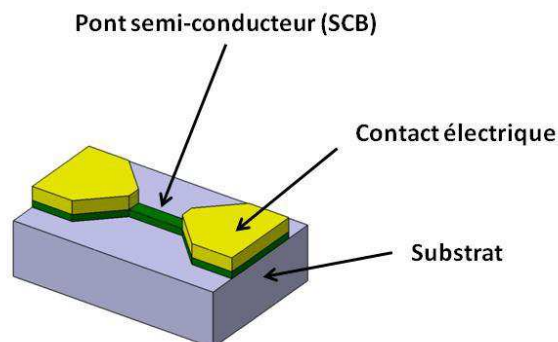


Figure 17. Initiateur à pont semi-conducteur (matériau énergétique non représenté)

Une décharge électrique dans le pont semi-conducteur générée par le passage d'un courant de **4 à 5A sous 20V vaporise le pont semi conducteur**. Le plasma ainsi généré initie la

composition pyrotechnique qui est au contact du pont [33]. Les performances de ce type de dispositif sont fortement liées à sa géométrie et aux matériaux choisis. Leurs dimensions réduites leur permettent s'échauffer rapidement et ainsi d'avoir **des temps d'initiation de quelques dizaines de micro-secondes**, ce qui leur confère des **énergies d'initiation très réduites** (de quelques mJ) bien que travaillant à moyenne puissance (de l'ordre de la centaine de Watts). De plus, le système est relativement simple de conception, totalement intégrable en technologie MEMS et les forts courants rendent ces dispositifs **moins sensibles aux perturbations extérieures que les initiateurs à fil chaud**.

Cependant, les initiateurs de type SCB souffrent des fortes tensions et forts courants nécessaires à la délivrance d'un pic d'énergie pour l'initiation, ce qui rend l'architecture du **circuit de commande complexe** et implique l'utilisation de **composants volumineux**. D'autre part, pour réaliser un **détonateur**, l'usage d'un **explosif primaire est nécessaire**, ce qui implique l'utilisation de barrière de sécurité mécanique et un mauvais contact entre le pont semi-conducteur et la composition pyrotechnique peut conduire à une défaillance de l'initiateur.

d. Les initiateurs à fil explosé (Exploding Bridge Wire – EBW)

Ces initiateurs ont été développés dans les années 1940 pour les armes nucléaires. Un initiateur à fil explosé est classiquement constitué d'un filament d'or ou de platine de très faible diamètre (38 μ m) placé sur un substrat isolant. Au contact du filament se trouve un explosif secondaire sensible aux chocs (par exemple le PETN).

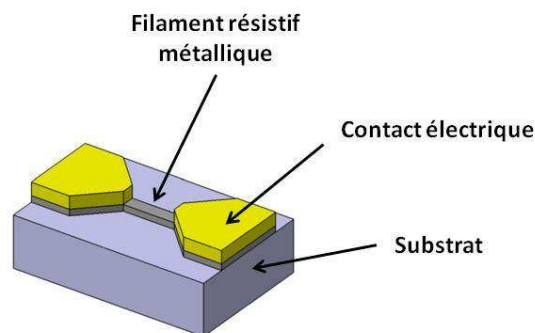


Figure 18. Initiateur à fil explosé (matériau énergétique non représenté)

A la différence d'un initiateur à fil chaud, le passage d'un **fort courant à haute tension (200A sous 5000V)** vaporise le filament car la vitesse de chauffe est telle que le métal liquide n'a pas le temps de s'écouler [34]. **La formation d'un arc électrique** dans la vapeur du métal (qui devient alors un plasma), diminue très brusquement la résistance électrique d'où l'augmentation alors très rapide du courant dans le plasma provoquant son échauffement et sa dilatation brutale. De cette manière, on génère **une onde de choc** qui initie l'explosif. Pour que ce mécanisme ait lieu, le courant dans le plasma doit augmenter avec une pente d'au moins 100A par microseconde [35]. **Les temps d'initiation sont de l'ordre de la microseconde** soit des énergies de plusieurs Joules. Ce type d'initiateur présente un double avantage. Il peut **initier directement un explosif secondaire** en détonation ce qui évite

l'utilisation de primaire. Il n'a donc pas besoin de barrière de sécurité pour être intégré sur lanceur. De plus les forts courants et les tensions très élevées requis pour initier le rendent **quasi insensibles aux perturbations extérieures**.

Cependant, ces systèmes présentent aussi des inconvénients. Le passage d'un faible courant peut provoquer la combustion ou déflagration du PETN et rendre le détonateur non fonctionnel. Un mauvais confinement de l'explosif secondaire peut conduire à une sensibilité à l'impact moins importante, et donc a des difficultés de mise à feu. Enfin, **les fortes puissances électriques requises ne sont pas compatibles avec la miniaturisation et l'intégration dans les micro-systèmes**.

e. Les initiateurs par impact ou Exploding Foil Initiator (EFI) autrement appelés « Slapper »

L'EFI ou slapper est une variante du fil explosé. Il est le résultat de recherches initiées en 1976 au Lawrence Livermore Lab et tend à s'imposer aujourd'hui dans les équipements militaires [36]. L'onde de choc créée par le fil explosé n'est plus utilisée pour initier directement l'explosif secondaire mais pour **projeter un disque paillet** (polymère [37] ou céramique [38]) appelé « slapper » placé au contact du fil métallique. Ce paillet est coiffé d'un canon qui joue le rôle d'emporte pièce au bout duquel se situe un explosif secondaire sensible à l'impact.

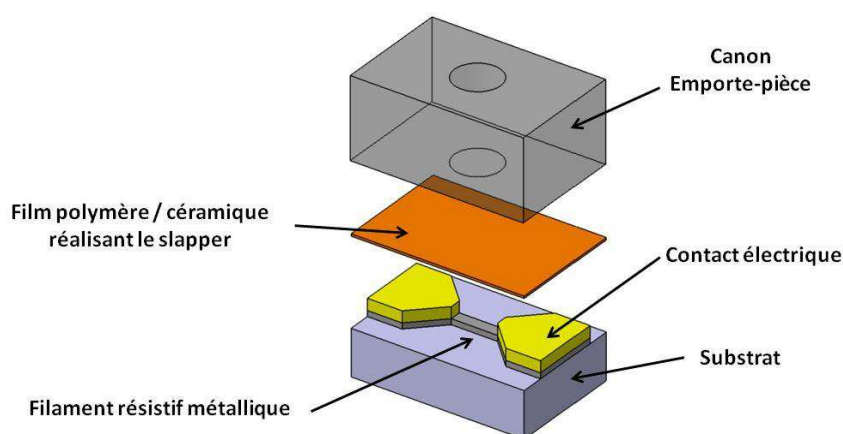


Figure 19. Initiateur par impact (matériau énergétique non représenté)

La **vitesse d'éjection** est de **plusieurs kilomètres par seconde**. Lors de son impact sur l'explosif secondaire, on réalise alors directement la transition choc-détonation ce qui conduit à l'initiation [39]. On retrouve globalement dans ces systèmes les **mêmes avantages que pour les EBW**. De plus, ce choix d'initiation par impact permet d'initier des charges secondaires encore moins sensibles que celles utilisées dans les EBW. Notons qu'il n'y a **aucun contact physique entre le filament métallique et la charge secondaire à allumer** ce qui renforce la sécurité et la fiabilité du dispositif (absence d'éventuelle dégradation de l'explosif secondaire par chauffage du filament). Toutefois, comme les EBW, **les forts courants et les hautes tensions** requises pour l'initiation sont un **frein à la miniaturisation**. La structure de ces dispositifs est plus **complexe** à intégrer en technologie MEMS.

f. Les autres types d'initiateurs

D'autres technologies d'initiation existent mais sont plus marginales ou encore en développement. Par exemple, la technologie opto-pyrotechnique fait l'objet de développement, fortement appuyé par le CNES. Dans cette technologie, un faisceau laser est guidé par une fibre optique jusqu'à la composition pyrotechnique pour provoquer son échauffement et son initiation. Les principaux avantages d'une initiation optique est la faible sensibilité aux phénomènes d'induction électromagnétiques et aux ESD. Toutefois, leur complexité (fibre optique, dopage optique d'explosif...), leur miniaturisation et leur coût élevé restent un frein à leur développement.

Il existe aussi une autre technologie de slapper développée par Dassault-Aviation et brevetée en 2007 [40] dans laquelle le décrochement et la mise en vitesse du paillet est réalisée grâce à un générateur de gaz pyrotechnique. Cette technologie permet d'utiliser un initiateur à fil chaud pour générer le gaz, évitant ainsi les forts courants et hautes tensions des technologies à bases de fil explosé. Toutefois, ce système n'est pas encore mature et demeure assez complexe dans sa mise en œuvre.

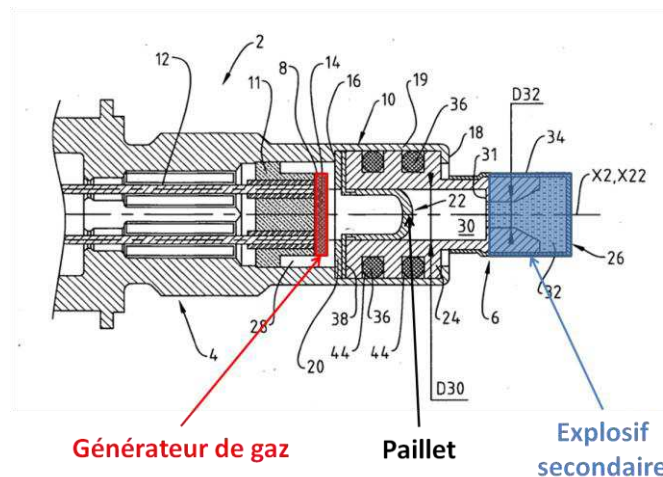


Figure 20. Slapper Dassault-Aviation utilisant un générateur de gaz

g. Résumé des solutions d'initiation

Nous avons présenté les principales solutions d'initiation classées par puissance d'énergie croissante. Nous avons vu que les initiateurs à fil chaud et les initiateurs réactifs sont les plus simples à mettre en œuvre avec des puissances réduites. Toutefois ces systèmes nécessitent un effort de sécurisation électrique et mécanique, en particulier pour éviter les mises à feu intempestives par courants induits ou ESD. Les initiateurs SCB fonctionnent à moyenne puissance et nécessitent donc des architectures d'alimentation contraignantes liées aux courants et tensions de fonctionnement. Le Tableau 4 résume les avantages et inconvénients des initiateurs présentés dans ce paragraphe.

Type d'initiateur	Avantages	Inconvénients
Fil Chaud et Réactifs	<ul style="list-style-type: none"> - Simplicité - Robustesse - Production collective - Faible puissance et énergie nécessaires 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensibilité EM et ESD - Utilisation de primaire pour détonique
Pont semi-conducteur	<ul style="list-style-type: none"> - Simplicité - Robustesse - Miniaturisation - Production collective - Sensibilité réduite aux EM et ESD 	<ul style="list-style-type: none"> - Moyenne puissance difficile à intégrer et à miniaturiser - Utilisation de primaire pour détonique
Fil explosé	<ul style="list-style-type: none"> - Insensibilité EM et ESD - Détonation sans primaire 	<ul style="list-style-type: none"> - Hautes puissances incompatibles avec la miniaturisation - Possible défaillance en cas de mauvaise initiation
Slapper	<ul style="list-style-type: none"> - Insensibilité EM et ESD - Détonation sans primaire - Pas de contact entre l'élément chauffant et l'explosif 	<ul style="list-style-type: none"> - Hautes puissances incompatibles avec la miniaturisation - Complexité

Tableau 4. Récapitulatif des solutions d'initiation électro-pyrotechnique

5.2. Les différents matériaux énergétiques d'initiation

Il existe une grande diversité de matériaux énergétiques permettant de réaliser une initiation électro-pyrotechnique. Selon les compositions utilisées, mais aussi selon la technique de mise en œuvre, le mode de décomposition des substances pyrotechniques peut être une combustion, une déflagration, ou une détonation. En raison du caractère stratégique (sûreté et propriété industrielle), les matériaux énergétiques utilisés classiquement sont constitués de mélanges dont les compositions sont gardées confidentielles. La bibliographie les concernant est ainsi assez pauvre mais nous avons tenté de recenser ici les matériaux les plus couramment utilisés. Outre leur sensibilité et performances, nous essayons d'extraire pour chacun d'entre eux, leur impact sur la santé et l'environnement car les réglementations REACH sont en vigueur, ainsi que leur capacité à être intégrés dans un dispositif MEMS car nous souhaitons utiliser des procédés collectifs et compatibles avec les technologies MEMS pour à terme intégrer le matériau d'initiation sur le support électrique.

a. Les explosifs primaires

Les **explosifs primaires** se présentent sous la forme de **poudre cristalline**. Quelques exemples sont donnés dans le Tableau 5. Ils sont caractérisés par leur **très grande sensibilité** à s’initier en **détonation**, leur **seul mode de décomposition possible**.

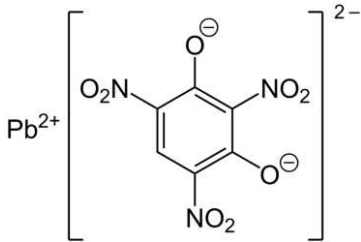
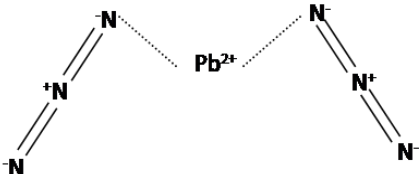
Nom de l’explosif primaire	Formule chimique
Fulminate de Mercure ou d’Argent	$^{-}O-N\equiv C^{+}-Hg-C\equiv N^{+}-O^{-}$
Styphnate de Plomb	
Azoture de Plomb, d’Argent, de Cuivre	

Tableau 5. Quelques explosifs primaires connus

Ces matériaux présentent l’avantage d’être les seuls matériaux capables de réaliser très facilement une détonation. Toutefois, ils présentent un grand nombre d’inconvénients. Par nature, ces matériaux sont extrêmement sensibles et dangereux. Il s’agit de poudres dont la forme, la granulométrie et la pureté, influencent les propriétés que sont la vitesse de réaction et la sensibilité. Ainsi, une inhomogénéité de la poudre peut donc être à l’origine de défaillances. De plus, leur mise en œuvre n’est pas adaptée aux microsystèmes. En effet, les techniques de dépôt par jet d’encre (poudre + solvant) présentent des risques de pollution de l’explosif (traces de solvant) à l’origine de flegmatisation ou de sensibilisation.

Très récemment, des travaux ont montré la capacité à synthétiser in situ de l’azoture de cuivre en technologie MEMS [41]. Dans un premier temps la croissance localisée d’une mousse de cuivre microporeux est réalisée par électrochimie. Puis, le cuivre microporeux est fonctionnalisé par un balayage d’acide hydrazoïque pour former localement in situ l’azoture de cuivre. Bien que séduisante, l’utilisation d’acide hydrazoïque représente un danger non négligeable car il s’agit d’un gaz extrêmement toxique et la solution d’acide présente elle-même un risque d’explosion.

b. Explosifs secondaires

Quelques **explosifs secondaires** sont donnés dans le Tableau 6. Ces explosifs sont **beaucoup moins sensibles** que les explosifs primaires et **ne détonent que s'ils sont attaqués par une onde de choc**. Si l'énergie est insuffisante pour réaliser leur amorçage, la réaction de ces matériaux prend la forme d'une combustion ou d'une déflagration. Leur usage dans les équipements pyrotechniques consiste à amplifier le signal d'un primaire (embout détonateur, relais chargé...), ou transmettre un signal (ligne de transmission, RMV).

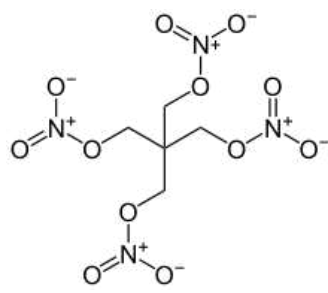
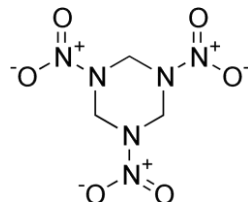
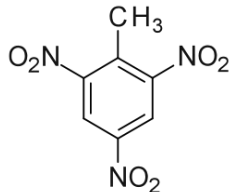
Nom de l'explosif secondaire	Formule chimique
PETN	
RDX	
TNT	

Tableau 6. Quelques explosifs secondaires connus

Contrairement aux explosifs primaires, ce sont des explosifs **bien plus stables** et donc beaucoup **moins dangereux à manipuler**. Ils ont l'avantage d'avoir des effets mécaniques puissants : une faible quantité de secondaire initiée en détonation présente un **fort pouvoir de brisance** (d'où leur rôle d'amplification du signal d'un explosif primaire). Toutefois, s'ils sont mal initiés, ils se décomposent dans un régime de déflagration ou combustion. Comme pour les primaires, ces explosifs se trouvent sous forme de poudres et donc leur **mise en œuvre dans les microsystèmes est complexe**.

c. Les poudres homogènes simple base et double bases

Les **matériaux énergétiques homogènes** sont constitués **d'une seule molécule** active contenant à la fois l'**oxydant** et le **réducteur**. La réaction est intramoléculaire. La **cinétique** de la réaction est **propre à chaque molécule**, en fonction de la proximité entre oxydant et réducteur, et aussi de la stabilité des états intermédiaires. On retrouve parmi les composés homogènes la **nitrocellulose** (Braconnot 1833), et la **nitroglycérine** (Sobrero 1847). Leurs formules chimiques sont données dans le Tableau 7.

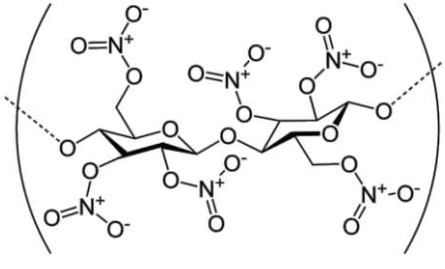
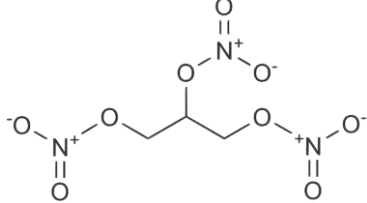
Nom de la poudre homogène	Formule chimique
Nitrocellulose	
Nitroglycérine	

Tableau 7. Formule chimique des poudres homogènes

La **gélatinisation de la nitrocellulose** permet d'obtenir la **poudre simple base** ou poudre B. en transformant de la nitrocellulose fibreuse (présentant une très grande surface spécifique) en un matériau dense et non poreux dont on peut alors maîtriser la combustion. La méthode de Paul Vieille utilise un solvant de lequel est dissoute la nitrocellulose. La **gélatinisation de la nitrocellulose** sans solvant, mais **par un plastifiant qui n'est autre que la Nitroglycérine** permet d'obtenir la **poudre double base** (poudre GB). Le plastifiant pénètre alors les fibres par un travail mécanique. La GBSe est une poudre double base.

Présents sous forme de gel, ces matériaux peuvent être mis en forme par des techniques de la micro-électronique comme la sérigraphie ou le jet d'encre. Ils sont capables de produire une grande quantité de gaz lors de leur combustion et émettent peu de fumée lors de leur réaction.

Toutefois, comme ils sont stabilisés par gélatinisation ils sont aussi plus difficiles à initier. Il faut leur appliquer une température suffisante pendant une durée longue (de l'ordre de 300°C pendant 10ms). Le bon contact entre l'élément chauffant et le matériau énergétique est impératif pour réaliser une initiation correcte. Si lors de la mise en œuvre (sérigraphie par exemple), une bulle d'air se présente entre l'élément chauffant et le matériau énergétique ou si lors du chauffage, le matériau se décolle sous l'effet des contraintes thermomécaniques, l'initiation ne peut alors avoir lieu correctement.

Le LAAS a exploré dans les années 1995 le dépôt de nitrocellulose [1][2] et double base sur des micro-initiateurs en silicium de 4 mm² pour réaliser des actionnements pneumatiques. Les résultats n'ont pas été concluants car ces matériaux homogènes ne sont pas assez réactifs à pression atmosphérique et ont des dimensions d'extinction de flamme trop élevées pour être utilisés aux basses dimensionnalités. L'option s'est alors porté sur des matériaux composites seuls ou dopés avec des poudres métalliques (Aluminium ou Zirconium) qui présentent l'avantage de pouvoir être optimisés en composition (diamètre des constituants, pourcentage des dopants) pour en augmenter leur réactivité et avoir des combustions possibles aux dimensions sous millimétriques [1][42].

d. Les matériaux énergétiques composites

Les **matériaux énergétiques composites** sont constitués **d'un mélange de plusieurs réactifs**. Il peut s'agir d'un mélange contenant un combustible réducteur et un comburant oxydant, ou bien de deux métaux formant un alliage métallique en réagissant entre eux : ces composés sont alors appelés bimétalliques. La réaction chimique se fait entre les deux espèces et la **cinétique** de la réaction est liée au **transport de matière par diffusion**, contrairement aux compositions homogènes. Leurs **propriétés sont paramétrables** en jouant sur le ratio entre les deux espèces ainsi que sur les distances de diffusion et la surface d'échange entre les réactifs. Quelques exemples de comburants et combustibles sont donnés dans le Tableau 8.

Comburants	Formule chimique
Oxyde de Fer, de Cuivre	Fe ₂ O ₃ , CuO
Hypochlorite	ClO ⁻
Perchlorate de Potassium	KClO ₄
Perchlorate d'Ammonium	NH ₄ ClO ₄
Nitrate d'Ammonium	NH ₄ NO ₃
Salpêtre (Nitrate de Potassium)	KNO ₃

Combustibles
Al
Mg

Tableau 8. Quelques comburants et combustibles classiques

Lors de leur réaction, ces matériaux délivrent **de fortes quantités de chaleur**. Dans certains cas, la température de la réaction atteint les 3000°C. Les thermites Al/Fe₂O₃ sont par exemples utilisées pour réaliser les soudures de rail de chemin de fer.

Depuis les années 2000 et l'émergence des nanotechnologies, ces matériaux peuvent être nano-structurés. La nano-structuration permet une réactivité accrue grâce à une grande surface spécifique entre les réactifs [43] et l'absence de limitation par diffusion d'espèces [44]. Leur réactivité peut ainsi être ajustée en jouant sur la nano-structuration. **Les thermites et bimétalliques** font appel à des **métaux purs** et à des **oxydes métalliques** existant à l'état naturel. Pour la plupart, ils sont **disponibles en abondance, stables et non toxiques**. Les thermites et bimétalliques peuvent, de plus, être **mis en forme** par des procédés de métallisations connus et maîtrisés en **micro-électronique** classique.

e. Résumé des matériaux énergétiques d'initiation

Nous avons présenté les matériaux pyrotechniques principaux permettant une initiation électro-pyrotechnique. Nous retenons que les explosifs primaires sont les seuls à produire facilement une détonation mais que les risques associés à leur manipulation sont rédhibitoires. Les explosifs secondaires sont plus stables mais doivent être initiés par une onde de choc pour fonctionner, ce qui implique l'utilisation d'un primaire ou d'une technologie d'initiation de type fil explosé ou slapper. Les compositions homogènes ont la capacité de produire de grandes quantités de gaz. Ces matériaux sont de bons candidats car ils sont intégrables en technologie MEMS, toutefois leurs temps de fonctionnement plutôt longs sont un frein à leur intégration car les énergies électriques nécessaires à leur initiation sont alors très importantes. Leurs propriétés sont de plus difficilement paramétrables puisqu'elles sont le résultat de leur structure chimique intrinsèque. Enfin, les compositions hétérogènes permettent de produire de grandes quantités de chaleur. Leurs propriétés sont par ailleurs paramétrables, ce qui est un plus pour l'utilisation dans les microsystèmes. Parmi les composés hétérogènes, les thermites et les bimétalliques présentent de nombreux avantages comme la nano-structuration à l'origine d'une grande réactivité, les procédés de mise en œuvre compatible MEMS et l'innocuité chimique, paramètre de plus en plus important compte tenu de l'évolution des réglementations impactant les produits chimiques.

5.3. Les systèmes de sécurisation mécanique

La sécurisation mécanique d'un équipement pyrotechnique consiste à réaliser un désalignement d'un des éléments de la chaîne pyrotechnique pour en bloquer la propagation. Le plus souvent, il s'agit d'interposer une barrière mécanique entre deux éléments de la chaîne (voir Figure 21). Il existe plusieurs solutions technologiques pour réaliser ce type de sécurisation. Dans les paragraphes suivants, nous présenterons les principales technologies selon les modes d'actionnement de la barrière en les analysant comme précédemment par rapport à leur capacité à être miniaturisés ou intégrables en technologie MEMS.

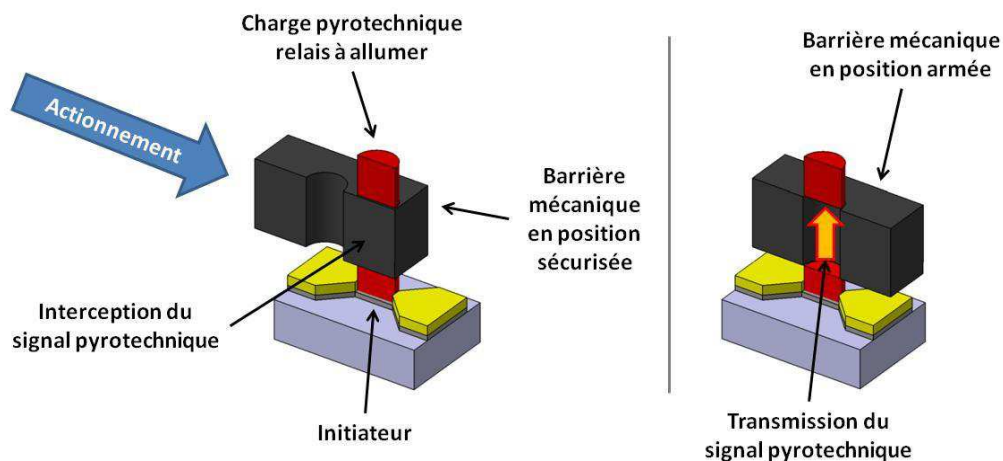


Figure 21. Principe de la sécurisation mécanique par rupture de chaîne pyrotechnique

a. Par actionnement électromagnétique

L'actionnement électromagnétique consiste à déplacer un écran mécanique magnétique à l'aide d'un solénoïde. Développée dès 1920, c'est l'une des plus anciennes technologies d'armement [45][46]. Ce type d'actionnement présente de nombreux atouts dont une des plus fortes puissances d'actionnement et la réversibilité : la barrière peut être déplacée de la position sécurisée à la position armée et inversement autant de fois que nécessaire. Toutefois, l'actionnement par électroaimants est difficilement miniaturisable et difficilement intégrable en technologie MEMS et peu compatible avec les environnements hostiles, en particulier du point de vue électromagnétique.

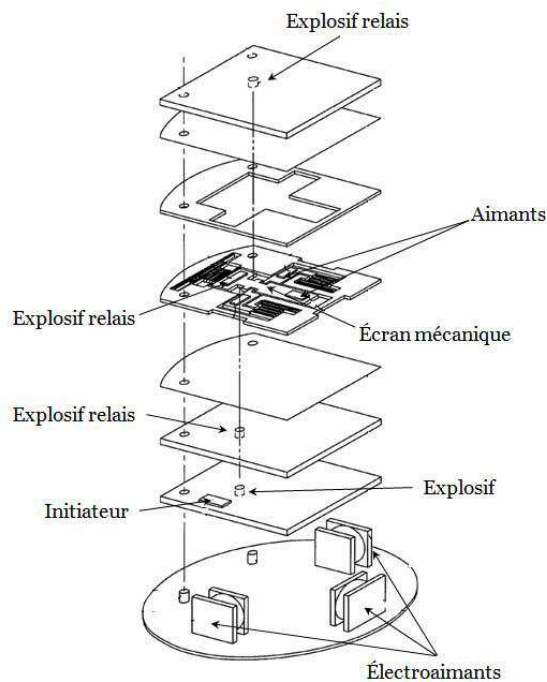


Figure 22. Dispositif d'armement mécanique utilisant un actionnement électromagnétique (brevet US 7,040,234)

b. Par moteur électrique

Un écran mécanique réalisé en technologie MEMS peut être commandé par un micro moteur électrique pour réaliser l'armement [47]. L'ajout d'un réducteur permet d'obtenir le couple suffisant à l'actionnement. La friction dans le motoréducteur peut permettre à elle seule de maintenir la barrière en position armée ou sécurisée. Ces systèmes d'actionnement sont réversibles un nombre illimité de fois. Les puissances électriques nécessaires pour le fonctionnement du moteur dépendent majoritairement des technologies retenues, de la distance parcourue par l'écran ainsi que des forces nécessaires pour le déplacer. Il s'agit de la technologie utilisée actuellement pour la sécurisation des chaînes pyrotechniques sur lanceur.

c. Par actionnement pyrotechnique

Quelques dispositifs ont été conçus et développés utilisant des barrières de sécurisation mécanique à actionnement pyrotechnique. Il peut s'agir d'un générateur de gaz pyrotechnique qui actionne un piston déplaçant une barrière [48] [49]. Le LAAS a proposé dans le cadre d'une étude avec la DGA et Nexter-Munition [50] l'actionnement pyrotechnique qui présente l'avantage d'avoir des pressions d'actionnement parmi les plus intéressantes ($P_a = 63 \text{ Bar}$ pour $0,078 \text{ mm}^3$ de bimétallique) [48]. Dans ce cas de figure, l'armement est mono-coup, non réversible. L'avantage de ce système réside dans le très faible encombrement de celui-ci. Toutefois, pour être opérationnel, il faut garantir l'étanchéité du dispositif ce qui est à l'origine de difficulté d'intégration et problème de fiabilité.

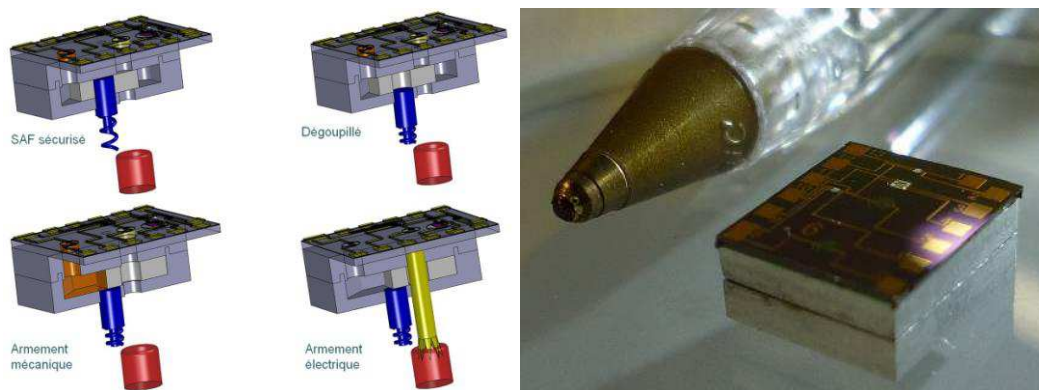


Figure 23 : Vues en coupe d'une micro amorce sécurisée comprenant une barrière mécanique actionnée par actionnement pyrotechnique proposé et développé par le LAAS.

Un autre type d'actionnement pyrotechnique consiste à utiliser l'effet brisant d'une composition pyrotechnique pour casser une goupille maintenant la barrière en position sécurisée [51]. Le déplacement de la barrière peut être réalisé par l'accélération du dispositif ou bien par un ressort. A nouveau, ce dispositif ne peut fonctionner qu'une fois mais son encombrement est faible puisque l'énergie embarquée se trouve dans le matériau pyrotechnique. Toutefois, ces dispositifs doivent être sécurisés puisqu'ils intègrent des matériaux dangereux.

d. Les autres types d'actionnement

L'actionnement inertiel utilise les accélérations axiales et angulaires pour déplacer un écran initialement maintenu en position sécurisée par des ressorts [52] [53]. Ce type de système d'armement n'est pas actionnable directement, le contrôle de l'état d'armement n'est donc pas possible. Par ailleurs, ils sont sensibles aux défaillances et délicats à mettre en œuvre.

Un autre type d'actionnement utilise les vibrations de l'air lors du vol d'un missile pour actionner un jeu d'engrenages permettant d'aligner les initiateurs pyrotechniques avec la charge à allumer [54]. Ces systèmes font appels à une mécanique complexe mettant en jeu un grand nombre de pièces. Ils sont difficilement miniaturisables et complexe à mettre en œuvre.

Qu'il s'agisse d'un actionnement inertiel ou par vibration, l'énergie utilisée pour réaliser l'armement provient de l'environnement ce qui implique des temps d'actionnement variable, en fonction de l'accélération ou de la puissance du flux d'air entrant. Dans le cas des lanceurs spatiaux, ce type d'actionnement ne peut être retenu au vu des environnements de vol.

e. Résumé des solutions de sécurisation mécanique

Toutes les solutions de sécurisation mécanique répertoriées précédemment ont été développées pour répondre à un cahier des charges donné : encombrement, environnement, type de signal à intercepter. Une grande partie de ces solutions n'est pas compatible à notre application, soit par leur non réversibilité, soit parce qu'ils utilisent une énergie environnementale non disponible sur lanceur. Pour des questions d'encombrement, l'actionnement par micromoteur électrique couplé à un réducteur semble être la solution technologie la plus pertinente pour notre application.

6. Notre problématique

De cet état de l'art on perçoit aisément la difficulté qui se pose au concepteur des systèmes pyrotechniques dans les lanceurs : d'un côté, **la tendance à la miniaturisation croissante, le besoin de réduire les coûts et le choix de solutions génériques pour simplifier les mises en œuvre** fixent alors des objectifs d'intégration de plus en plus poussés avec des puissances et énergies électriques nécessaires les plus faibles possible. D'un autre côté, **les exigences de sécurité et de fiabilité des systèmes pyrotechniques restent très élevées** et sont complexes à mettre en œuvre avec des systèmes miniatures fonctionnant sur des technologies à faible puissance. Enfin, se rajoutent des exigences **d'innocuité chimique sur les personnes et l'environnement avec la mise en place de la réglementation REACH** qui impactent déjà une grande partie des matériaux pyrotechniques classiquement utilisés.

L'état de l'art montre aussi que la sécurisation et la miniaturisation de système d'initiation est une problématique importante partagé par nombreux acteurs autres que spatial, dont le LAAS : depuis une dizaine d'années, des travaux internationaux sont conduits en explorant différentes voies même si il n'existe pas d'architecture générique pouvant répondre à toutes les applications. Aujourd'hui, des briques technologiques MEMS existent et un certain nombre de composants et dispositifs miniatures (actionneurs, capteurs, sources d'énergies...) sont commercialement disponibles ou en développement expérimentaux avancés. Par exemple, il est depuis peu possible d'approvisionner des actionneurs et moteurs électriques de taille millimétriques ce qui n'était pas le cas il y a 5 ans. Par ailleurs, les dispositifs de stockage de l'énergie ont fait les progrès que l'on connaît : il est possible de stocker $62 \mu\text{J}/\text{mm}^3$. Des micro-capteurs physiques (température, pression, accélération) sont disponibles, fiables et intégrables de façon fiable. Les difficultés nouvelles qui se posent au concepteur d'initiateurs pyrotechniques sécurisés miniatures pour aboutir à un produit fiable et répondant aux exigences précédemment citées se situent maintenant à deux niveaux :

- 1. La conception et l'intégration d'un micro-système complexe** dans lesquels interagissent des fonctions, des composants et des technologies très diverses, dans des volumes de plus en plus réduits et ce avec une précision, sécurité et fiabilité requises extrêmes. *Des difficultés techniques persistent dans les connexions et l'interfaçage des fonctionnalités et dans la gestion des petites dimensionnalités. L'expérience que le LAAS a acquise au cours des 8 dernières années, qui nous guidera dans le cadre de cette thèse est de privilégier aux basses fonctionnalités les systèmes simples afin d'en assurer une fiabilité et une industrialisation plus rapide.*
- 2. L'impact des nouvelles réglementations sur la toxicité et la sécurité des matières dangereuses et des systèmes les intégrant.** Certaines études, menées aux USA et en Europe au LAAS ont montré que les avancées technologiques ouvrent la voie à la synthèse de nouvelles compositions de matériaux nano-structurés aux performances maîtrisées et prédictives, modifiables à façon suivant l'application visée (inflammateur, étoupille, détonateur), plus sûrs, non toxiques, non polluantes et pour celles du LAAS, capables d'être intégrés de façon sécurisée dans des dispositifs d'amorçage miniatures et complexes. **Le LAAS a eu cette analyse dès 2005 et a privilégié l'intégration *in situ* de nanothermites Al/CuO non toxiques directement sur puce d'amorçage que nous mettrons en œuvre dans le cadre de cette thèse.**

7. Objectifs et innovations de la thèse

L'objectif de la thèse se concentre sur **la conception et la réalisation d'un démonstrateur d'Initiateur à Fonctions Intégrées intégrant dans moins de 4 cm³ les fonctions suivantes :**

- **Initiation électro-pyrotechnique**
- **Armement mécanique**
- **Sécurité électrique**
- **Stockage local énergie**
- **Intelligence et autotests**

Les verrous technologiques à lever sont ceux cités précédemment, à savoir la gestion de la complexité aux faibles dimensionnalités ainsi que l'intégration d'un nouveau matériau d'initiation non impacté par les réglementations en vigueur. Les innovations attendues sont à plusieurs niveaux:

- **La conception d'une nouvelle architecture multifonctionnelle compacte :**
Le système doit intégrer dans un très faible volume un grand nombre de fonctions de natures différentes qu'elles soient physique, thermique, électrique, pyrotechnique, mécanique, électronique, chimique.
- **La mise en réseau des initiateurs pyrotechniques et l'« intelligence » du système :**
Pour la première fois, les initiateurs seront interconnectés en réseau communiquant par bus numérique leur conférant ainsi une testabilité, reconfigurabilité intéressante pour augmenter la fiabilité de la chaîne pyrotechnique.
- **L'intégration d'un nouveau matériau énergétique composite nano-structuré en technologie micro électronique :**
Pour assurer la conversion électro-pyrotechnique initiale.

8. Conclusions

Après avoir présenté l'historique de l'accès à l'espace ainsi que les nouveaux enjeux, en particuliers concernant les vols commerciaux, nous avons mis en évidence les limitations des systèmes pyrotechniques basés sur une architecture détonique de distribution des ordres.

Notre réflexion s'est alors orientée sur les différentes alternatives concernant l'architecture pyrotechnique et la solution pyro-numérique a été retenue. L'utilisation de cette architecture implique un certain nombre de développements, en particulier celui d'initiateurs pyrotechniques miniatures sécurisés et intelligents, capables à la fois de s'intégrer dans une architecture pyro-numérique, tout en garantissant des niveaux de sûreté et de fiabilité au moins aussi élevés que les équipements actuels.

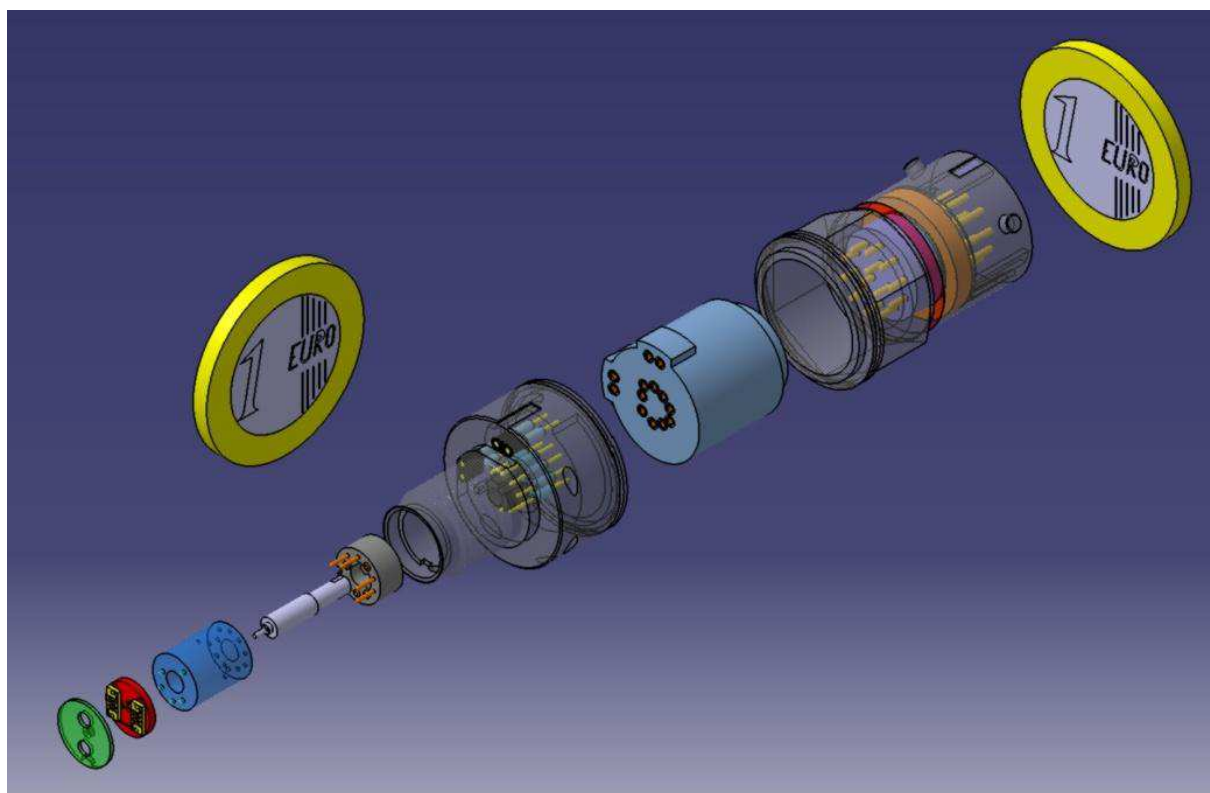
L'état de l'art des technologies d'initiation électro-pyrotechnique montre que les technologies à fil chaud sont les plus simples et sont celles qui requièrent le moins de puissance électrique pour réaliser une mise à feu. Cette technologie est compatible avec les technologies MEMS et correspond bien à notre besoin de miniaturisation, y compris en ce qui concerne les systèmes d'alimentation électrique. Toutefois, les faibles énergies mises en jeu pour réaliser l'initiation impliquent une sécurisation accrue de ces systèmes pour les protéger d'une éventuelle mise à feu accidentelle.

Parmi les différents matériaux énergétiques possibles pour réaliser l'initiation, les compositions de type thermites ou bimétalliques répondent à notre besoin d'innocuité chimique ainsi que d'intégration dans des systèmes miniatures. Ces compositions sont capables de générer une grande quantité de chaleur. Utilisés comme premier élément d'une chaîne pyrotechnique, les thermites ou les bimétalliques pourraient allumer des charges relais de compositions homogènes pour la génération de gaz, ou des explosifs pour la génération d'onde de choc. C'est une innovation majeure car aucun système industriel ne les intègre actuellement.

Enfin, la sécurisation mécanique du système doit permettre de répondre aux exigences de la réglementation sauvegarde, c'est pourquoi notre choix d'actionnement de barrière de sécurité mécanique s'est porté sur l'utilisation d'un moteur électrique couplé à un motoréducteur. Cette technologie est aujourd'hui miniaturisée et consomme peu de puissance électrique, en accord avec notre besoin de miniaturisation.

Cet état de l'art a montré qu'aucune technologie existant aujourd'hui ne répond complètement aux besoins de notre projet, ce qui implique la recherche et le développement des technologies pour aboutir à la conception et la réalisation d'un micro-initiateur à fonctions intégrés.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons le cahier des charges auquel doit répondre notre IFI, puis nous donnerons la conception des différentes solutions pour chacune des fonctions.



Chapitre 2

Conception du système Initiateur à Fonctions Intégrées

1. Introduction

Comme nous l'avons décrit au chapitre précédent, le déploiement de l'architecture pyro-numérique s'appuie sur des initiateurs pyrotechniques intelligents intégrant des fonctions de communication, de stockage local d'énergie et de sécurisations électriques et mécaniques, appelés Initiateurs à Fonctions Intégrées (IFI). Les différentes fonctions intégrées au sein de ces initiateurs ont fait l'objet de recherches technologiques mais aucune solution aujourd'hui existante ne permet d'intégrer toutes ces fonctions au sein du même équipement, tout en répondant à notre besoin de miniaturisation. Notre ambition consiste donc à concevoir une nouvelle génération d'initiateurs, intégrant ces différentes fonctions dans un volume restreint.

Nous commencerons ce second chapitre par la présentation du cahier des charges puis nous présenterons l'architecture générale et fonctionnelle de l'IFI. Nous préciserons ensuite les choix technologiques puis la conception détaillée de chacune des fonctions : l'interface mécanique et électrique, l'intelligence du système, le stockage local d'énergie, la sécurisation électrique et l'armement mécanique. La fonction de conversion électro-pyrotechnique fera l'objet d'un paragraphe spécifique puisque cette partie représente le plus gros du travail de conception réalisé au cours de la thèse, avec la réalisation de simulations par éléments finis du comportement thermique de l'allumeur. Nous terminerons ce second chapitre par un résumé de nos choix technologiques en y pointant les innovations apportées par rapport aux solutions existantes.

2. Cahier des charges

Préalablement à la conception de l'IFI, il est important de préciser un certain nombre d'exigences, qui sont à l'origine des choix technologiques que nous avons opérés. Nous pouvons décliner le cahier des charges suivant cinq catégories d'exigences ci-dessous détaillés :

2.1. Exigences dimensionnelles

Comme précisé au chapitre 1, les IFI sont montés sur les fonctions terminales des lanceurs (cisailles, vérins, allumeurs...). Pour ne pas redévelopper toutes les fonctions terminales utilisées actuellement, nous avons fait le choix d'utiliser la même interface mécanique que les actuels initiateurs européens (ESI), ce qui implique la présence d'un pas de vis de type M10 sur le corps. Ainsi, les dispositifs réalisant la conversion électro-pyrotechnique et l'armement mécanique doivent s'intégrer dans un volume d'environ $0,5 \text{ mm}^3$ ($\varnothing 6,5 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$), correspondant au volume maximal disponible à l'intérieur du filetage tout en garantissant la tenue mécanique de la pièce. Les autres fonctions de l'IFI devront s'intégrer dans un volume inférieur à 2 cm^3 .

Les initiateurs doivent permettre de réaliser aussi bien des inflammateurs, que des étoupilles ou des détonateurs. La géométrie des initiateurs doit alors être générique et prévoir l'interface mécanique permettant l'insertion de la charge relais inflammable, propulsive ou détonante selon le type d'initiateur désiré.

2.2. Connectique

L'IFI doit intégrer la connectique pour réaliser les différentes alimentations électriques ainsi que la communication avec les bus numériques (pour des raisons de sécurité et de fiabilité, le bus numérique est redondé et les deux bus sont géographiquement indépendants). Une prise standardisée répondant à la norme MIL-DTL-26482S2 intégrant 13 broches gauge 22 agencées selon la norme MIL-STD-1560 Clocking N a été retenue pour réaliser la connexion du μ FI.

2.3. Autonomie énergétique et décisionnelle

La gestion des retards dans les opérations de séquençement se fait à l'aide d'une horloge numérique intégrée dans l'IFI. Il faut alors que l'initiateur embarque de l'énergie pour fonctionner, même s'il est coupé de l'alimentation générale pendant au moins 30 secondes. Dans la mesure où l'armement mécanique est réalisé au sol avant lancement, cette énergie ne doit permettre que le fonctionnement de l'électronique (décompte du retard et déclenchement de la mise à feu) et la conversion électro-pyrotechnique.

Par ailleurs, l'utilisation d'un bus numérique permet de visualiser en continu l'état du système (par exemple l'état d'armement mécanique de tous les IFI). Chaque IFI doit alors être capable de rendre compte de son état par des opérations d'autotests et de communication.

2.4. Sécurité, sûreté et fiabilité

Les exigences de sécurité, sûreté et fiabilité de fonctionnement sur lanceur sont très nombreuses et strictes. La liste complète de ces exigences est disponible en annexe 2, nous retiendrons en particulier les points suivants :

- En position sécurisée, quelque soit l'environnement, l'initiateur, même s'il s'initie, ne doit pas provoquer l'inflammation/détonation en aval.
- En position armée, sous ordre électrique, l'initiateur doit provoquer l'inflammation/détonation en aval avec une fiabilité d'au moins 99,998% et ce, avec un différentiel de temps entre la mise à feu électrique et la mise à feu effective de la fonction terminale inférieur à 4 ms.
- Une absence d'énergie dans les circuits du système d'interception ne doit pas faire changer l'état du système.
- Les initiateurs doivent être étanches lors de leur fonctionnement au cours d'une détonation ou d'une montée en pression dans une étoupille (6000 bars).

2.5. Tenue aux environnements

De manière analogue aux exigences de sûreté, les exigences de tenue aux environnements lanceurs sont nombreuses et sont disponibles en annexe 3. Il faut noter que l'initiateur doit garder ses propriétés fonctionnelles et sa fiabilité de fonctionnement après tout type d'agression.

Les points les plus importants que nous retiendrons sont les suivants :

- **Température :**
 - Inflammateurs : -160°C/+150°C (domaine satellite)
-100°C/+100°C (domaine Lanceur)
 - Détonateurs et étoupilles : -100°C/+100°C
- **Humidité :** 240h à 70°C et 95% d'humidité relative
- **Vide thermique :** 10⁻⁶ Torr
 - 48h à -160°C (-70°C pour les détonateurs)
 - 48h à +150°C (+100°C pour les étoupilles)
- **Sensibilité aux charges électrostatiques :** 500pF/25000V
- **Sensibilité aux rayonnements électromagnétiques :**
 - 2W/m² de 50 KHz à 50 MHz
 - 100W/m² à plus de 50MHz

3. Architecture du système IFI

Nous avons vu dans le chapitre 1 que l'IFI doit être **autonome énergétiquement** pour sa mise à feu, **intelligent, sécurisé, fiable** et **miniature**.

3.1. Inventaire des blocs fonctionnels du système

L'architecture de l'IFI doit donc comprendre les blocs fonctionnels suivants :

- Une électronique qui assurera **l'intelligence du système** et qui sera en communication avec le bus pour assurer la synchronisation.
- Un système de **stockage local d'énergie** permettant à l'IFI d'embarquer suffisamment d'énergie pour fonctionner jusqu'à 30 secondes après déconnexion de la source électrique principale.
- Une fonction **sécurité électrique**, c'est à dire un système permettant de bloquer, court-circuiter ou laisser passer l'alimentation électrique jusqu'à l'initiateur électro-pyrotechnique.
- Une fonction **armement mécanique**, c'est-à-dire une barrière mécanique amovible capable d'intercepter le signal pyrotechnique entre l'initiateur et la charge pyrotechnique à initier.
- Une fonction **conversion électro-pyrotechnique**.
- Un boîtier réalisant **l'interface mécanique et électrique** du système intégrant les fonctions précédemment décrites.

Chacune de ces fonctions fera l'objet de choix technologiques ainsi que d'une conception détaillée présentés dans les paragraphes 4 et 5.

3.2. Architecture fonctionnelle

Les interactions entre les différents blocs décrits au paragraphe précédent sont représentées dans la figure suivante :

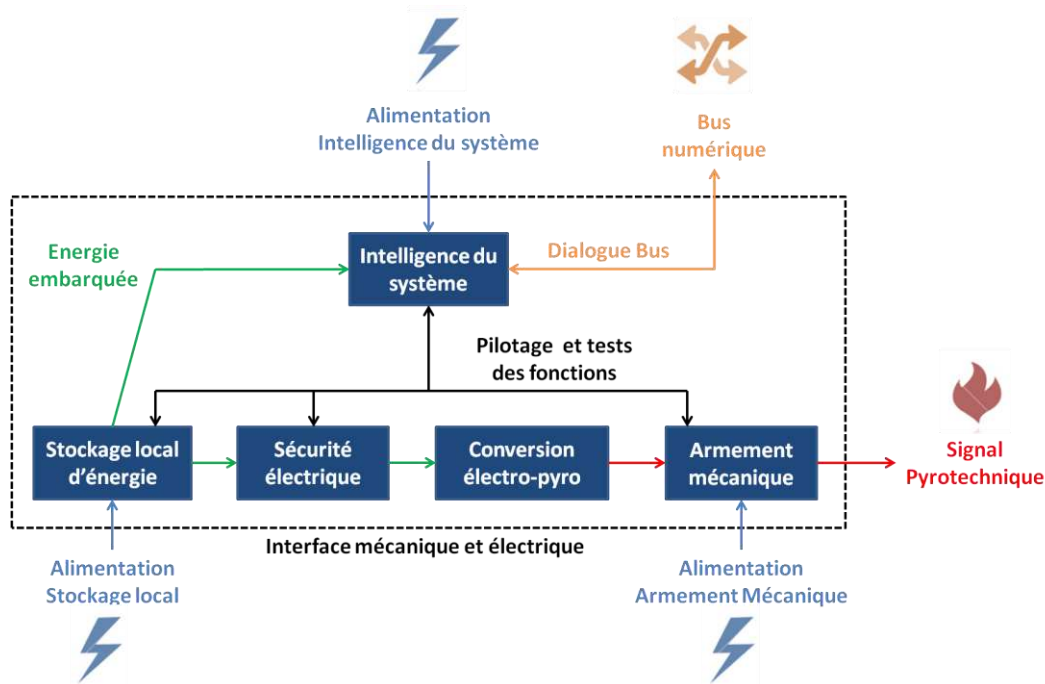


Figure 24. Architecture fonctionnelle de l'IFI

On trouve dans cette architecture trois alimentations distinctes pour l'intelligence du système, pour le stockage local d'énergie et pour l'armement mécanique. Ce choix s'explique par les exigences de sécurité, de sûreté et de fiabilité. L'énergie embarquée dans le système est utilisée par l'intelligence du système pour le décompte du retard et par la conversion électro-pyrotechnique pour réaliser la mise à feu. La sécurité électrique s'interpose entre le stockage local d'énergie et la conversion électro-pyrotechnique pour éviter au système de se mettre à feu de manière accidentelle. L'armement mécanique s'interpose entre la conversion électro-pyrotechnique et la sortie du signal pyrotechnique pour le bloquer en position sécurisée. Enfin, l'intelligence du système pilote l'ensemble des différentes fonctions, réalise des opérations d'autotest sur ces mêmes fonctions et assure la communication avec le bus numérique (réception des ordres et renvoi des résultats de tests). Cette architecture permet au système d'être hautement sécurisé puisqu'il intègre plusieurs sécurités indépendantes et de différentes natures (logicielle pour le bus numérique, électriques et mécanique).

Dans le cas idéal, la procédure de fonctionnement pour une mise à feu avec retard et une mise à feu avortée sont données dans la Figure 25 :

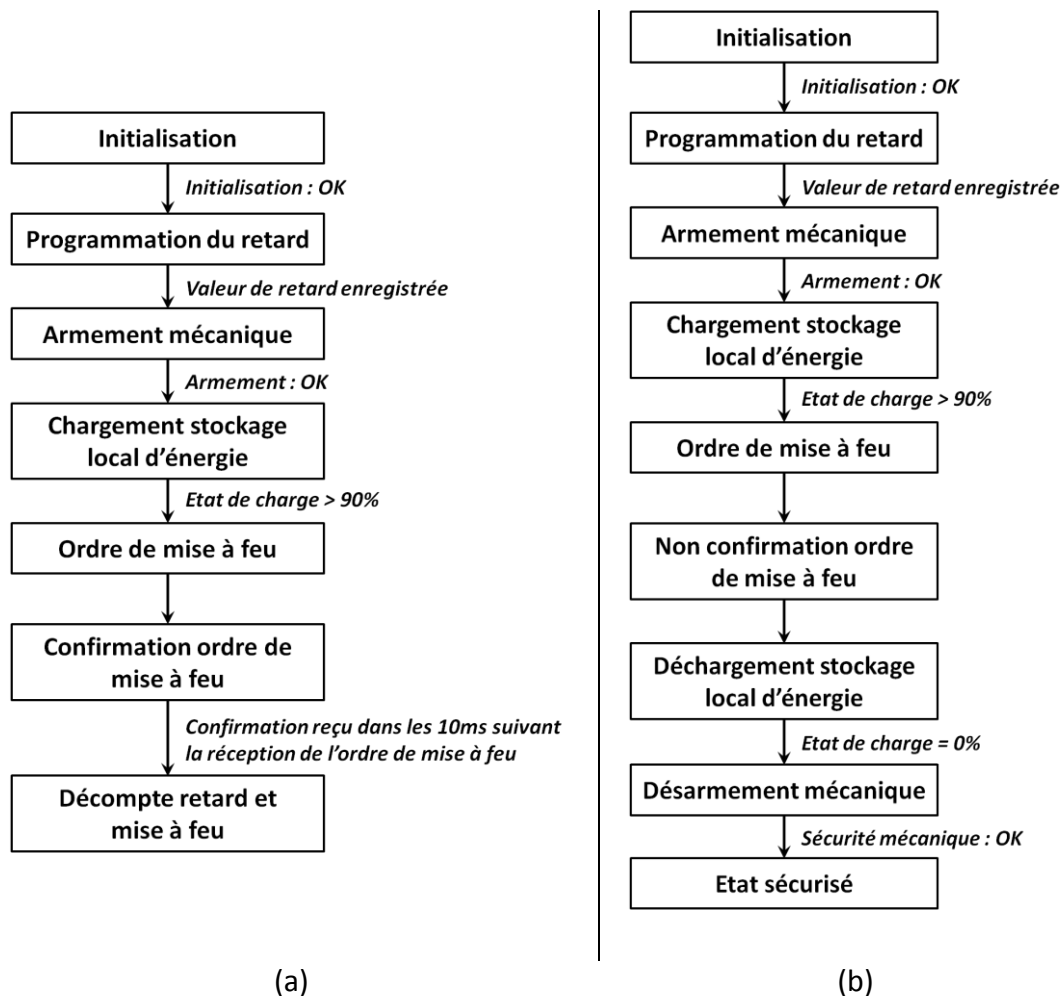


Figure 25. Procédure de fonctionnement (a) Mise à feu avec retard (b) Mise à feu avortée

3.3. Choix préliminaire des technologies

De part la complexité du système qui doit intégrer dans un volume très restreint différentes fonctionnalités et composants, et compte tenu du fait que la finalité de notre travail est de dégager des solutions industrialisables, notre stratégie est :

- Utiliser les technologies existantes quand il existe des solutions et composants répondant aux besoins et aux contraintes d'encombrement.
- Développer en technologie MEMS les fonctions nouvelles et critiques.
- Concevoir et réaliser en technologie classique les interfaces mécaniques et électriques.

Pour chacune des fonctions inventoriées au point précédent (voir §3.1), nous proposons de fixer les choix préliminaires de technologies. Ces choix seront détaillés dans les paragraphes qui suivent.

Nous veillerons lors de ces choix à prendre en compte et anticiper les difficultés techniques non négligeables d'interfaçage et d'interconnexion dans les assemblages aux faibles dimensionnalités. Nous privilégierons les connexions simples afin d'en assurer la fiabilité et une industrialisation plus rapide.

4. Conception des fonctions constitutives de l'IFI

4.1. Interface mécanique et interconnexions électriques

Un corps mécanique intégrera l'ensemble des fonctions constitutives dans un même boîtier et :

- Réalisera l'interface avec les fonctions terminales utilisant l'ESI (filetage M10).
- Assurera l'interface mécanique pour être monté sur les fonctions terminales par vissage.
- Assurera aussi l'interface mécanique générique permettant le sertissage de relais chargés inflammable, propulsif ou explosif selon le type d'initiateur désiré.
- Réalisera les connexions électriques avec les sources d'énergie et le bus numérique.

De plus, nous veillerons à ce que les matériaux constitutifs permettent de respecter les exigences de tenue mécanique et d'étanchéité décrite au §2 et soient compatibles avec la réglementation REACH.

Nous nous appuyerons sur la technologie déjà éprouvée sur les corps d'ESI, à savoir une pièce métallique intégrant une connectique dans un scellement de verre assurant l'isolation électrique et l'étanchéité (voir Figure 26).

Pour tenir les environnements lanceurs, les seuls métaux utilisables sont l'acier inoxydable et le titane car ils présentent des valeurs de résistance mécanique élevée, y compris à haute et basse température, ainsi qu'une bonne tenue à la corrosion. Le titane semble plus intéressant que l'acier en raison de sa faible masse volumique mais la technologie permettant le scellement des contacts électriques dans une perle de verre rencontre des difficultés, en particulier concernant la soudure verre-titane. Nous sélectionnerons alors l'acier inoxydable.

Seules les techniques d'usinage classiques peuvent être utilisées en raison de la technologie utilisée pour réaliser le scellement des contacts dans une perle de verre. En particulier, l'électroérosion ne peut pas être utilisée car cette technique modifie localement la composition de l'alliage métallique, réduisant ainsi localement la résistance mécanique de la pièce et pouvant engendrer des problèmes de fiabilité, notamment en termes d'étanchéité.

Enfin, lors de la conception du corps de l'IFI, une attention particulière doit être portée à l'écartement entre les contacts électriques. Il existe un diamètre critique autour des contacts (de l'ordre de 130% du diamètre du trou de perçage) en dessous duquel la tenue mécanique du scellement ne peut être correctement assurée, conduisant aussi à des problèmes d'étanchéité.

Compte tenu de ces différentes considérations, la géométrie du corps de l'IFI a été définie comme schématisé dans la Figure 26 : le corps comprendra deux parties assemblées in fine par soudure laser. La première partie du corps assure l'interface mécanique avec les

fonctions terminales. Pour des raisons de compatibilité, cette interface est exactement celle des initiateurs actuels. La seconde partie du corps intègre la prise électrique du système et présente un six pans permettant le serrage de l'initiateur sur la fonction terminale via une clé dynamométrique 15 sur plat.

L'intérieur du filetage M10 sera dédié aux fonctions « initiation électro-pyrotechnique » et « armement mécanique ». Les fonctions « intelligence du système », « sécurité électrique » et « stockage local d'énergie » s'intégreront dans un bloc appelé électronique de commande, encastré entre les deux parties précédemment décrites car c'est le seul emplacement capable d'accueillir le volume requis pour l'électronique de commande. Il permet de plus de protéger cette électronique d'éventuelles agressions puisqu'il est isolé de l'extérieur par deux scellements de verre et le corps en acier.

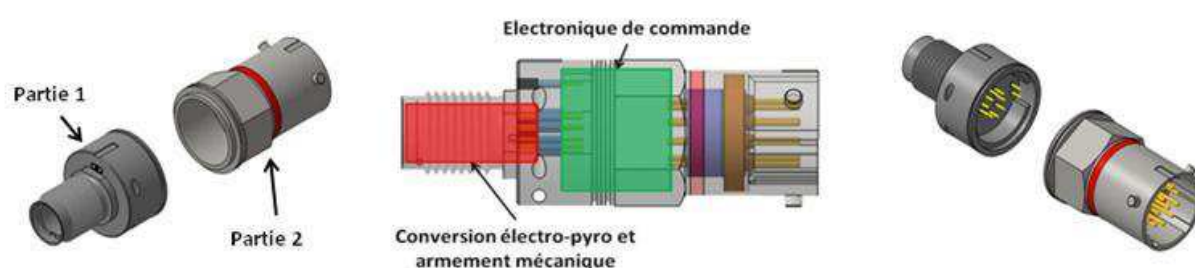


Figure 26. Corps mécanique de l'IFI

Une lèvre est prévue sur les deux parties pour réaliser la soudure laser. Pour réaliser l'alignement correct de la partie prise sur la partie fileté, un marquage sera inscrit sur les deux parties. Par ailleurs, une gorge est prévue sur le corps permettant le marquage de couleur d'identification du type d'initiateur (inflammateur et étoupille : marron, détonateur : jaune et inerte : orange). Enfin, pour éviter que les initiateurs ne se dévissent, deux passages pour fil frein ont été prévus sur le corps (voir Figure 27).

Comme les IFI sont interconnectés à un BUS numérique, la reconnaissance des différents IFI par le BUS sera réalisée par lecture d'une adresse numérique. Nous avons choisi d'intégrer cette adresse dans une bague interposée entre l'IFI et la fonction terminale (les différentes solutions d'adressage d'initiateur sont décrites dans l'annexe 4). En effet cette solution permet de banaliser les initiateurs puisque l'affectation de l'adresse se fait par le montage de l'IFI sur la fonction terminale. Ainsi, un changement d'initiateur n'impose pas une opération de reprogrammation puisque l'adresse est inchangée. Pour la lecture de l'adresse, des contacts électriques présents sur la bague devront être en appui sur des contacts électriques présents sur le corps de l'IFI. L'alignement de ces contacts sera assuré par une indexation mécanique (deux méplats présents sur le corps de l'IFI) et le contact électrique sera assuré par serrage de la vis M10.

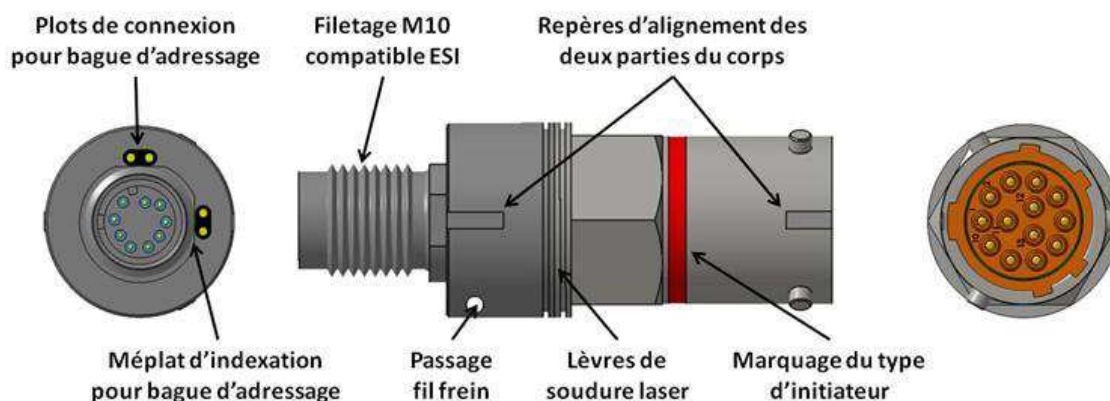


Figure 27. Détails corps mécanique de l'IFI

4.2. Intelligence du système

L'intelligence du système doit permettre à l'IFI de décoder les ordres du bus numérique et les interpréter, lire l'adresse numérique contenue dans la bague d'adressage, commander via des portes entrées/sortie les différentes fonctions du système (par exemple le pilotage de l'armement mécanique), effectuer des mesures (par exemple l'état de charge du stockage local d'énergie), etc... Pour réaliser ces différentes actions, il faut alors un processeur, une horloge, de la mémoire, des interfaces vers les périphériques. Traditionnellement, ces composants sont intégrés dans des circuits distincts, ce qui implique une grande complexité d'interconnexion, un volume important, une importante consommation énergétique (due aux pertes en ligne), et un coût élevé en raison des différentes étapes de fabrication. La technologie la plus adaptée à notre besoin est celle des microcontrôleurs puisqu'ils intègrent ces différents éléments dans la même puce (on parle alors de system on chip), présentant alors de très hauts niveaux d'intégration, une consommation électrique plus faible et un coût récurrent réduit.

Le choix de la technologie de ce microcontrôleur revêt une importance particulière. En effet on recherche un microcontrôleur qui de par son utilisation doit posséder à la fois :

- Concernant les aspects techniques :
 - Une résistance intrinsèque aux ambiances lanceur (thermique, flux de particules, ions lourds, rayons gamma)
 - Une consommation électrique faible pour assurer l'autonomie énergétique du système
 - Une liaison de type CAN intégrée pour le dialogue
 - Un convertisseur Analogique/Numérique intégré (ADC) pour la réalisation de mesures
 - Une liaison série complémentaire pour la lecture de l'adresse
 - En contrepartie les tâches simples à exécuter n'imposent pas une puissance de calcul démesurée
- Une fabrication Européenne et pérenne (ITAR free) imposée pour les applications lanceur

- Une bibliothèque de conception disponible et éprouvée, permettant de pousser l'intégration d'un maximum de fonctions sur le même composant et ainsi réduire la taille du composant

Selon ces critères, le microcontrôleur sélectionné est basé sur un cœur 68HC908, dont certains composants d'entrée/sortie sont remplacés par les fonctions :

- Générateur de courant constant
- Pompe de charge (voir §4.3)
- Sécurité électrique (voir §4.4)
- Pilotage du moteur du BSA (voir §4.6)
- Interface de lignes du (des) Bus numériques

4.3. Stockage local d'énergie

Le bloc électronique de commande intégrera, en plus du microcontrôleur, un dispositif de stockage d'énergie permettant à l'IFI de fonctionner jusqu'à 30 secondes après déconnexion de sa source de courant. Compte tenu des contraintes thermiques lanceurs et de l'encombrement, les dispositifs de stockage électro-chimique n'ont pas été retenus. Nous utiliserons un stockage de type capacitif.

Pour des raisons d'encombrement et de tenue aux environnements lanceur (en particulier les contraintes thermiques) nous avons choisi une technologie de condensateur 3D silicium (voir Figure 28) de la marque IPDiA. Cette technologie présente en effet une valeur de capacité stable avec une précision de +/- 1% sur une plage de température de -55°C à +200°C¹, une faible résistance série, ainsi qu'une capacité volumique très importante de l'ordre de 2μF/mm³, en accord avec notre besoin de miniaturisation. Ces capacités sont de plus compatibles avec les directives REACH et RoHS.

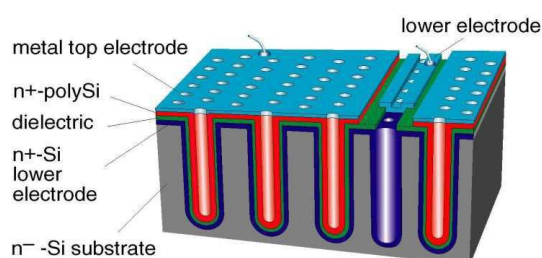


Figure 28. Description de la structure d'une capacité 3D silicium

Il est important de charger ce condensateur constituant le stockage local avec un courant constant. Ceci permet en effet d'optimiser la taille de ce condensateur puisqu'un rendement de charge supérieur à 95% est facilement atteignable, alors qu'une charge à tension constante ne dépassera pas 50% (voir Annexe 5). De plus, la charge à courant constant permet d'éviter les appels de courant très importants au niveau des sources d'énergie

¹ En cours de qualification pour des températures inférieures à -55°C

(notamment en début de charge) et donc influence le dimensionnement de ces dernières en limitant fortement les pics de courant ainsi que les pertes par effet Joule dans les câblages.

Pour effectuer cette charge à courant constant, nous avons choisi d'utiliser un circuit appelé « pompe de charge » qui permet de contrôler le courant injecté dans une capacité. L'activation de la pompe charge est effectuée par le microcontrôleur via la commande Arrêt/Marche. L'alimentation d'entrée de cette pompe de charge est dissociée des alimentations de la logique et de l'alimentation de puissance du moteur de la barrière de sécurité mécanique pour des raisons de niveau électrique et de sécurité. Le schéma fonctionnel de ce circuit est le suivant (Figure 29) :

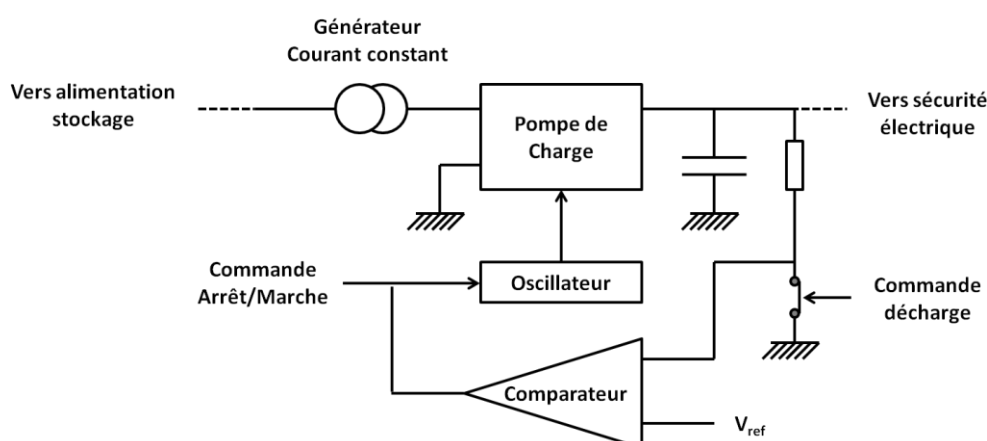


Figure 29. Schéma du circuit de pompe de charge pour le stockage local d'énergie

Dans ce cas, la tension aux bornes de la capacité est directement proportionnelle à son état de charge $V = Q/C$ ou Q est la charge en Coulomb et C la capacité en Farad. Ainsi, l'état de charge du condensateur peut être mesuré par le convertisseur Analogique/Numérique du microcontrôleur. Ce circuit de pompe de charge pourra être à terme intégré dans la puce contenant le microcontrôleur.

4.4. Sécurité électrique

La fonction sécurité électrique permet de bloquer, court-circuiter ou laisser passer le signal électrique jusqu'à l'initiateur électro-pyrotechnique. Elle est classiquement constituée d'un ensemble d'interrupteurs pilotables électriquement par le microcontrôleur, agencés selon un circuit de commutations spécifique de manière à pouvoir être testé sans autoriser la mise à feu ; une seule combinaison permettant de réaliser la mise à feu.

Différentes solutions technologiques s'offrent à nous pour réaliser les interrupteurs réalisant la sécurité électrique de l'IFI :

- **Les relais électromécaniques :**

La commutation est assurée par la mise sous tension d'un électro-aimant qui transmet une force aux contacts électriques. Cette solution a l'avantage d'être réversible (coupure d'alimentation dans un relais monostable ou envoi d'une commande dans un relais bistable). Toutefois, l'encombrement de ces relais en fait la principale limitation.

▪ **Les interrupteurs électro-pyrotechniques :**

Le LAAS a développé une technologie d'interrupteurs électro-pyrotechniques dans le cadre de la thèse de Pierre Pennarum [5]. L'ouverture ou la fermeture de l'interrupteur est réalisée par la fusion d'un pont fusible ou à l'inverse, à la réalisation in-situ d'une micro brasure. L'inconvénient majeur de cette technologie réside dans son aspect mono-coup, ce qui la rend inutilisable pour notre application.

▪ **Les transistors de commutations :**

Lorsqu'un transistor est utilisé en commutation, son comportement s'apparente à celui d'un interrupteur. Sa polarisation ne lui permet que deux modes de fonctionnement : passant ou bloqué. L'avantage des transistors MOS est qu'ils sont réversibles et intégrables dans un très faible volume, soit en technologie CMS, soit directement en technologie silicium dans le cas d'un ASIC. Ils sont pilotables électriquement par le microcontrôleur réalisant l'intelligence du système.

Nous ferons donc le choix d'interrupteurs de types transistors de commutation en technologie MOSFET, directement intégrés sur la puce du microcontrôleur.

4.4.1. Circuit de commutations

Le schéma global du circuit de commutations que nous avons conçu est donné sur la Figure 30. Cinq interrupteurs permettent de réaliser les différentes opérations de tests, de sécurité et de mise à feu (voir Tableau 9).

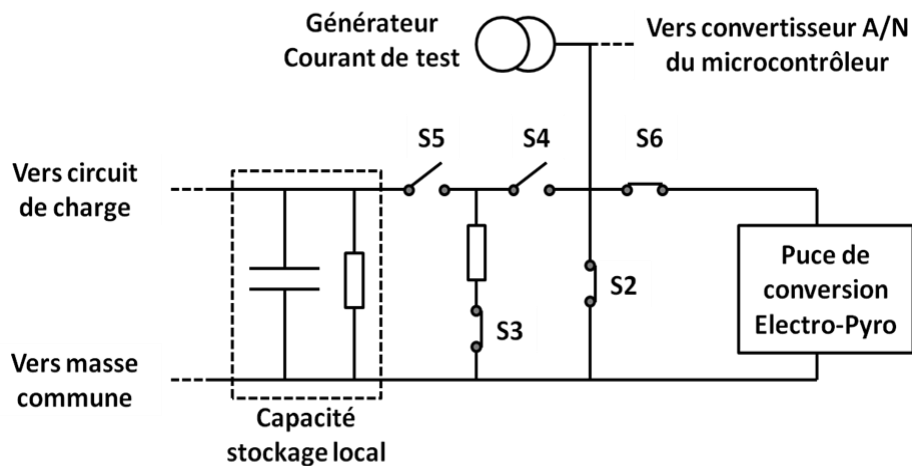


Figure 30. Circuit de commutation réalisant la sécurité électrique de l'IFI

La description des différents interrupteurs constituant le circuit de commutation est donnée dans le tableau suivant :

Interrupteur	Rôle
S1	Non représenté sur le schéma. Interrupteur mécanique piloté par la rotation du BSA (voir §4.6). Fermé uniquement en position Sécurisée ou Armée. Ouvert pendant la rotation
S2	Shunt de la puce
S3	Commande de décharge du condensateur
S4	Isolation stockage local en aval de la résistance de décharge
S5	Isolation stockage local en amont de la résistance de décharge
S6	Isolation de la puce

Tableau 9. Description des interrupteurs de la matrice de commutation

Cet agencement permet de mesurer le fonctionnement des interrupteurs, mais aussi d'autres fonctions comme la charge/décharge du stockage local d'énergie, la résistance filament des puces d'initiation électro-pyrotechnique... Ces différentes mesures sont répertoriées dans le Tableau 10.

Fonction	S1	S2	S3	S4	S5	S6	Voie de mesure
Test Filament	F	O	x	O	O	F	Mesure résistance filament
Test S2 Shunt	F	Alt	x	O	x	O	Mesure R filament mesure alternative (0..infini)
Test S3	F	O	Alt	F	O	O	Mesure R filament mesure alternative (0..Résistance de décharge)
Test S4	F	O	F	Alt	O	O	Mesure R filament mesure alternative (0..Résistance de décharge)
Test S5	F	x	F	O	F	x	Mesure charge croissante du condensateur
Test S6	F	O	x	O	x	Alt	Mesure R filament mesure alternative (0..infini)
Test état de charge	F	F	O	F	O	F	Mesure charge stable du condensateur
Mise à Feu	F	O	O	F	F	F	-

O = Ouvert ; F = Fermé ; x = indifférent ; Alt = Ouvert puis Fermé

Tableau 10. Les différents tests possibles utilisant la matrice de commutation

En dehors de l'interrupteur S1 qui est réalisé de manière mécanique (couplage sécurité électrique et BSA), les interrupteurs S2 à S6 sont réalisés à l'aide de transistors de type MOSFET, intégrés en technologie silicium dans la puce du microcontrôleur. Lorsque le système est hors tension, ou lors de son allumage, le système doit rester sécurisé.

4.4.2. Réalisation des interrupteurs de type Shunt

Les interrupteurs S2 et S3 doivent rester fermés lorsque le système n'est pas alimenté, c'est pourquoi ils sont réalisés de la façon suivante (voir Figure 31) :

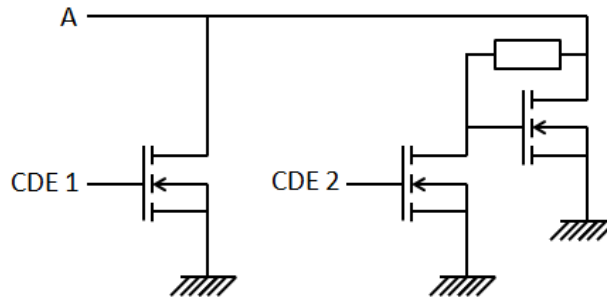


Figure 31. Réalisation d'interrupteurs de type Shunt

De cette manière, le point A est relié à la masse sauf pour le couple CDE 1=0 et CDE 2 = +V. Dans les autres cas, au moins l'un des transistors est passant. Pour que le shunt soit efficace, la résistance des transistors lorsqu'ils sont passant doit être minimale.

4.4.3. Réalisation des interrupteurs de type Sectionneurs

Les interrupteurs S4, S5 et S6, doivent être fermés uniquement sous l'action d'une commande. Nous avons choisi de réaliser les interrupteurs comme représentés dans la Figure 32 :

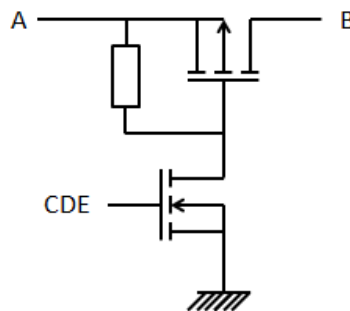


Figure 32. Réalisation d'interrupteurs de type Sectionneurs

Le courant passe alors de A à B si la commande est une tension positive par rapport à la masse. Comme dans le cas des interrupteurs de type shunt, nous cherchons une résistance électrique faible lorsque les transistors sont passants. En effet, dans le cas des interrupteurs S4 à S6, cette résistance impacte directement le dimensionnement de la capacité de stockage permettant la mise à feu, puisque ces interrupteurs sont placés en amont de la puce d'initiation électro-pyrotechnique.

4.5. Intégration mécanique de l'électronique de commande

Le microcontrôleur, le stockage local d'énergie et la sécurité électrique constituent l'électronique de commande du système (voir §4.1). Cette électronique de commande doit s'intégrer entre les deux parties constituant le corps mécanique de l'IFI, c'est-à-dire dans un volume inférieur à 2cm^3 .

Le microcontrôleur, le circuit de stockage local (à l'exception de la capacité de stockage) et la sécurité électrique seront réalisés en technologie silicium, ce qui permet de les intégrer dans un très faible volume, d'environ $4\text{mm} \times 4\text{mm} \times 0,5\text{mm}$, et de tenir aux environnements (rayonnements ionisants par exemple...). Seules les capacités de stockage seront en technologie CMS et s'intégreront dans un volume de 100mm^3 environ, sachant qu'un condensateur de $10\mu\text{F}$ occupe lui aussi un encombrement de $4\text{mm} \times 4\text{mm} \times 0,5\text{mm}$.

Tous ces éléments seront assemblés sur plusieurs circuits imprimés réalisés sur alumine (car la tenue aux environnements est compatible avec les contraintes du spatial) et sont interconnectés dans les 3 dimensions. Les entrées-sorties de l'électronique de commande seront reliées à des connecteurs femelles de type tulipes pour se brancher d'un côté sur la prise 13 broches, et sur les contacts desservant la partie pyrotechnique de l'IFI ainsi que la lecture de l'adresse numérique sur la bague d'adressage de l'autre. L'ensemble sera ensuite encapsulé dans un polymère isolant assurant la tenue aux environnements, mis en forme par injection-moulage. La géométrie du bloc (voir Figure 33) permet un détrompage mécanique et assure ainsi le branchement correct de l'électronique sur les connecteurs du corps et évite de déformer les contacts électriques si l'alignement correct n'est pas réalisé. Les interfaces du bloc ainsi formé permettent par ailleurs de tester l'électronique avant son intégration.

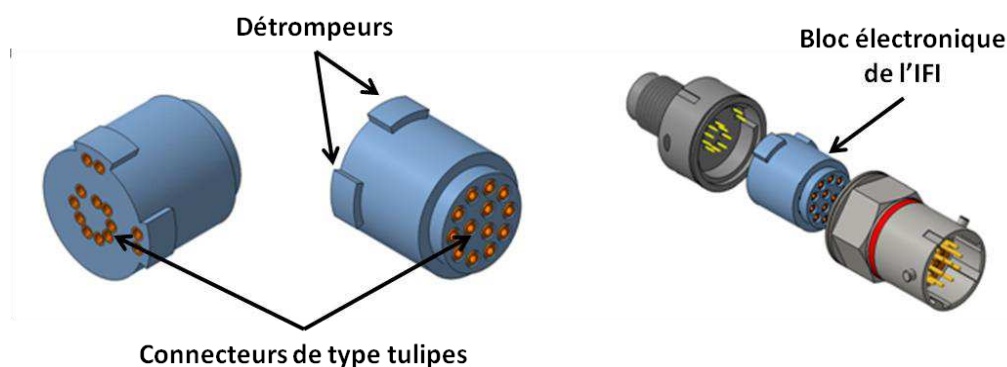


Figure 33. Géométrie du bloc électronique de l'IFI

4.6. Armement mécanique

La fonction armement mécanique, consiste à interposer une barrière mécanique amovible capable d'intercepter le signal pyrotechnique entre l'initiateur électro-pyrotechnique et la charge pyrotechnique à initier.

La conversion électro-pyrotechnique et l'armement mécanique étant intégrés dans un corps cylindrique imposé par la nécessité d'être interfacé avec les fonctions terminales, nous proposons que la puce d'initiation soit désalignée de la chaîne pyrotechnique par mouvement circulaire autour de l'axe central du corps. La barrière mécanique est alors rapportée sur le corps par sertissage, entre les puces de conversion électro-pyrotechnique et la charge relais à allumer. Le principe d'armement est représenté sur la Figure 34 :

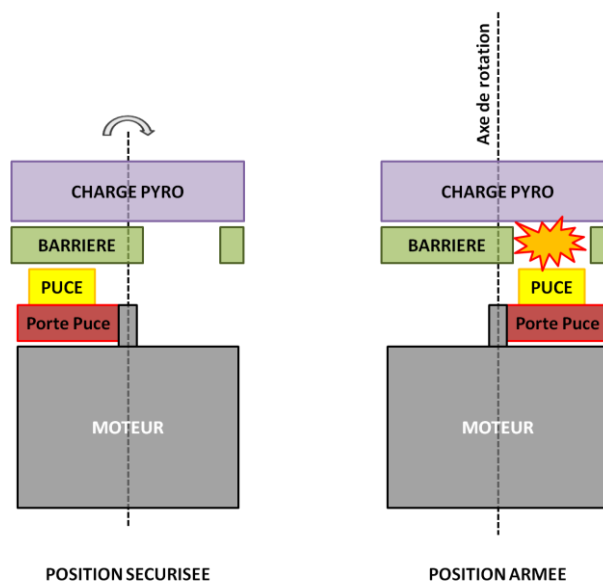


Figure 34. Principe de l'armement mécanique de l'IFI

4.6.1. Le moteur d'armement mécanique et son pilotage

Le volume disponible étant très faible et sachant qu'une absence d'énergie dans les circuits du système d'interception ne doit pas faire changer l'état du système, un moteur électromagnétique brushless couplé à un motoréducteur capable de mettre en rotation la puce d'initiation a été choisi. En effet, la présence du motoréducteur permet d'avoir un niveau de friction suffisant pour maintenir l'IFI dans la position Armée ou Sécurisée, même sous l'effet des vibrations. De plus, ce motoréducteur permet d'utiliser un moteur peu puissant, et donc de faible dimension et consommant peu de puissance électrique, puisque le couple en sortie d'arbre est démultiplié par le réducteur.

Le fond du moteur est collé dans un bloc en polymère isolant qui intégrera des connecteurs femelles de type tulipes (voir Figure 35). Les câbles d'alimentation du moteur seront soudés à l'extrémité des tulipes. Ce bloc se branche sur les contacts présents le corps de l'IFI et permet ainsi le blocage du stator dans le boîtier ainsi que la connexion d'alimentation électrique des trois bobines du moteur.

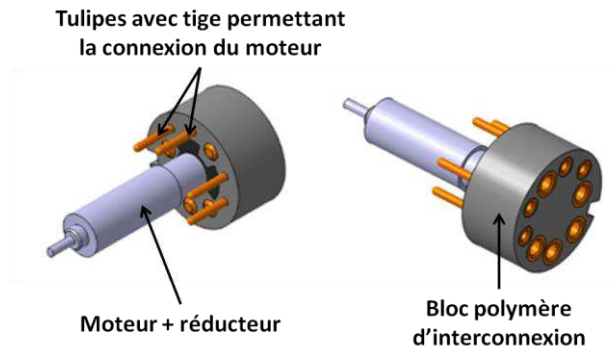


Figure 35. Moteur d'armement mécanique et pièce d'interface mécanique et électrique

Le pilotage des trois bobines du moteur est assuré par un triple pont en H composé de deux transistors CMOS (voir Figure 36). Ces transistors sont pilotés par le microcontrôleur et sont implantés sur la même puce. Pour faire tourner le moteur d'un tour avant réduction, il faut alimenter successivement les trois bobines. Ainsi, le champ magnétique résultant de la circulation du courant met en rotation l'aimant dans le moteur.

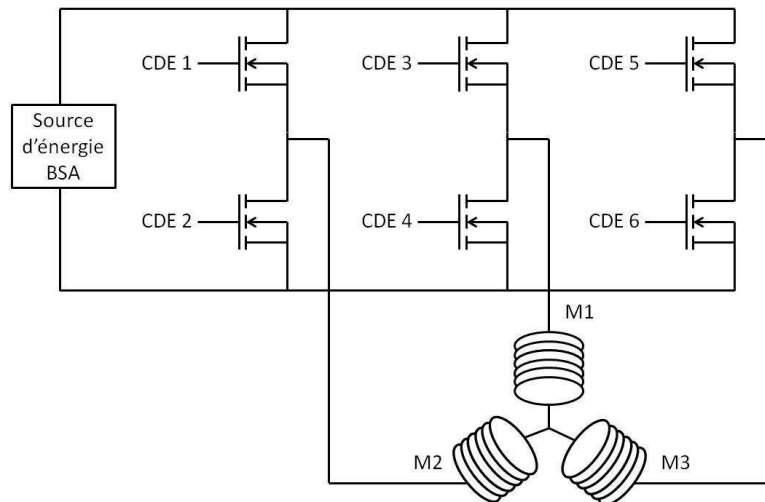


Figure 36. Triple pont en H permettant la commande de rotation du moteur

Le séquençage permettant la rotation antihoraire du moteur est donné dans le Tableau 11. Les combinaisons correspondant à CDE 1=CDE 2=1, CDE 3=CDE 4=1 et CDE 5=CDE 6=1 sont interdites car elles provoquent des courts-circuits au niveau du pont de pilotage. Les combinaisons autres que celles référencées ne provoquent pas de mouvement car aucun courant ne circule dans les bobines.

M1	V+	[Timing diagram for M1 V+]											
	V-	[Timing diagram for M1 V-]											
M2	V+	[Timing diagram for M2 V+]											
	V-	[Timing diagram for M2 V-]											
M3	V+	[Timing diagram for M3 V+]											
	V-	[Timing diagram for M3 V-]											
CDE 1		1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	
CDE 2		0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0
CDE 3		0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0
CDE 4		1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
CDE 5		0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
CDE 6		0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0

Tableau 11. Séquencement permettant une rotation antihoraire du moteur

Lorsque l'on souhaite maintenir le BSA en position fixe, en complément de la friction induite par le réducteur, le court circuit des 3 bobines du moteur assure un effet « frein électrique ». Ce court circuit est réalisé par la combinaison CDE 1 = CDE 3 = CDE 5 = 1 et CDE 2 = CDE 4 = CDE 6 = 0.

4.6.2. La plateforme porte-puce

Comme l'armement ou le désarmement est réalisée en déplaçant la puce de conversion électro-pyrotechnique, nous avons choisi comme plateforme porte-puce un circuit imprimé double face, solidaire de l'axe du moteur (voir Figure 37). Ainsi, il est possible de connecter électriquement la puce en face avant, et de récupérer cette connexion depuis la face arrière, grâce à des vias métallisés. Pour accroître la fiabilité du système, la puce réalisant la conversion électro-pyrotechnique est redondée.

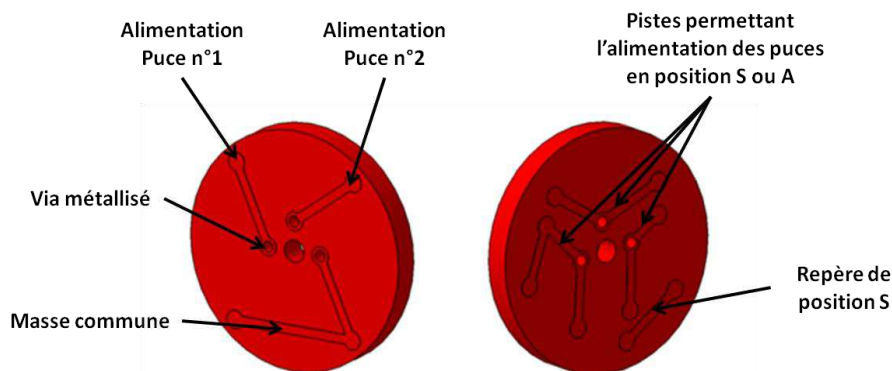


Figure 37. Circuit imprimé réalisant la plateforme porte-puce

Sur la face avant seront reportées les puces d'initiation électro-pyrotechniques. Des pistes métalliques permettent l'alimentation séparée des deux puces ainsi qu'une masse commune. Les pistes métalliques présentes sur la face arrière seront réalisées de manière à obtenir la connexion électrique des puces lorsque le système se trouve en position Armée ou Sécurisée, et une déconnexion dans toutes les positions intermédiaires. Cette solution permet de réaliser un couplage de la sécurisation électrique et mécanique (interrupteur S1 de la matrice de commutation, voir §4.4). Pour permettre au système de connaître sa position (Armée, Sécurisée, Non armée et non sécurisée), des pistes métalliques supplémentaires sont présentes, permettant la lecture de la position par des tests de continuité électrique. La connexion électrique depuis l'électronique de commande vers cette plateforme porte-puce est réalisée grâce à des contacts à ressorts qui s'appuient sur la face arrière du circuit imprimé, même lorsqu'il est en rotation. Ces contacts à ressorts sont encapsulés dans un bloc de polymère, assurant leur positionnement et leur isolation électrique (voir Figure 38). Ce bloc présente un trou central permettant de le positionner sur le moteur ainsi que quatre trous périphériques permettant de le bloquer en rotation par brochage sur l'extrémité des tulipes.

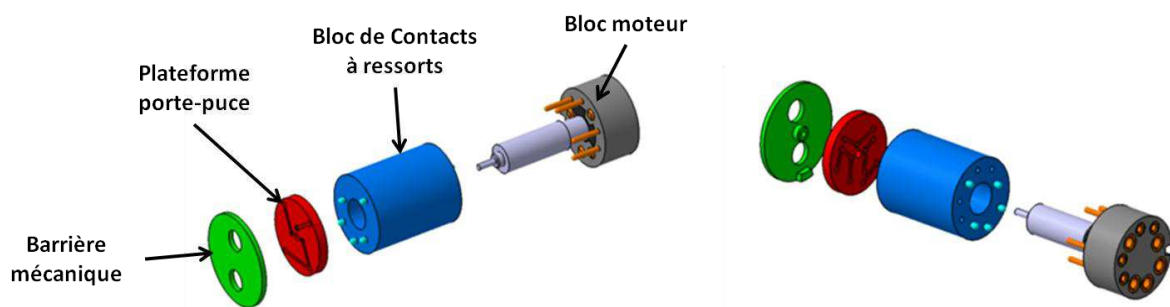


Figure 38. Vue éclatée du système d'armement mécanique de l'IFI

5. Conversion électro-pyrotechnique

La fonction conversion électro-pyrotechnique est la fonction principale de l'IFI puisqu'elle doit transformer un signal électrique en un signal pyrotechnique (une flamme, une pression ou une onde de choc selon le type d'initiateur). Comme décrit dans le chapitre 1, la conversion électro-pyrotechnique de l'IFI sera réalisée par effet Joule dans un filament permettant l'initiation d'une composition de type thermite. L'inflammation de la thermite doit ensuite initier un relais chargé de composition inflammable, propulsive ou explosive selon le type d'initiateur que l'on souhaite réaliser. Pour des raisons d'encombrement, de fiabilité et de coût, la meilleure solution consiste à utiliser les technologies MEMS pour réaliser la conversion électro-pyrotechnique. Ces technologies utilisent les procédés classiques et collectifs, permettant pour chaque wafer la fabrication d'un grand nombre de puces avec des propriétés reproductibles. Les détails concernant la conception de ces puces sont donnés dans les paragraphes qui suivent.

5.1. Choix du type de thermite utilisée

Parmi les différents types de thermites existants (voir Tableau 12), nous avons choisi le couple Aluminium / Oxyde de Cuivre (II) car il présente une grande enthalpie volumique de réaction, répondant ainsi à notre besoin de miniaturisation. De plus, les matériaux utilisés sont classiquement utilisés en micro-électronique et répondent à notre besoin d'innocuité chimique, respectant alors la réglementation REACH. Structurées à l'échelle nanométrique, ces thermites présentent une grande réactivité puisque la cinétique de réaction n'est plus limitée par la vitesse de diffusion des espèces chimiques [44].

	Enthalpie massique de réaction (kJ/g)	Enthalpie volumique de réaction (kJ/cm ³)
Al/Cu ₂ O	2	14
Al/Fe ₂ O ₃	4	16
Al/MoO ₃	5	18
Al/MnO ₂	5	19
Al/CuO	4	21

Tableau 12. Enthalpie théorique de réaction de différents types de thermites [55]

Les nano-thermites Al/CuO peuvent être synthétisées soit par mélange de nano poudres [56], soit par empilement de couches nanométriques [57]. Le mélange de nano poudres présente de nombreux inconvénients car il est difficile de contrôler et maîtriser l'homogénéité du mélange, mais aussi la taille et la forme des poudres. De plus, leur intégration dans les MEMS est complexe et utilise des solvants qui peuvent flegmatiser ou polluer la composition. La technologie de dépôt de nano-thermites multicouches est disponible au LAAS et a fait l'objet d'une thèse [8]. Elle utilise les technologies de la microélectronique, permettant de maîtriser précisément (+/- 5nm) les épaisseurs de dépôt tout en assurant une grande pureté puisque le dépôt est réalisé sous vide secondaire. De plus, le procédé de dépôt est totalement compatible avec les MEMS ce qui permet de les intégrer très facilement, grâce aux techniques de photolithographie.

5.2. Choix du substrat

Le substrat sur lequel sont déposés le filament et la thermite est un élément important puisqu'il impacte directement les performances énergétiques de la puce. En effet, selon que la nature du substrat, les pertes thermiques peuvent pénaliser le transfert de chaleur vers la thermite, à l'origine d'une plus grande consommation électrique et d'un temps de réponse plus long.

Dans les travaux menés précédemment au LAAS plusieurs solutions technologiques ont été explorées, en particulier l'utilisation de substrat Pyrex [8] ou encore de membranes suspendues en SiO₂/SiN_x [6]. Le substrat en Pyrex a été choisi car il présente une conductivité thermique bien plus faible que le silicium (de l'ordre de 1,5W/mK pour le Pyrex contre 150W/mK pour le silicium), une bonne tenue mécanique et une simplicité d'utilisation. Toutefois, les pertes thermiques sur ce type de substrat restent importantes puisque pour obtenir des temps de réponse conformes au cahier des charges (c'est-à-dire inférieur à la

milliseconde), la puissance électrique à apporter au système doit être élevée, de l'ordre de la centaine de watts [8]. A l'opposé, les membranes diélectriques $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ développées au LAAS en 1995 [2] présentent une conductivité thermique plus élevée de $7,5 \text{ W/mK}$, mais leur très faible épaisseur, d'environ $2\mu\text{m}$, permet d'obtenir une plateforme de chauffe à très faible inertie thermique, à l'origine d'une consommation électrique plus faible, de l'ordre du watt. Toutefois, l'inconvénient majeur de cette technologie réside dans la fragilité mécanique de ces membranes.

Les récents progrès en micro-technologie permettent aujourd'hui d'utiliser et structurer des matériaux organiques et ainsi de réaliser des structures tridimensionnelles grâce à une résine époxy photosensible, appelée SU-8, déposée en couche épaisse par spin-coating (jusqu'à plusieurs centaines de microns), mise en forme par les techniques de photolithographie conventionnelles. La résine SU-8 présente l'avantage d'être photosensible et thermodurcissable, d'avoir un coefficient de conductivité thermique assez bas ($0,8 \text{ W/mK}$), d'avoir une grande résistance mécanique et chimique une fois réticulée, et d'être compatible avec la réglementation REACH. Cette technologie est actuellement développée au LAAS dans les équipes de micro fluidique pour la réalisation de canaux 3D [9].

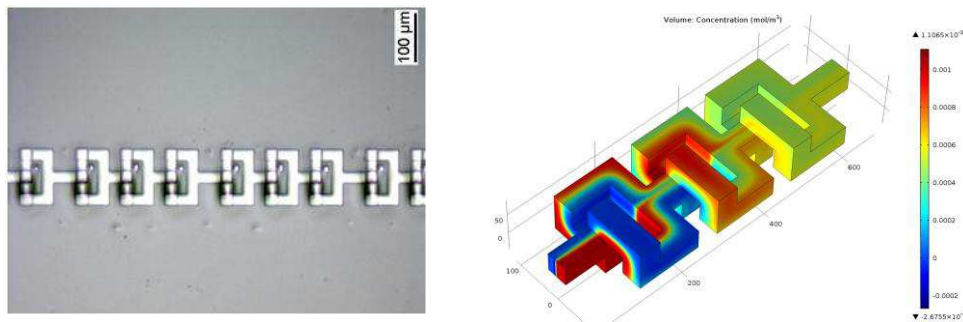
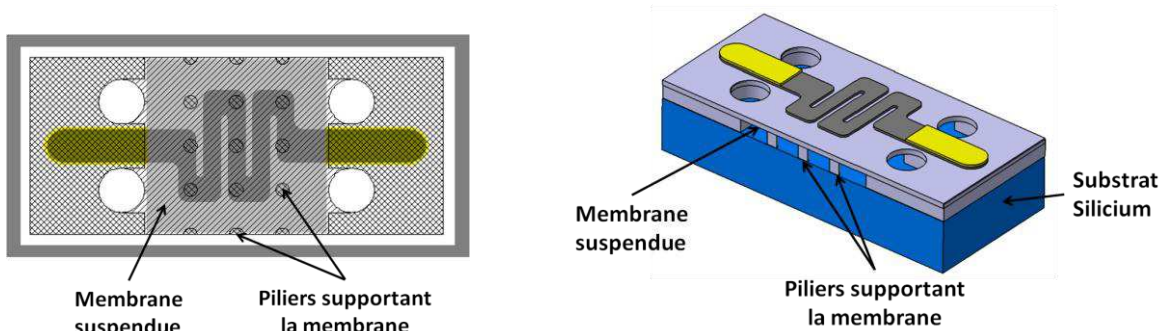


Figure 39. Mélangeur micro-fluidique utilisant des canalisations 3D en SU-8

Nous proposons d'adapter ce matériau et cette technologie à notre application pour réaliser des puces d'initiation à membranes suspendues en SU-8 sur substrat silicium (voir Figure 40), permettant ainsi d'avoir des propriétés d'isolation thermique intéressantes tout en gardant la résistance mécanique du silicium. Le filament et la thermité seront alors déposés sur une membrane dont les dimensions seront adaptées au cours du développement technologique.



échelle verticale non respectée – thermité non représentée

Figure 40. Schémas de la puce de conversion électro-pyrotechnique sur membrane

5.3. Géométries de la puce, du filament et de la thermitite

La géométrie extérieure de la puce de conversion électro-pyrotechnique est rectangulaire car fixée par la technique de découpe utilisée en microélectronique à savoir le découpage par scie diamantée. Les dimensions totales de la puce d'initiation ont été choisies à 3,6 mm x 1,6 mm pour pouvoir s'intégrer sur la plateforme d'armement mécanique décrite au paragraphe 4.6.2. Des chemins de découpe seront réalisés sur les bords de la puce pour permettre l'alignement précis de la scie diamantée. La largeur de ces chemins a été choisie suffisamment élevée pour éviter d'endommager la partie utile de la puce en cas d'écaillage lors de l'étape de découpe.

Le filament permettant l'initiation par effet Joule est un serpentín déposé par pulvérisation cathodique et mise en forme par photolithographie. Plusieurs métaux sont disponibles pour réaliser ce filament parmi lesquels le platine, le titane, l'aluminium ou encore le tungstène. Nous avons choisi le titane car il présente de très bonnes performances mécaniques (faibles contraintes mécaniques internes, bonne accroche sur n'importe quel substrat, résistance mécanique importante), une température de fusion élevée, ainsi qu'un faible coût. Le filament couvrira une surface de 1mm² pour une épaisseur de 300nm et sa résistance électrique est calculée à 70 Ohm. Des plots en or de 200nm d'épaisseur sont prévus de part et d'autre du filament pour la connexion électrique par wire-bonding.

La surface de nano-thermite a été fixée à 1,6mm x 1,5mm car c'est un bon compromis entre surface disponible et énergie dégagée. Les épaisseurs des couches d'aluminium et d'oxyde de cuivre ont été fixées à 100nm et 200nm respectivement car cela correspond aux proportions stœchiométriques, permettant une libération d'énergie optimale. L'épaisseur totale de la thermitite est de 4,5µm, correspondant à l'empilement de 30 couches successives d'oxyde de cuivre et d'aluminium. Les travaux menés dans le cadre de la thèse de Marine Pétrantoni [8] ont montré que cette configuration (épaisseur et surface de thermitite) permet d'initier différents propergols au contact ou à quelques centaines de microns d'espacement.

La Figure 41 représente schématiquement la puce de conversion électro-pyrotechnique :

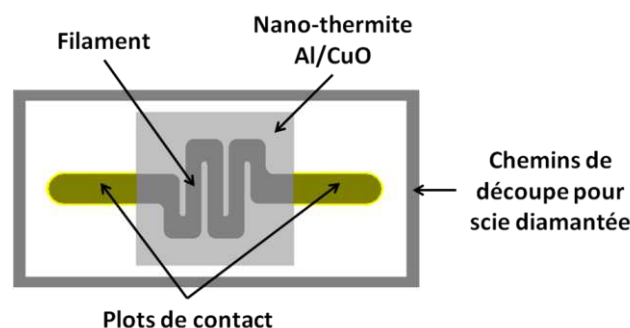


Figure 41. Schéma de la puce de conversion électro-pyrotechnique

5.4. La simulation thermique des structures sur pyrex, sur membrane SU-8 et sur film SU-8

Afin de confirmer notre choix de technologie sur membrane SU-8, nous avons réalisé des simulations à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics qui permet de coupler différents modèles physiques en 3D avec une résolution par éléments finis. Nous allons ainsi pouvoir comparer les performances thermiques des puces sur substrat pyrex à celles obtenues sur membrane pour différentes puissances d'alimentation électriques. Nous simulerons aussi des structures isolées du substrat Pyrex par un film de SU-8 de 100 μ m d'épaisseur. Nous comparerons alors les profils thermiques dans les structures ainsi que les valeurs de températures maximales dans le filament obtenues à l'état stationnaire. Les détails de cette modélisation sont donnés dans les paragraphes qui suivent.

5.4.1. La description du modèle

Les structures modélisées en 3D (voir Figure 42) sont sensiblement identiques à celles décrites dans les paragraphes précédents à l'exception du filament dont la géométrie est différente, correspondant aux anciennes générations de puces réalisées au LAAS. La valeur de la résistance électrique de ces puces à température ambiante est de 37 Ohm. Pour simplifier le modèle, nous avons choisi de ne pas prendre en compte les éventuels piliers qui viendront soutenir la membrane et nous faisons l'hypothèse que les pertes par conduction dans ces piliers sont négligeables². La thermite n'est pas non plus présente dans ce modèle puisque nous nous intéressons uniquement au comportement thermique de la plateforme de chauffe.

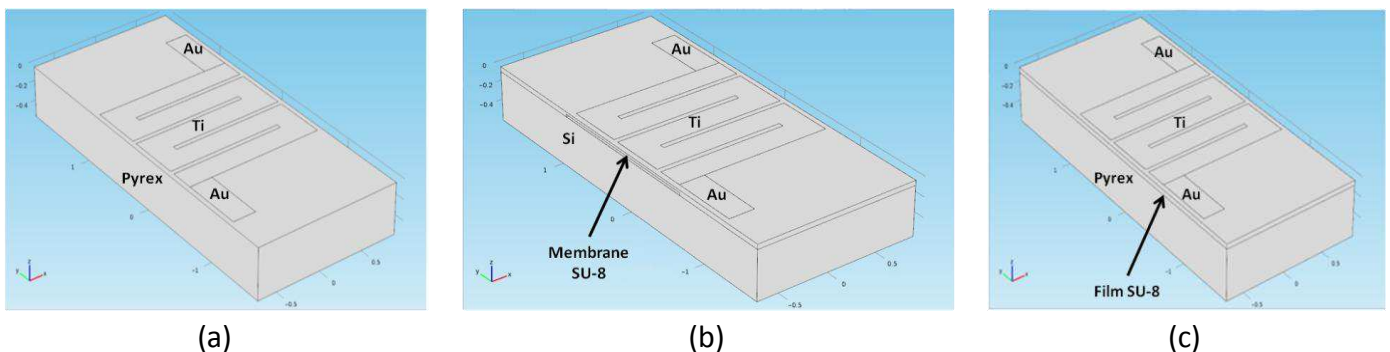


Figure 42. Structures 3D modélisées sous COMSOL (a) Substrat Pyrex (b) Membrane SU-8 (c) Film SU-8

Pour prendre en compte le fait que les puces seront assemblées sur un circuit imprimé, le modèle considère les puces en contact thermique sur un support isolant de 3mm d'épaisseur pour 5mm de coté. La structure complète (puce sur son support) est représentée sur la Figure 43.

² Nous avons validé cette hypothèse en réalisant des simulations avec piliers qui ont montrés leur très faible impact sur les profils thermiques obtenus.

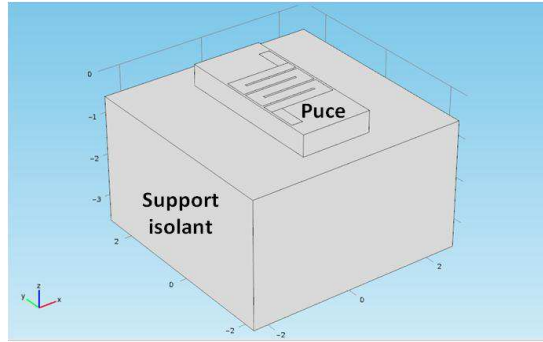


Figure 43. Structure complète modélisée sous COMSOL

Les modèles physiques utilisés sont la génération de chaleur par effet Joule ainsi que les équations de transfert thermique par conduction dans la structure et par convection avec l'environnement extérieur.

$$P = \rho \cdot j_{eff}^2 \quad \text{avec} \quad \begin{cases} P \text{ la puissance dissipée par effet Joule par unité de volume en } W/m^3 \\ j_{eff} \text{ la valeur efficace de la densité de courant en } A/m^2 \\ \rho \text{ la résistivité électrique en } \Omega.m \end{cases}$$

Équation 1. Forme locale de la loi de Joule

$$\lambda \Delta T + P = \mu c \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \lambda \text{ la conductivité thermique du matériau en } W/m.K \\ P \text{ la génération de chaleur dans le matériau en } W/m^3 \\ T \text{ la température en } K \\ \mu \text{ la masse volumique en } kg/m^3 \\ c \text{ la capacité calorifique du matériau en } J/kg.K \end{cases}$$

Équation 2. Conduction de la chaleur dans un corps homogène

$$\frac{dQ}{dt} = h \cdot S \cdot (T_S - T_{air}) \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \frac{dQ}{dt} \text{ le flux de chaleur en convection en } W \\ h \text{ le coefficient d'échange convectif en } W/m^2 .K \\ S \text{ la surface d'échange convectif en } m^2 \\ T_S \text{ la température de la surface en } K \\ T_{air} \text{ la température de l'écoulement d'air en } K \end{cases}$$

Équation 3. Expression du flux de chaleur par convection

5.4.2. Les conditions de simulation

Les valeurs de résistivité électrique, de masse volumique, de conduction et capacité thermique des matériaux utilisés dans notre modèle sont celles disponibles dans les tables du logiciel de simulation COMSOL et sont rappelées dans le Tableau 13. La valeur du coefficient de convection a été choisi à $h=100W/m^2K$, car le renouvellement de l'air à température ambiante au dessus de la puce est important au vue des faibles dimensions du système. Cette valeur est classiquement utilisée pour la modélisation thermique dans les microsystèmes [6].

Matériau	Pyrex	Silicium	SU-8	Titane	Or
Résistivité électrique ρ ($\Omega.m$)	10^6	10^6	10^6	$3,8.10^{-7}$	$2,2.10^{-7}$
Masse volumique μ (kg/m^3)	2230	2329	1200	4506	19300
Capacité calorifique c ($J/kg.K$)	754	700	1200	522	129
Conductivité thermique λ ($W/m.K$)	1,13	130	0,8	21,9	317

Tableau 13. Propriétés des matériaux utilisés pour la modélisation COMSOL

- Les conditions électriques sont les suivantes :
 - L'un des deux plots de contact est à potentiel nul (masse).
 - Le potentiel appliqué à l'autre plot balaye des valeurs de 0 à 2V par pas de 0,25V. Les puissances électriques correspondantes sont données dans le Tableau 14.

Tension appliquée (V)	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2
Puissance électrique (mW)	0	1,6	6,7	15,2	27	42,2	60,8	82,7	108,1

Tableau 14. Tensions et puissances électriques simulées sous COMSOL

- Les conditions aux limites sont les suivantes :
 - L'air est à température ambiante, c'est-à-dire $T_{air}=21^{\circ}C$
 - Les phénomènes de convection ne s'appliquent qu'à la surface supérieure de la puce avec $h=100W/m^2K$
 - Il n'y a pas de pertes thermiques sur les surfaces latérales de la puce
 - Il y a continuité des températures entre la puce et le pavé de support
 - La température de la face inférieure du pavé est thermalisée à $T=21^{\circ}C$

L'ensemble de ces conditions de simulation sont représentés dans la Figure 44 :

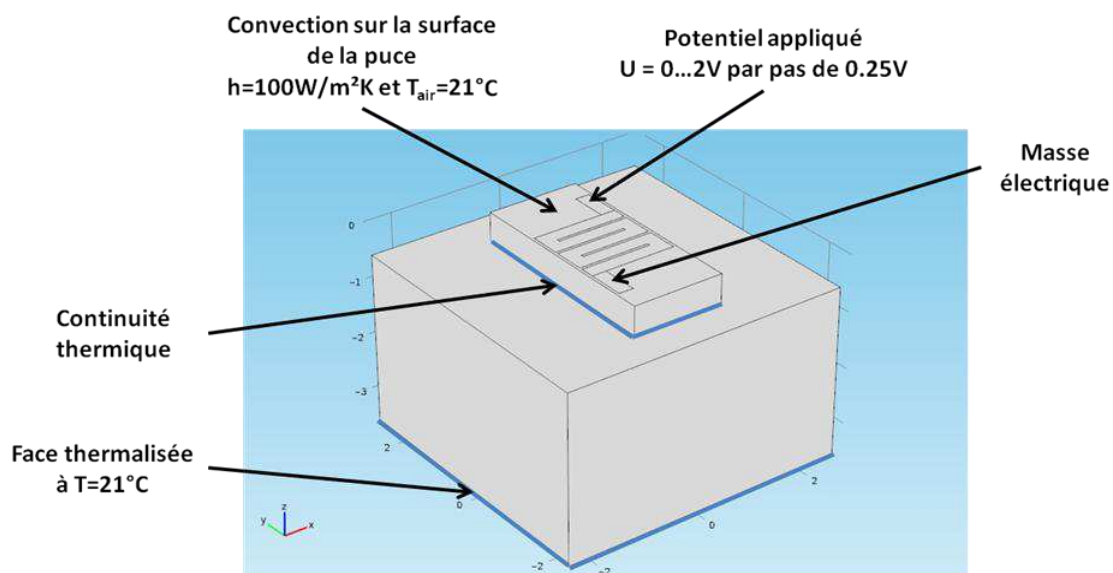


Figure 44. Conditions de simulation COMSOL

5.4.3. Le maillage de la structure

Le maillage est réalisé en prenant en compte les difficultés engendrées par les forts rapports de forme de la structure, en particulier concernant le filament dont l'épaisseur est de 200nm pour une largeur de 200 μm et plusieurs millimètres de long.

Pour le maillage du filament, nous avons choisi un maillage triangulaire de la surface, que nous avons ensuite extrudé sur l'épaisseur. Le maillage de la membrane (ou du film), du substrat et du support sont ensuite réalisés par des tétraèdres. Le maillage est alors assez fin à proximité du filament, puis plus grossier lorsque l'on s'en éloigne. Le nombre total de mailles a été optimisé pour obtenir un bon compromis entre la précision des résultats et le temps de calcul nécessaire. La Figure 45 représente le maillage ainsi réalisé.

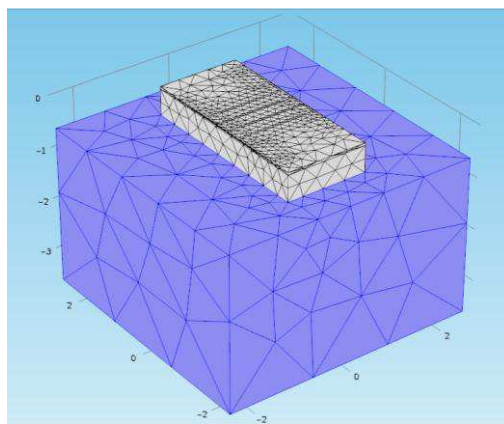


Figure 45. Maillage de la structure (ici sur membrane) réalisé sous COMSOL

5.4.4. Les résultats de simulation en régime statique

Les simulations réalisées permettent d'obtenir les profils de température à l'état stationnaire pour chaque structure et pour chaque puissance d'alimentation. La Figure 46 représente ces profils pour les trois structures modélisées, alimentées avec une puissance de 108 mW.

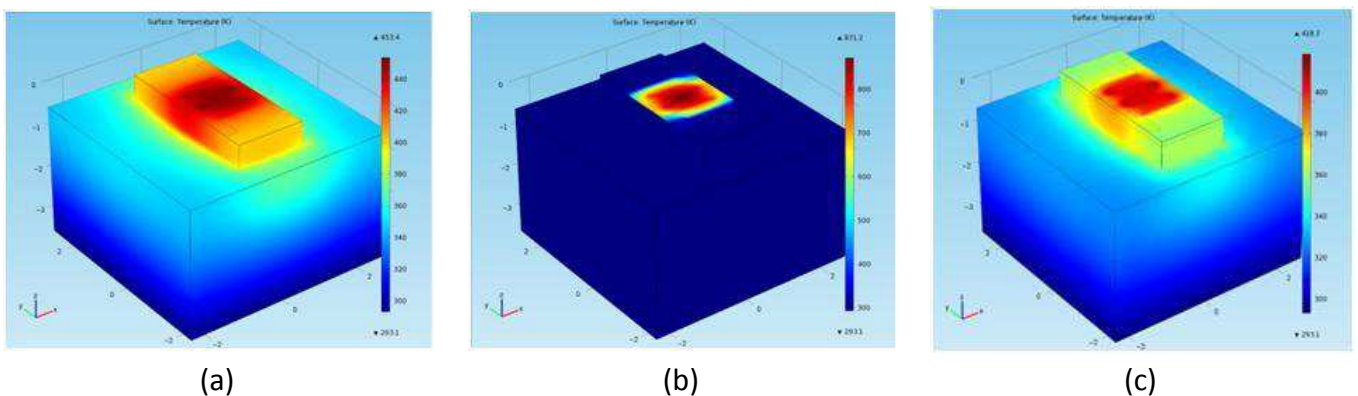


Figure 46. Profils thermiques des structures (a) sur Pyrex (b) sur membrane SU-8 (c) sur film SU-8

Cette simulation met en évidence la réduction massive des pertes thermiques par conduction lorsque l'on utilise la structure sur membrane SU-8. La valeur de température maximale atteinte dans le filament est alors bien plus élevée pour les structures sur membrane SU-8 que pour celles sur substrat Pyrex ou sur films SU-8, comme le montre la Figure 47 représentant la température maximale atteinte en fonction de la puissance d'alimentation électrique pour les trois structures.

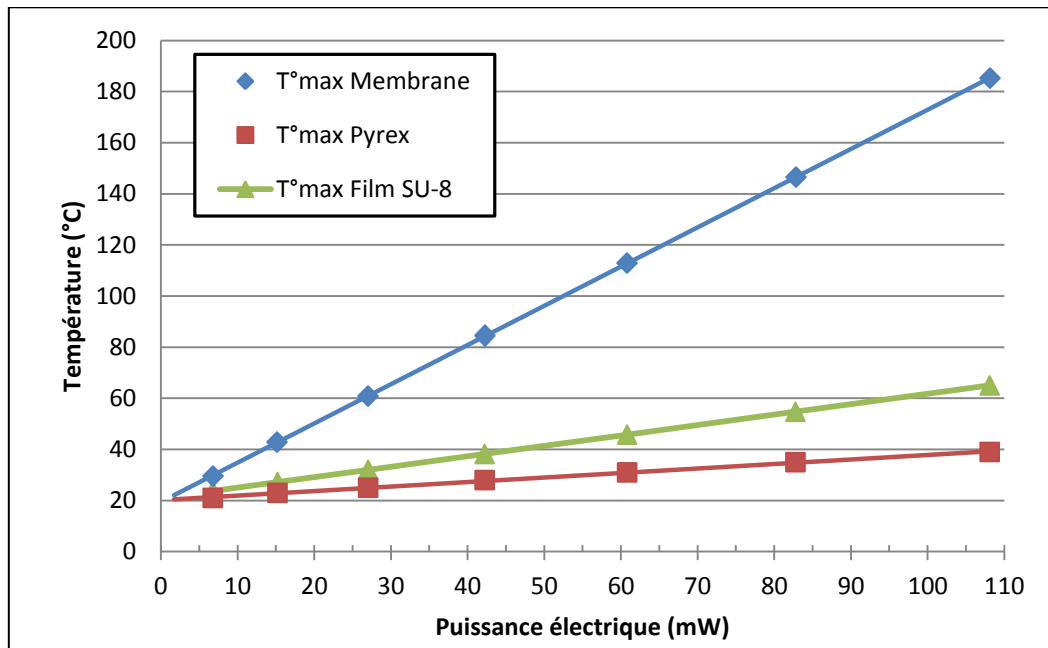


Figure 47. Température maximale en fonction de la puissance d'alimentation

5.4.5. Validation du modèle

Pour valider notre modèle, nous avons fabriqué des puces sur Pyrex sans y intégrer la thermite, et les avons caractérisées thermiquement. Nous avons alors comparé les résultats obtenus avec ceux issus de la simulation.

Nos caractérisations s'appuient sur la variation de résistivité du filament en fonction de la température. Dans un premier temps, nous imposons aux puces des températures variant de 25°C à 200°C par pas de 25°C en les plaçant sur un support thermo régulé et nous mesurons pour chaque température la résistance du filament à très faible courant pour ne pas l'échauffer par effet Joule. Cette première étape permet d'obtenir la variation de résistance en fonction de la température $R = f(T)$. Dans un second temps, le support de la puce est thermalisé à 21°C et le filament est alimenté sous différentes tensions. La mesure du courant dans le filament permet de calculer sa résistance. Connaissant sa variation avec la température, nous pouvons alors connaître la valeur de température du filament en fonction de la puissance électrique appliquée $T = f(P)$.

La Figure 48 représente les résultats de simulation comparés à ceux obtenus expérimentalement.

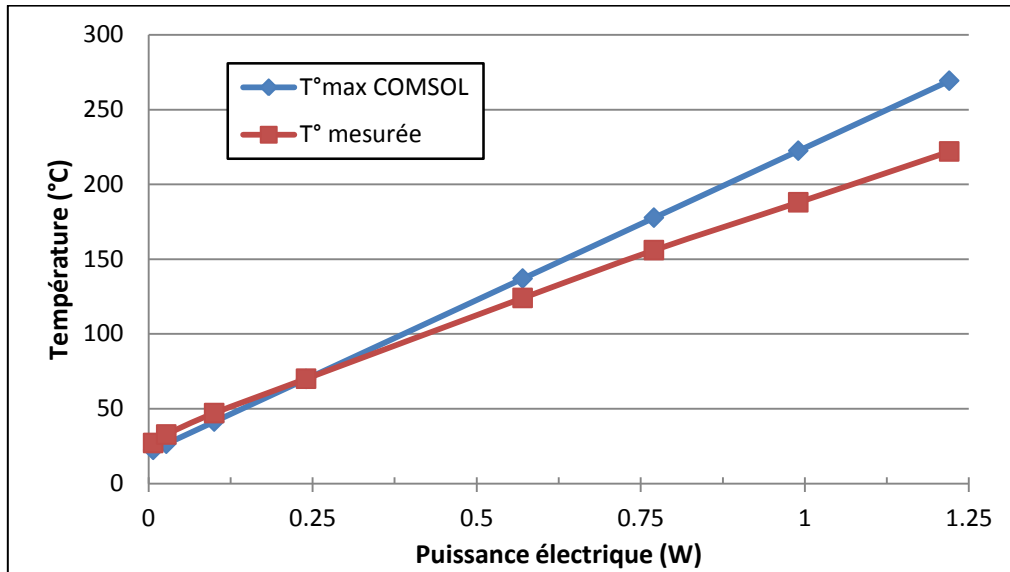


Figure 48. Comparaison des températures mesurées et celles obtenues par simulation pour puces sur Pyrex

On observe un écart entre les valeurs mesurées et celles obtenues par simulation, avec une température légèrement plus basse pour celles obtenues expérimentalement. Cet écart peut être expliqué par le fait que la température n'est pas homogène dans le filament et donc, en moyenne, légèrement inférieure à la température maximale. Toutefois, les résultats obtenus sont suffisamment proches pour considérer que nous avons validé notre modèle, avec un écart inférieur à 25% pour une puissance de 1,25mW.

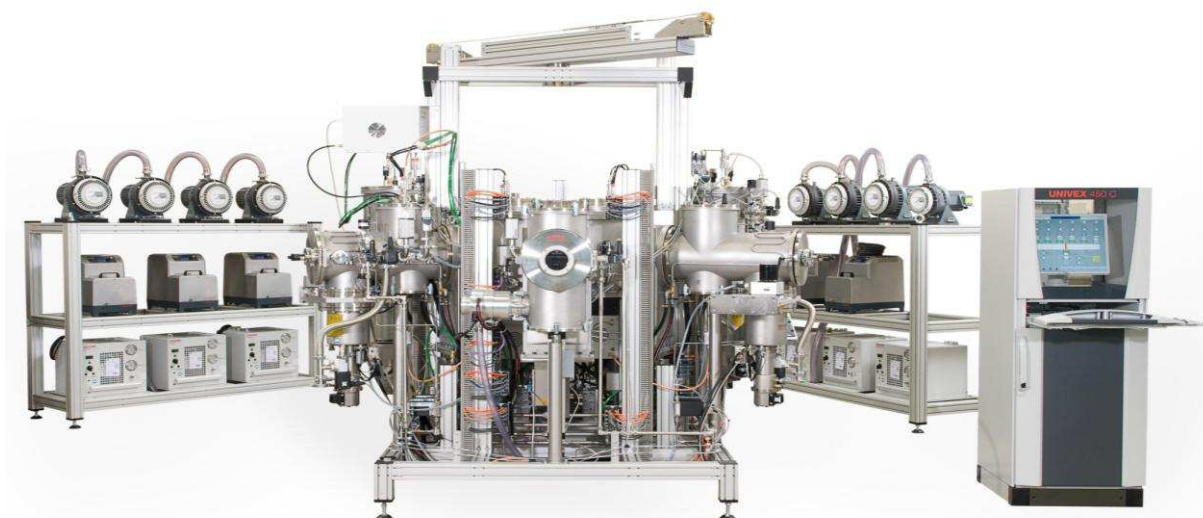
Nous retiendrons de ces résultats de modélisation que les puces sur membrane SU-8 présentent des performances thermiques bien meilleures que celles sur Pyrex ou sur film SU-8. Nous avons donc choisi de réaliser nos puces de conversion électro-pyrotechniques sur membrane. Toutefois, un important travail de mise au point du procédé de fabrication de telles structures devra être effectué puisque les technologies SU-8 doivent être adaptées à notre application. Par sécurité, nous réaliserons en parallèle des puces sur Pyrex, car c'est une technologie éprouvée.

6. Conclusion

Dans ce second chapitre, nous avons présenté le cahier de charges du projet puis l'architecture fonctionnelle du système. Nous avons ensuite présenté nos choix technologiques puis la conception détaillée des chacune des fonctions constitutives de l'IFI. Nous retiendrons comme principales innovations apportées par ces travaux :

- Le projet d'intégrer sur une même puce (system on chip) l'intelligence du système, la gestion du stockage local d'énergie, la sécurité électrique et le pilotage du système d'armement mécanique.
- Le choix d'un système d'armement mécanique basé sur un micromoteur brushless, permettant de sécuriser mécaniquement l'initiateur dans un volume de moins de $0,5 \text{ mm}^3$.
- Le choix d'une conversion électro-pyrotechnique réalisée en technologie MEMS, permettant d'intégrer une composition pyrotechnique de type nano-thermite multicouche Al/CuO sur une plateforme de chauffe sur membrane SU-8.
- Une architecture compacte de moins de 3 cm^3 intégré dans un corps d'interface mécanique et électrique prenant en compte au maximum les contraintes d'interconnexions au faibles dimensionnalités.

Ces choix de conception doivent être validés expérimentalement par la fabrication d'un démonstrateur. Le chapitre qui suit détaille d'abord le développement technologique pour réaliser la puce de conversion électro-pyrotechnique ainsi que la mise en œuvre de l'assemblage et de la connectique de tous les éléments constitutifs du démonstrateur de l'IFI.



Chapitre 3

Fabrication et assemblage de l'Initiateur à Fonctions Intégrées

1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons proposé une conception des différents éléments constitutifs de l'IFI avec comme innovations majeures, l'intégration de l'électronique de commande sous forme de « system on chip », l'utilisation des technologies MEMS pour la conversion électro-pyrotechnique, et l'intégration ultra-compacte de l'armement mécanique dans le corps de l'IFI grâce à un moteur brushless miniature. Cette conception doit maintenant être validée par la réalisation d'un prototype.

L'objectif de ce troisième chapitre est de décrire la mise au point des procédés utilisés pour la fabrication des différentes briques constitutives de l'IFI. Nous commencerons par le procédé de fabrication du corps d'interface mécanique et électrique. Nous détaillerons ensuite la fabrication d'un démonstrateur de l'électronique de l'IFI, permettant de valider la conception du système avant la réalisation du « system on chip ». Nous présenterons ensuite la mise au point du procédé de fabrication des puces de conversion électro-pyrotechnique sur membrane SU-8. Enfin, nous terminerons ce chapitre par la description des étapes d'assemblage des différentes briques, avec pour objectif la réalisation d'un prototype complet de l'IFI.

2. Fabrication du corps d'interface mécanique et électrique

Comme détaillé au chapitre 2, le corps réalisant les interfaces mécaniques et électriques de l'IFI est réalisé en deux parties qui sont par la suite assemblées par soudure laser. Ce corps sera en acier inoxydable et mis en forme par les techniques classiques d'usinage. Les contacts électriques sont pris dans un scellement de verre réalisant l'étanchéité et l'isolation électrique.

Pour réaliser le scellement de verre, nous avons réalisé un outillage en graphite qui vient se placer dans le boîtier en acier et qui présente des trous permettant de placer précisément les contacts électriques qui seront scellés dans le boîtier. Les contacts électriques sont placés dans cet outillage puis les perles de verre sont ensuite enfilées sur chacun des contacts. L'ensemble, représenté en Figure 49, subit ensuite une cuisson à haute température, de l'ordre de 900°C pendant environ une 1h30. Lors du passage au four, l'acier se dilate, le verre fond et remplit les trous présents dans le boîtier par capillarité. Lors du refroidissement, le verre se solidifie et est mis en compression par le boîtier en acier qui se contracte, ce qui permet aux scellements d'être très résistants aux sollicitations mécaniques.

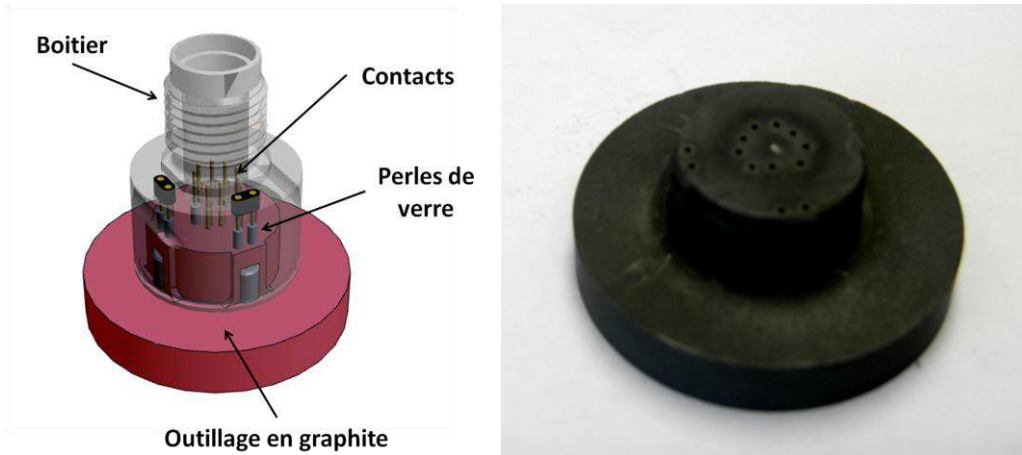


Figure 49. Outillage de positionnement et de scellement des contacts dans une perle de verre (partie 1 du corps de l'IFI)

La fabrication du boîtier, des outillages en graphite et le scellement des contacts à été sous-traité à la société **Conesys Europe**, et a permis la réalisation de plusieurs prototypes de chacune des parties du corps de l'IFI (voir Figure 50 et Figure 51), ainsi qu'une version assemblée (voir Figure 52).



Figure 50. Photos de la partie 1 du corps mécanique de l'IFI



Figure 51. Photos de la partie 2 du corps mécanique de l'IFI



Figure 52. Corps mécanique de l'IFI assemblé

3. Fabrication d'un démonstrateur de l'électronique de l'IFI

Lors des étapes de conception, nous avons choisi une technologie « system on chip » pour la réalisation de l'électronique de l'IFI, permettant alors d'intégrer l'intelligence du système, la gestion du stockage local d'énergie, la sécurité électrique et le pilotage de l'armement mécanique sur la même puce électronique. Avant de procéder à la fabrication d'une telle puce, il est impératif de réaliser une carte prototype pour valider et optimiser au maximum nos choix technologiques.

Nous avons donc choisi de réaliser des cartes électroniques au format Europe 100x160 intégrant un microcontrôleur IDMOS MC359 (cœur 68HC908) ainsi que la sécurité électrique, le stockage local d'énergie et le triple pont en H de pilotage de l'armement mécanique en technologie CMS. La puce de conversion électro-pyrotechnique sera simulée par une diode électroluminescente placée en vis-à-vis d'un phototransistor permettant de vérifier son bon fonctionnement. L'armement mécanique sera simulé par un moteur brushless de 8mm diamètre de technologie identique à celle que l'IFI embarquera, entraînant une plateforme présentant des secteurs colorés devant un écran percé d'un trou, permettant ainsi un retour visuel simple de l'état d'armement du système. L'architecture de cette carte est représentée dans la Figure 53.

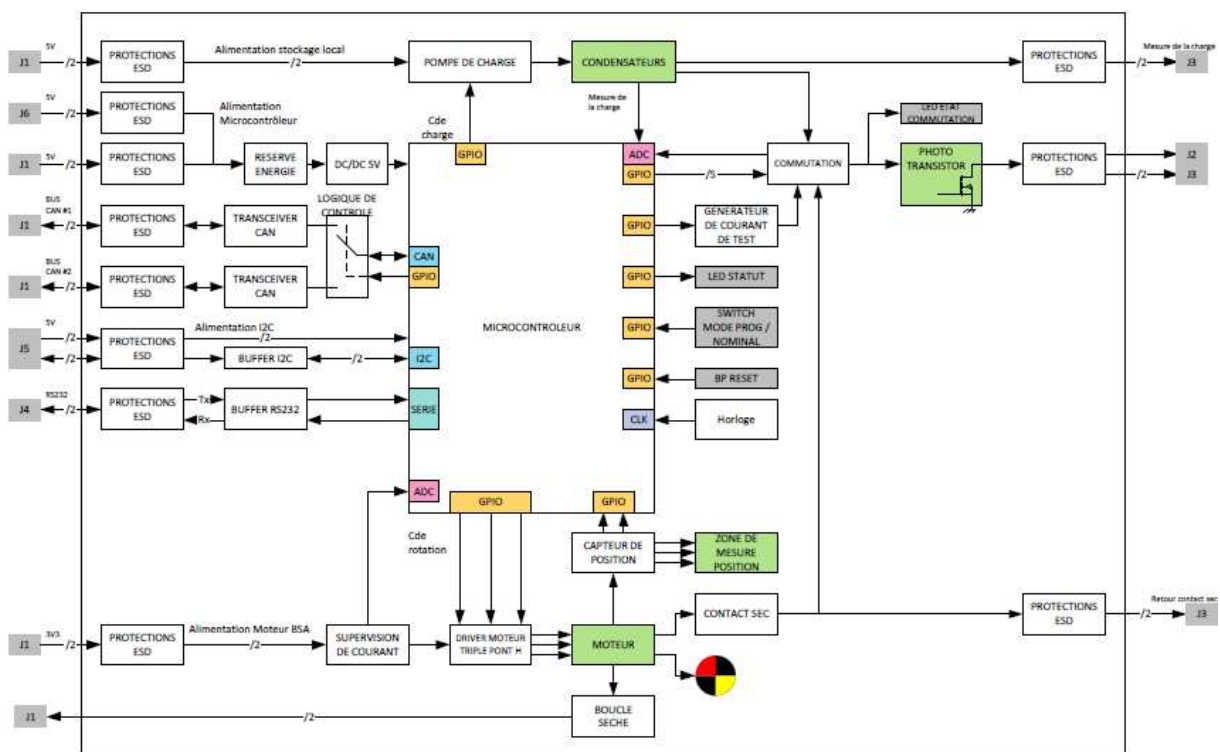


Figure 53. Architecture de la carte prototype de l'électronique de l'IFI

Pour valider le fonctionnement de l'architecture pyro-numérique, plusieurs de ces cartes seront pilotées par un bus de type CAN depuis une interface PC. La réalisation de ces cartes, ainsi que le bus numérique et l'interface PC a été sous-traitée à la société **SERMA Ingénierie** et est actuellement en cours de fabrication.

4. Mise au point du procédé de fabrication des puces de conversion électro-pyrotechnique sur membrane SU-8

Pour réaliser la conversion «électro-pyrotechnique », nous avons retenu lors de notre étape de conception le principe d'un filament en titane échauffé par effet Joule permettant d'initier une composition inflammable de type nano-thermite multi-couches Al/CuO, le tout mis en forme à l'aide des technologies MEMS. Nous avons choisi d'explorer l'utilisation de plateformes de chauffe sur membranes suspendues réalisées en SU-8 pour favoriser le transfert thermique du filament vers la thermite. Les paragraphes qui suivent détaillent la mise au point du procédé de fabrication de telles structures car les technologies SU-8 sont récentes et doivent être adaptées à notre application.

4.1. Mise au point du procédé de fabrication des membranes suspendues en SU-8

Après avoir présenté le principe de la double insolation, nous présenterons la mise au point du procédé de fabrication des membranes SU-8 puis l'optimisation de leur géométrie.

4.1.1. Principe de réalisation de structures suspendues en SU-8 : Technique de la double insolation

La résine SU-8 est composée de monomères SU-8 présentant 8 ponts époxydes (voir Figure 54), d'un photo-générateur d'acide et d'un solvant organique. La proportion monomère/solvant permet de définir la viscosité de la résine, permettant le dépôt par spin-coating d'épaisseurs très variées, du micron au millimètre.

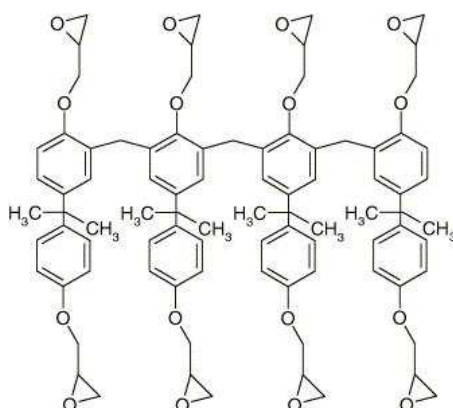


Figure 54. Structure chimique d'un monomère SU-8

C'est le photo-générateur d'acide présent dans la résine qui lui donne son caractère photosensible, puisque sous l'effet d'un rayonnement ultra-violet, il va libérer localement des ions H^+ permettant l'ouverture des ponts époxydes et donc par la suite la réticulation (cette réticulation n'aura lieu que lors de l'étape de cuisson puisqu'il existe une barrière d'activation énergétique à $T=50^{\circ}C$). L'absorption des rayonnements ultra-violets par la résine dépend de la longueur d'onde et de l'épaisseur du dépôt [58] comme représenté dans la Figure 55.

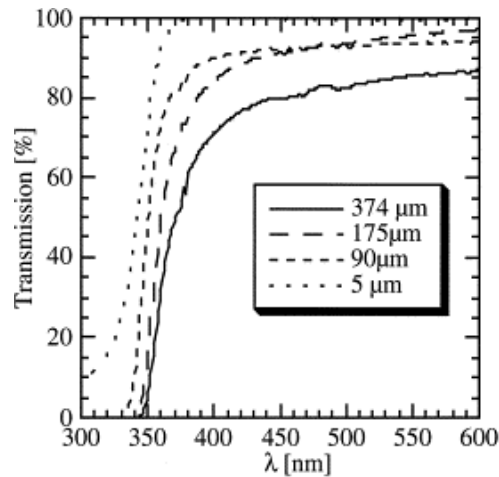


Figure 55. Transmission de la lumière en fonction de la longueur d'onde pour différentes épaisseurs de SU-8 [58]

C'est en exploitant cette différence d'absorption qu'il est possible de réaliser des structures 3D en SU-8. En effet, lorsqu'on insole de la résine avec des UV avec $\lambda = 365$ nm, l'absorption est très faible et toute l'épaisseur du dépôt subit le bombardement UV. Par contre, lorsqu'on utilise des UV avec $\lambda = 320$ nm, seule la surface est réellement insolée puisque la résine située plus en profondeur ne reçoit qu'un signal très atténué voir inexistant. En choisissant des masques de photolithographie et des durées d'insolation adaptées, on peut alors réaliser des structures de pont comme représenté dans la Figure 56. On obtient alors des structures suspendues après les étapes de cuisson et de révélation.

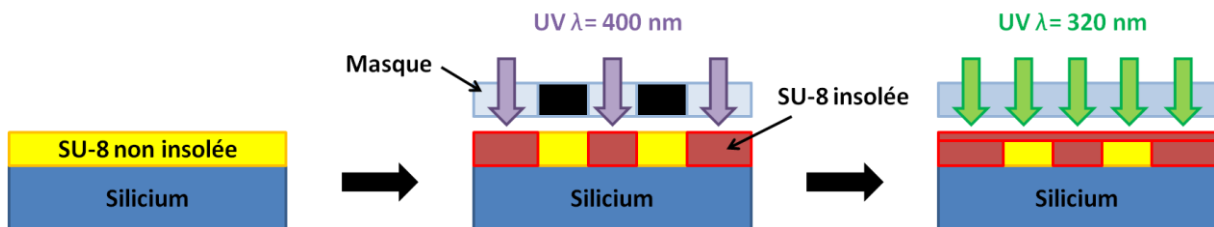


Figure 56. Réalisation de structures de pont par double insolation de la SU-8

C'est cette technique que nous souhaitons utiliser pour réaliser des plateformes de chauffe isolées du substrat par une lame d'air. Il nous faut alors adapter ce procédé pour réaliser ces structures, en ajustant les paramètres de dépôt, de photolithographie, de cuisson et de révélation. C'est l'objet du paragraphe qui suit.

4.1.2. Détermination des paramètres de dépôt, de photolithographie, de cuisson et de révélation

Nous avons choisi de réaliser des membranes de $25\mu\text{m}$ d'épaisseur, suspendue à $75\mu\text{m}$ du substrat silicium. Ce choix est issu des travaux antérieurs menés sur la réalisation de structures SU-8 3D au LAAS [9], et ont montré que ces dimensions sont compatibles avec la technique de double insolation. Les membranes couvriront une surface de $1,6 \times 1,6 \text{ mm}^2$ permettant d'isoler la totalité de la thermitte du substrat. La géométrie de la structure, en

particulier le dimensionnement des piliers de support de la membrane fera l'objet d'une optimisation technologique dans le §4.2. Le procédé de réalisation de ces membranes se déroule en 5 étapes :

Etape 1 : Nettoyage du substrat silicium et préparation de la surface

Nous partons d'un substrat 4 pouces (10 cm de diamètre) en silicium d'orientation cristalline (100), de 500 μm d'épaisseur et poli sur sa surface supérieure puisque c'est un substrat standard en micro-électronique. En premier lieu, nous devons nettoyer ce substrat pour assurer une adhésion correcte des dépôts qui seront réalisés par la suite. Le wafer est donc placé pendant 2 minutes dans un mélange Piranha (50% en volume de H_2O_2 concentré à 30% – 50% en volume de H_2SO_4 concentré à 96%) ce qui piège les éventuelles impuretés par croissance d'une couche d'oxyde à la surface. Il est ensuite rincé à l'eau dé-ionisée, séché par un flux d'azote, puis placé 30 secondes dans un bain d'acide fluorhydrique à 5% permettant alors l'élimination de l'oxyde de surface chargé en impuretés. Le wafer est ensuite à nouveau rincé et séché par un flux d'azote.

Bien que propre, notre wafer ne peut être utilisé directement après l'attaque HF car sa surface est hydrophobe et doit être ré-oxydée pour assurer une bonne mouillabilité lors du dépôt de résine puisque celle-ci est fortement polaire. Le wafer est donc à nouveau placé dans un bain piranha pendant 2 minutes puis rincé et séché. Pour favoriser l'accroche de la résine, on applique au wafer un traitement par plasma oxygène pendant 15 min à 800 W permettant le greffage d'oxygène à sa surface. Les oxygènes ainsi greffés permettront par la suite des pontages avec les fonctions époxydes de la résine lors de sa réticulation.

Après toutes ces étapes, notre wafer est prêt pour l'enduction de la résine.

Etape 2 : Enduction de SU-8 et pré-cuisson

Pour réaliser des membranes de 25 μm d'épaisseur suspendues à 75 μm du substrat, il nous faut déposer un film de SU-8 de 100 μm d'épaisseur. Nous utiliserons le procédé d'enduction par spin-coating préconisé par le fournisseur de la résine SU-8 (Microchem). Ce procédé utilise la force centrifuge pour étaler la résine sur toute la surface du wafer et amincir ce film en éjectant le surplus pour obtenir l'épaisseur désirée. Nous utilisons la résine SU-8 3050, de viscosité élevée (75,5% de monomère en masse soit une viscosité de 12000 mm^2/s), permettant d'obtenir des épaisseurs de dépôt 50 à 100 μm avec une bonne uniformité. Le procédé d'enduction pour un film de 100 μm est le suivant :

- 10mL de résine sont disposés au centre du wafer à l'aide d'une seringue.
- La wafer subit une première centrifugation à 500 tr/min pendant 30s avec une accélération de 500 tr/min/s pour étaler la résine sur toute la surface.
- Le wafer subit ensuite une seconde centrifugation à 1450 tr/min pendant 30s avec une accélération de 5000 tr/min/s pour éjecter la résine en excès et obtenir une épaisseur de 100 μm .

Pour terminer le dépôt de résine, le wafer doit ensuite subir une étape de pré-cuisson au cours de laquelle le solvant sera éliminé par évaporation. On place alors le wafer sur une plaque chauffante imposant alors le cycle thermique représenté sur la Figure 57 :

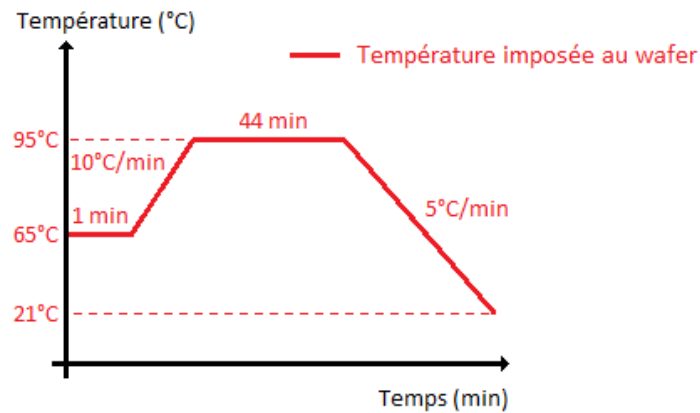


Figure 57. Cycle thermique de pré-cuisson de la résine SU-8

Nos monomères SU-8 ainsi que le photo-générateur d'acide sont maintenant fixés sur la plaquette et sont prêts pour les étapes de photolithographie.

Etape 3 : Photolithographie de double insolation

La résine non insolée doit maintenant subir l'étape de double insolation que nous avons décrite au paragraphe précédent, en ajustant les paramètres pour obtenir une membrane de 25 μm d'épaisseur.

- *Première insolation : réalisation des piliers de support*

La première insolation consiste en une irradiation de toute l'épaisseur de SU-8 pour réaliser les piliers qui viendront supporter la membrane. Elle est réalisée en plaçant le masque n°1 présentant les motifs des piliers (voir Figure 58) juste au dessus du wafer.

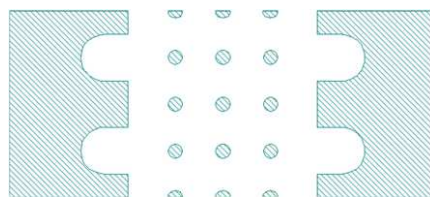


Figure 58. Masque n°1 - Motifs de photolithographie des piliers de support de la membrane

Nous utiliserons un masque en verre où les zones qui devront masquer la lumière sont recouvertes d'un film en chrome. Le verre utilisé pour fabriquer le masque (sodocalcique ou soda-lime en anglais) laisse passer des UV de $\lambda > 350 \text{ nm}$ comme représenté dans la Figure 59. L'appareil utilisé pour réaliser l'insolation (Karl Süss MA 6) dispose d'une lampe à vapeur de mercure irradiant de $\lambda = 300 \text{ à } 405 \text{ nm}$. Pour insoler toute l'épaisseur de SU-8, la dose d'irradiation doit être de 365 mJ/cm^2 ce qui correspond à une durée d'insolation de 24s.

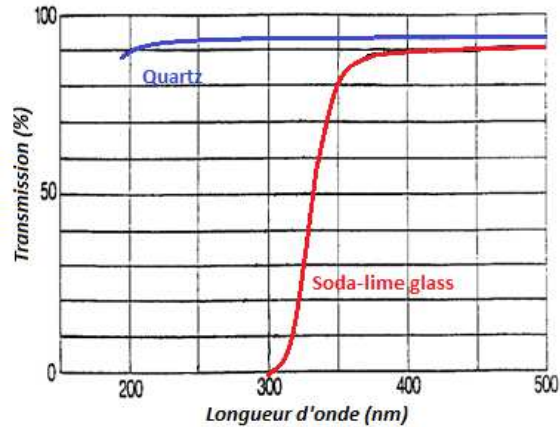


Figure 59. Transmission du signal lumineux en fonction de la longueur d'onde pour le verre sodocalcique et le quartz

- *Réticulation des mires d'alignement*

Pour superposer précisément les motifs du masque n°2 sur le masque n°1, des mires d'alignement sont présentes sur chaque niveau de masquage (voir Figure 60). Préalablement à la seconde insolation, le wafer est donc placé sur une plaque chauffante à 50°C pendant 10s ce qui permet d'amorcer la réticulation de la résine faisant ainsi apparaître ces mires.

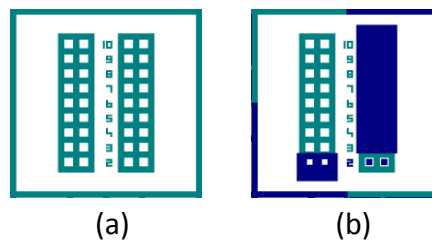


Figure 60. Mires d'alignement (a) Masque n°1 (b) Superposition Masques n°1 et n°2

- *Seconde insolation : réalisation de la membrane*

La seconde insolation consiste en une irradiation de surface, permettant la réalisation de la membrane. Elle est réalisée avec le masque n°2 présentant les motifs de la membrane (voir Figure 61) alignés sur les motifs du masque précédent.



Figure 61. Masque n°2 - Motifs de photolithographie de la membrane SU-8

Nous utiliserons cette fois un masque en quartz puisqu'il est transparent dans tout le domaine UV (voir Figure 59). Un filtre optique placé entre la lampe à vapeur de mercure et le masque permet de ne sélectionner que des UV de $\lambda = 280$ à 320nm . La durée d'insolation et donc la dose reçue détermine l'épaisseur de la membrane. Différentes doses ont été testées pour obtenir la courbe d'étalonnage représentée dans la Figure 62. Pour obtenir des

membranes de 25µm d'épaisseur, la dose d'insolation doit être de 6mJ/cm², correspondant à une durée d'insolation de 20s.

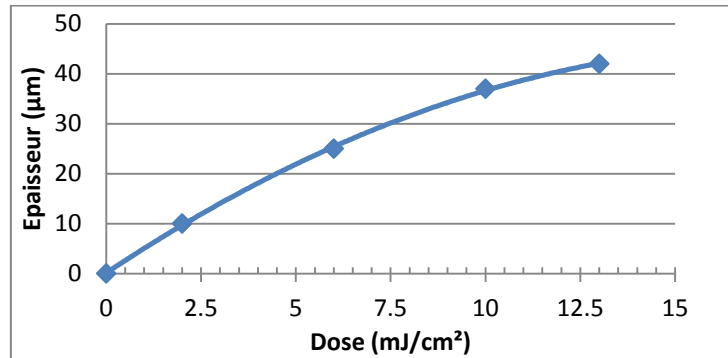


Figure 62. Épaisseur de membrane en fonction de la dose d'insolation

Une fois insolé, le wafer doit subir les étapes de cuisson « post exposure bake » (noté PEB) permettant la réticulation des zones insolées, puis la révélation permettant d'éliminer la SU-8 non réticulée pour libérer la membrane du substrat.

Etape 4 : Post Exposure Bake

L'étape de PEB permet d'apporter l'énergie nécessaire à la réticulation de la résine. Le PEB est réalisé en plaçant le wafer sur une plaque chauffante dont le cycle de cuisson est représenté sur la Figure 63 :

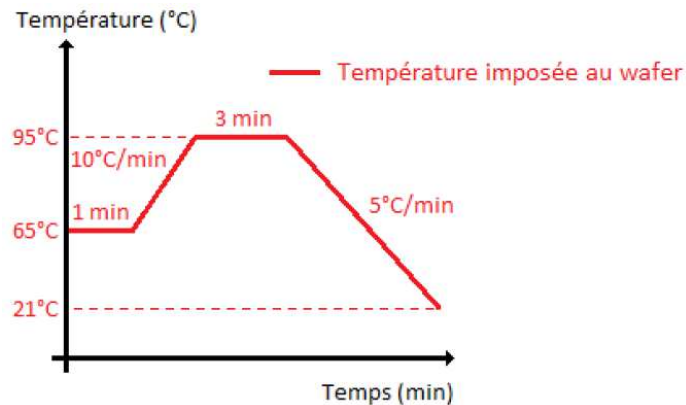


Figure 63. Cycle thermique de PEB

Une fois cette étape de PEB réalisée, la SU-8 qui a été insolée est maintenant polymérisée. Il nous faut éliminer les zones de résine non insolée pour libérer la membrane du substrat.

Etape 5 : Développement

L'étape de développement permet d'éliminer la résine dans les zones non insolées. Elle est réalisée en plaçant le wafer dans un bain de PGMEA (Propylène Glycol Monométhyl Ether Acétate) qui viendra solvater les monomères sous la membrane sans affecter les zones réticulées. La durée de révélation est de 12h environ pour permettre au solvant de développer les zones sous la membrane. Le wafer est ensuite rincé à l'isopropanol puis à l'eau dé-ionisée, puis séché par un flux d'azote.

Résumé :

Les différentes étapes du procédé de fabrication sont résumées dans la Figure 64. Résumé du procédé de fabrication de membranes en SU-8 :

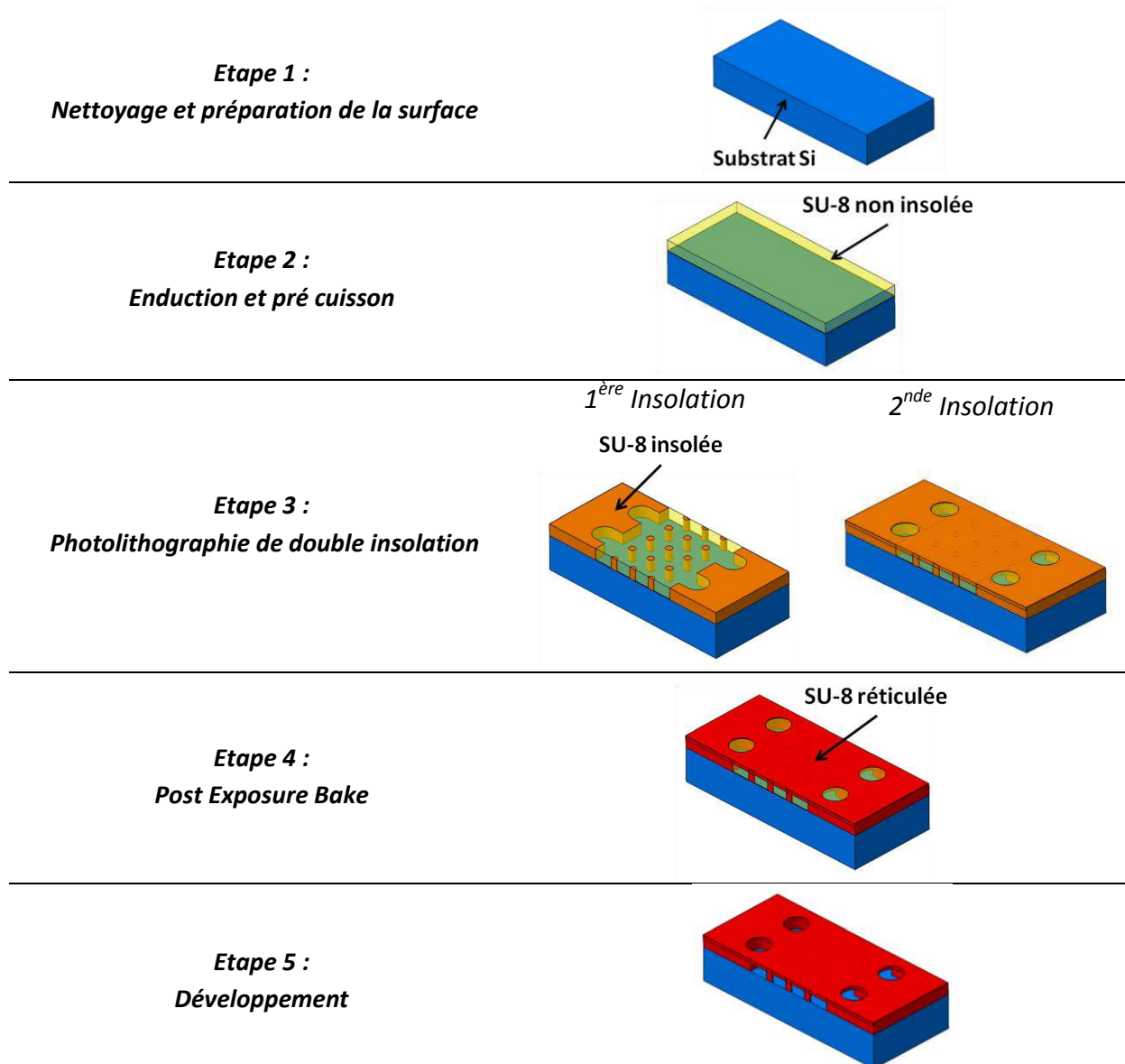


Figure 64. Résumé du procédé de fabrication de membranes en SU-8

4.1.3. Optimisation de la structure sur membrane

Le procédé que nous avons mis au point nous permet de réaliser des structures de membranes suspendues. Toutefois, un certain nombre de contraintes inhérentes à l'utilisation de résine SU-8 doivent être prises en compte pour déterminer la géométrie optimale de la structure. En effet, la SU-8 présente un coefficient de dilatation thermique (54 ppm/K) beaucoup plus élevé que celui du silicium (2,6 ppm/K), à l'origine de contraintes thermomécaniques dans les structures. Pour éviter que la membrane se déforme trop sous l'effet de ces contraintes, et pour tenir les environnements thermiques et mécaniques (cf cahier des charges), nous avons choisi de soutenir la membrane par des piliers. Nous avons

alors réalisé des membranes de différentes géométries afin de déterminer la structure la plus stable et plane. Un exemple de structures testées est représenté dans la Figure 65 :

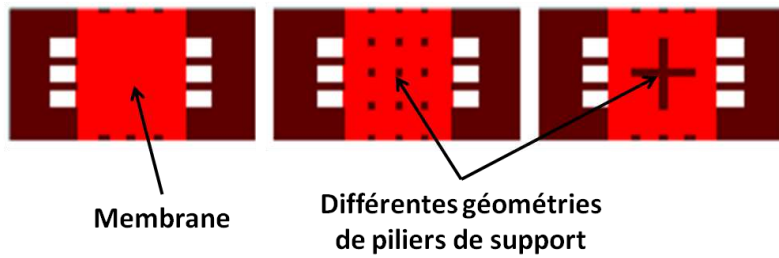


Figure 65. Exemples des différentes structures de membranes réalisées

Pour mesurer la déformation des structures, nous avons réalisé des mesures de profilométrie interférentielle. Cette technique permet d'obtenir une cartographie des déformations de la surface de la puce. Les cartographies obtenues pour les 3 structures présentées précédemment sont données en Figure 66.

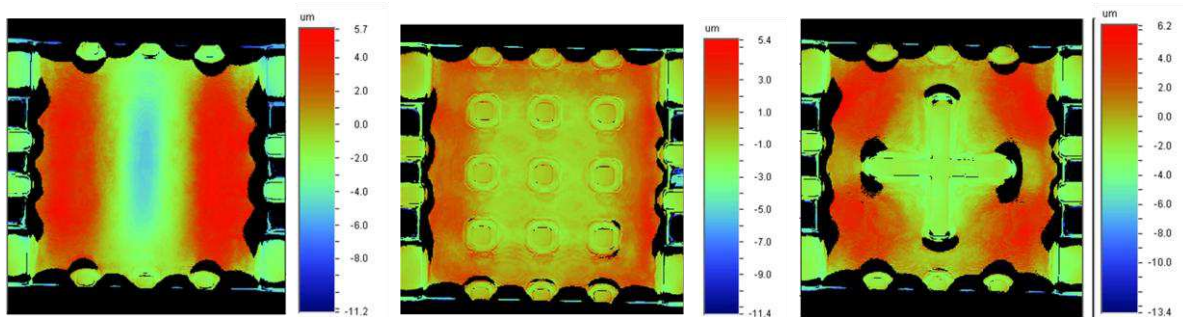


Figure 66. Exemples de cartographies des déformations pour différentes structures de membranes

A l'issue de ces mesures, nous avons choisi la structure reposant sur 9 piliers de $120\mu\text{m}$ de diamètre disposées avec un pas de $400\mu\text{m}$, car cette configuration présente la plus faible déformation ($\text{max} = +5\mu\text{m}$) et la répartition la plus homogène. Une image MEB de cette structure représentée en Figure 67 confirme ces mesures :

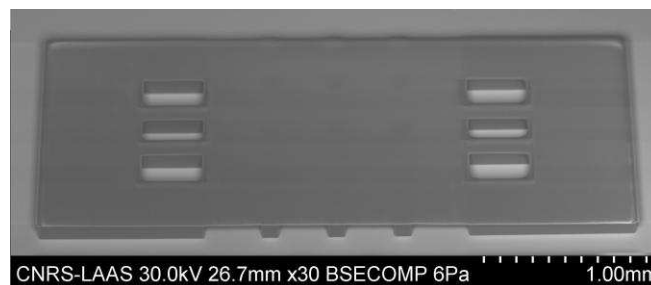


Figure 67. Observation MEB d'une structure de membrane suspendue sur 9 piliers

4.1.4. Obtention d'une surface plane – laminage d'un film polymère

Pour réaliser les étapes suivantes du procédé de fabrication des puces, il nous faut travailler sur un wafer de surface plane puisque ces étapes nécessitent des enductions de résine par spin-coating, incompatibles avec une surface accidentée. Nous avons donc choisi de laminer un film polymère qui viendra recouvrir l'ensemble des membranes pour obtenir une surface comparable à celle d'un wafer vierge (voir Figure 68). Deux matériaux sont disponibles pour réaliser ce laminage : la SU-8 en film sec et le film PET autocollant.

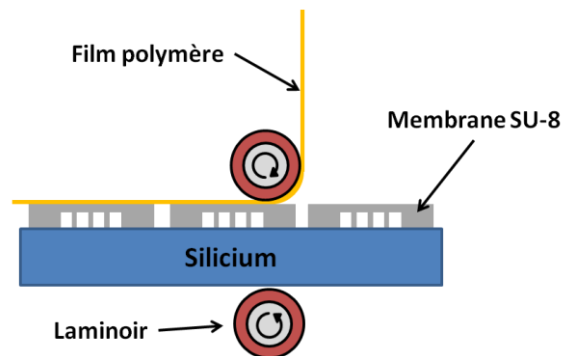


Figure 68. Laminage d'un film polymère pour obtenir une surface de wafer plane

▪ Report de film sec en SU-8 non réticulée :

Les films secs en SU-8 présentent l'avantage d'être paramétrables en épaisseur, de 10 μ m à 100 μ m, mais la technologie de réalisation est complexe. Le report de film sec en SU-8 non réticulée est réalisé de la manière suivante :

- L'épaisseur voulue de SU-8 est déposée par spin-coating sur un support polymère de faible adhérence (release liner) et transparent dans le domaine UV.
- Ce film subit une pré-cuisson permettant l'évaporation du solvant. La durée de pré-cuisson est volontairement exagérée pour permettre d'obtenir un film très sec.
- On lamine ensuite ce film coté SU-8 vers les membranes en appliquant une pression de 4 Bars et une température de 65°C. La vitesse de laminage est de 1m/min.
- L'ensemble est insolé sur toute sa surface au travers du release liner puis recuit pour permettre la réticulation de la résine.
- Le release liner est enfin décollé par pelage.

Nous avons utilisé cette technique et réalisé le laminage d'un film de 25 μ m de SU-8 sur nos membranes. Des mesures de profilométrie mécanique ont montrés que la surface obtenue après laminage est plane et donc compatible avec les étapes de spin-coating nécessaire dans la suite du procédé de fabrication des puces.

▪ **Report de film PET autocollant :**

Les films de PET autocollants sont simples d'utilisation car il suffit de les laminier à froid sur les membranes pour obtenir une surface plane. Aucune étape d'insolation ni de cuisson n'est nécessaire. L'inconvénient de cette technologie vient de l'épaisseur du film qui n'est pas paramétrable et dépend du fournisseur. Le LAAS dispose de film "Adhesive Research ARClear DEV-8796" de 100 μ m d'épaisseur (film PET de 75 μ m + 25 μ m de colle).

Nous avons aussi réalisé des structures en laminant ce type de films sur nos membranes. Tout comme précédemment, les mesures de profilométrie mécanique ont montré que la surface obtenue est plane et donc compatible avec les étapes suivantes du procédé de fabrication des puces.

4.2. Réalisation du filament et des plots de contact en or

Nous avons réalisé des structures sur membranes dont la surface est maintenant plane, et compatible avec les technologies permettant la mise en œuvre du filament et des plots de contacts en or.

Dans notre conception, nous avons choisi de réaliser le filament et les plots de contacts par pulvérisation cathodique, mis en forme par photolithographie. Nous avons choisi d'utiliser la technique du « lift-off », permettant la mise en forme de dépôts métalliques par dissolution d'une couche sacrificielle en résine polymère. Le procédé de réalisation est le suivant :

Etape 1 : Enduction de résine NLOF et pré-recuit

La première étape consiste au dépôt de 5 μ m de résine AZ NLOF 2035 qui servira par la suite de couche sacrificielle. Le dépôt est réalisé par spin-coating dans les conditions suivantes :

- 3mL de résine sont disposés au centre du wafer à l'aide d'une seringue
- Le wafer subit une centrifugation à 1350 tr/min pendant 60s avec une accélération à 5000 tr/min/s pendant laquelle le film est étalé puis aminci pour obtenir une épaisseur de 5 μ m.

Le wafer subit ensuite une pré-cuisson à 110°C pendant 120s permettant l'évaporation du solvant.

Etape 2 : Photolithographie

La résine doit maintenant subir une insolation avec des UV de $\lambda = 365$ nm pendant 6s, au travers d'un masque présentant les motifs du filament (masque n°3) ou des plots de contacts (masque n°4). Les masques utilisés sont alignés sur les motifs des membranes grâce aux mires d'alignement, comme représenté en Figure 69.

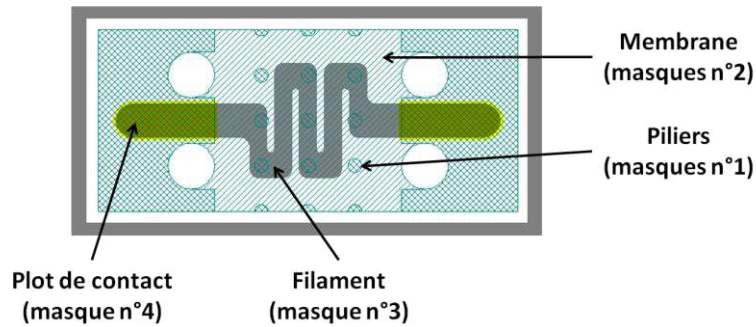


Figure 69. Masques de photolithographie permettant la réalisation du filament et des plots de contact

Etape 3 : Post Exposure Bake et révélation

La réticulation des zones insolées est réalisée en effectuant un PEB à 110°C pendant 120s. Les zones non insolées sont ensuite éliminées en plaçant le wafer dans un bain de solution commercial « MF CD 26 » pendant 150s. Ce temps de révélation est volontairement plus long que recommandé par le fabricant pour obtenir des flancs rentrant au niveau des motifs comme représenté dans la Figure 70, ce qui permettra par la suite une élimination plus simple de la couche sacrificielle.

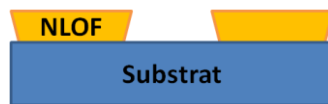


Figure 70. Sur-révélation de la NLOF permettant d'obtenir des flancs rentrants

Etape 4 : Métallisation par pulvérisation cathodique

Notre couche sacrificielle est maintenant déposée et mise en forme par photolithographie. Il nous faut maintenant déposer le métal qui constituera le filament ou les plots de contact par pulvérisation cathodique. Il s'agit d'un procédé de PVD assisté par plasma dans lequel les ions du plasma viennent bombarder une cible métallique (cathode) sous l'effet d'un champ électrique. La quantité de mouvement des ions du plasma est alors communiquée aux atomes de la cible et provoque leur éjection. Une fois éjectés, ces atomes viennent ensuite se condenser à la surface du substrat (anode) comme représenté en Figure 71.

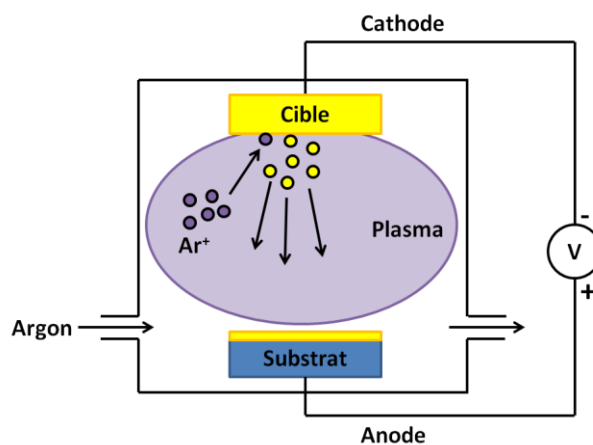


Figure 71. Principe de la pulvérisation cathodique

L'enceinte de dépôt disponible au LAAS (Univex 450C) utilise des cibles « magnétron » qui permettent de piéger les électrons du plasma à proximité des cibles, à l'origine d'un meilleur rendement. Le gaz utilisé pour générer le plasma est l'argon car il est chimiquement inerte vis-à-vis des cibles et aussi du wafer. Pour accélérer les ions du plasma vers la cible, nous appliquons une tension continue entre les deux électrodes, on parle alors de « DC sputtering ». Une cible en titane pur à 99,999% est utilisée pour la réalisation du filament, et une en or de pureté identique pour les plots de contact. 300nm de titane sont déposés pour réaliser le filament et 200 nm d'or pour les plots de contact.

Une fois la métallisation réalisée, nous obtenons alors les structures représentées dans la Figure 72. Comme nous avons réalisé des motifs de NLOF avec des flancs rentrants, la métallisation ne concerne que la surface de la couche sacrificielle et n'affecte pas les côtés des motifs.

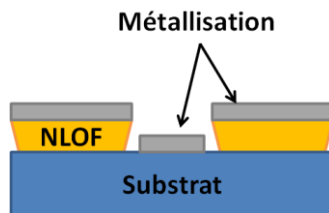


Figure 72. Métallisation du substrat et de la couche sacrificielle

Etape 5 : Attaque de la couche sacrificielle – Lift off

La dernière étape du procédé de fabrication du filament ou des plots de contacts consiste à éliminer la couche sacrificielle pour mettre en forme le métal précédemment déposé. Pour cela, le wafer est placé dans un bain d'acétone qui va faire gonfler puis dissoudre la NLOF réticulée en emportant le métal déposé sur cette couche sacrificielle. C'est la technique du lift-off (voir Figure 73). On voit ici l'intérêt de disposer de flancs rentrant au niveau de la couche sacrificielle, puisque cela rend la NLOF accessible pour l'acétone, ce qui n'aurait pas été le cas si les flancs des motifs avaient été recouverts de métal.

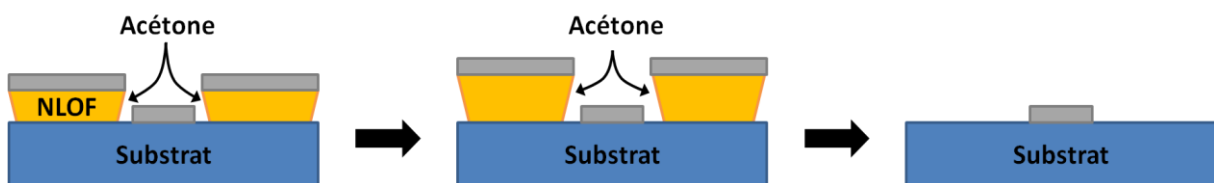


Figure 73. Mise en forme de la couche métallique par la technique du lift-off

A l'issue de cette étape, le wafer est rincé à l'eau dé-ionisée puis séché par un flux d'azote. Nos puces sont alors prêtes pour l'étape suivante qui consiste à déposer la thermite sur le filament.

En résumé :

Le résumé du procédé de réalisation du filament est représenté en Figure 74.

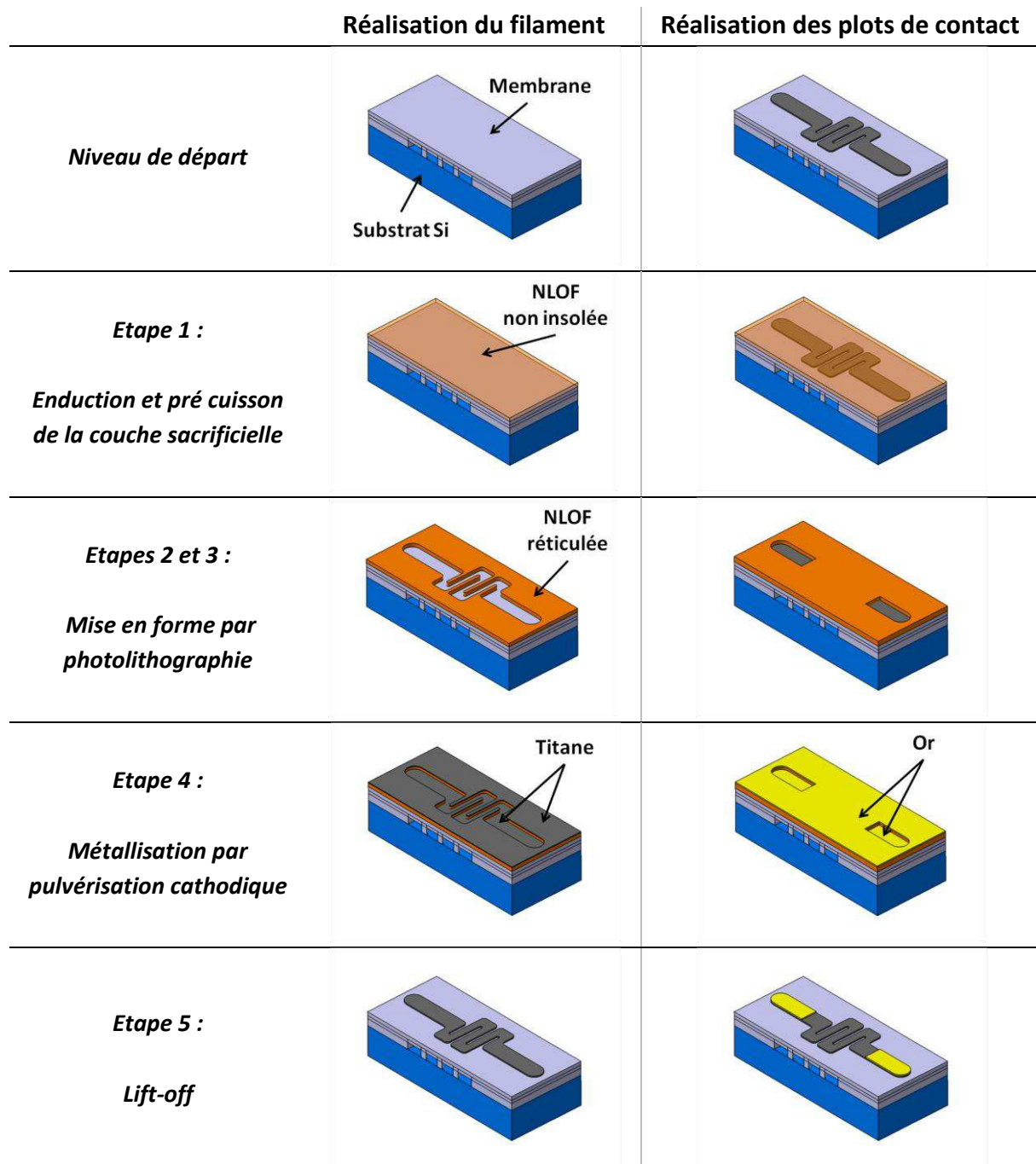


Figure 74. Résumé du procédé de fabrication du filament et des plots de contacts

4.3. Dépôt et mise en forme de la thermitite

Pour terminer la fabrication des puces, nous devons déposer la nano-thermitite Al/CuO multi-couches sur le filament. Le procédé de dépôt de thermitites multi-couches a fait l'objet d'une thèse [8] et consiste à déposer successivement des couches d'oxyde de cuivre (II) et d'aluminium par pulvérisation cathodique réactive. Ce dépôt est ensuite mis en forme par la même technique de lift-off que celle utilisée pour le filament et les plots de contact.

- **Le dépôt d'Oxyde de Cuivre (II) :**

Le dépôt de CuO est réalisé par pulvérisation cathodique réactive à partir d'une cible en cuivre. Le procédé de pulvérisation cathodique réactive diffère de celui présenté précédemment puisque le plasma utilisé n'est pas chimiquement inerte mais réactif, conduisant à une modification chimique des espèces déposées. Dans notre cas, nous utilisons un plasma Argon-Oxygène pour pulvériser une cible en Cuivre pure à 99,999% pour réaliser un dépôt de CuO. La pression partielle d'oxygène dans le plasma d'argon a été réglée à 0,13 Pa pour n'obtenir que l'oxyde de cuivre (II), puisqu'il existe différents degrés d'oxydation possible pour le cuivre [59]. La nature de l'oxyde est contrôlée par diffraction des rayons X (XRD) puisque les différents oxydes du cuivre n'ont pas la même structure cristallographique.

- **Le dépôt d'Aluminium :**

Le dépôt d'aluminium est lui réalisé par pulvérisation cathodique classique d'une cible en aluminium pur à 99,999% à l'aide d'un plasma d'argon.

- **Empilement des couches :**

Pour permettre l'empilement des couches, les deux cibles (Aluminium et Cuivre) se trouvent dans la même chambre de dépôt et sont alimentées alternativement. Pour éviter de pulvériser les deux cibles en même temps, les cibles sont alternativement masquées par un écran en acier inoxydable (voir Figure 75). Entre chaque dépôt de couche, le gaz présent dans la chambre est pompé, évitant ainsi l'oxydation de l'aluminium par l'oxygène présent dans la chambre lors du dépôt de CuO.

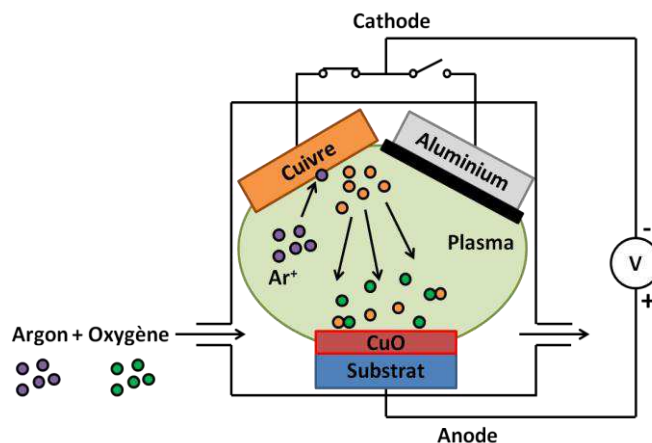


Figure 75. Dépôt de thermitite par pulvérisation cathodique réactive

La nano-thermite multicouche que nous déposons sur le filament est constituée de 30 couches alternatives d'oxyde de cuivre et d'aluminium, avec des épaisseurs de 200 nm et 100 nm respectivement. Après lift-off, nous obtenons les structures finales des puces sur membranes, représentées en Figure 76.

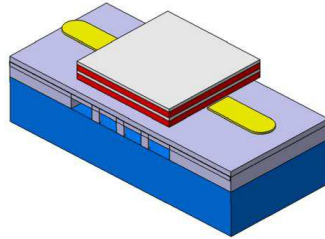


Figure 76. Puces de conversion électro-pyrotechniques sur membrane

4.4. Découpage du wafer en puces individuelles

Les procédés utilisés pour fabriquer les puces sont collectifs, permettant de réaliser environ 1000 puces sur un wafer 4 pouces (voir Figure 77).

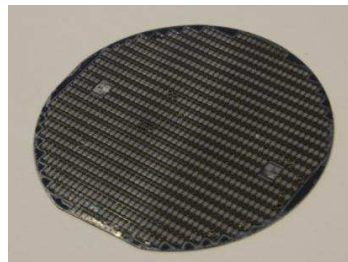


Figure 77. Photo d'un wafer présentant 974 puces de conversion électro-pyrotechnique

Pour obtenir des puces individuelles, le wafer est découpé à l'aide d'une scie diamantée (DAD 321). Il est d'abord collé sur un film autocollant souple qui va permettre de positionner le wafer sur le support de découpe et assurer le maintien des puces une fois découpé. La scie vient ensuite discrétiser les composants en suivant les chemins de découpe. La lame choisie fait 250 μ m d'épaisseur, sa vitesse de rotation est de 30000 tr/min et sa vitesse de déplacement est de l'ordre de 1 mm/s. Pour éviter l'échauffement des composants et de la lame, la scie est constamment arrosée d'eau dé-ionisée. Une fois la découpe terminée, on obtient des puces individuelles prêtes à l'usage. Une image MEB d'une puce après découpe est représentée en Figure 78.

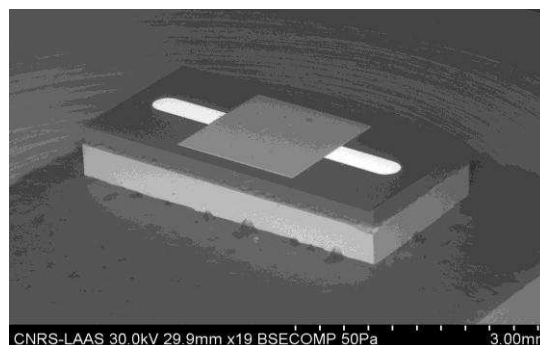


Figure 78. Image MEB d'une puce de conversion électro-pyrotechnique discrétisée

5. Fabrication des puces de conversion électro-pyrotechnique sur substrat Pyrex

Comme nous l'avons précisé dans le chapitre 2, parallèlement à la réalisation des puces de conversion électro-pyrotechniques sur membranes, nous fabriquons aussi des puces sur substrat Pyrex afin de comparer les comportements thermiques mais aussi les caractéristiques d'initiation de la nano-thermite. Pour la fabrication de ces puces sur Pyrex, nous utilisons les mêmes procédés et que ceux utilisés dans le paragraphe précédent, à l'exception de ceux permettant de réaliser la membrane en SU-8. On obtient alors les structures représentées dans la Figure 79.

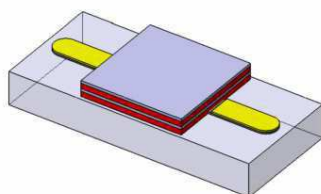


Figure 79. Puces de conversion électro-pyrotechniques sur substrat Pyrex

6. Fabrication et assemblage du système d'armement mécanique

Dans les étapes précédentes, nous avons réalisé des puces de conversion électro-pyrotechniques aussi bien sur membranes que sur Pyrex. Comme décrit dans notre chapitre de conception, ces puces doivent maintenant être reportées et soudées sur la plateforme PCB porte puce. Cette plateforme doit ensuite être collée sur l'axe du moteur puis connectée à l'électronique de commande pour permettre son alimentation électrique et détecter sa position. Les paragraphes qui suivent détaillent ces étapes d'assemblage.

6.1. Report des puces sur la plateforme PCB porte puce

Lors de notre conception, nous avons choisi de reporter les puces sur une plateforme PCB, permettant de réaliser l'armement mécanique par rotation de cette plateforme autour de son axe central. La disposition des pistes et des vias métallisés permet de connecter les puces dans les positions Armée et Sécurisée et de connaître la position de la barrière. Ce circuit imprimé a été conçu au LAAS et sa fabrication sous traitée. Il est représenté en Figure 80.

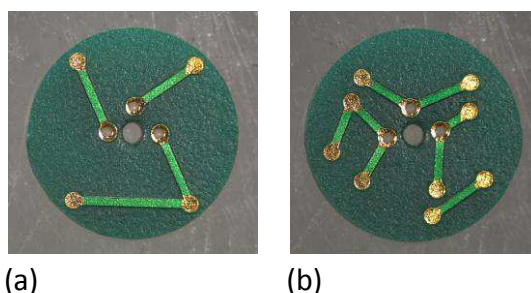


Figure 80. Photos de la plateforme PCB porte puce (a) face avant (b) face arrière

Il nous faut maintenant reporter et connecter les puces individuelles sur la face avant de cette plateforme.

Pour réaliser le report, les plateformes porte-puces sont d'abord collées sur le support d'un micro positionneur à l'aide de scotch double face. A chaque emplacement prévu pour les puces, une goutte de colle de type époxyde est dispensée à l'aide d'une seringue. Les puces à reporter sont ensuite posées précisément sur leur emplacement grâce au micro positionneur. L'ensemble subit ensuite une cuisson à 80°C pendant 2h permettant la réticulation de la colle. Après cette étape, nos puces sont solidaires du PCB et doivent être connectées électriquement à la plateforme.

La connexion des puces au PCB est réalisée par wire-bonding. Pour cela, un fil d'or de 25µm de diamètre est extrudé dans un capillaire et une décharge électrique est réalisée en son extrémité pour former une bille. Cette bille est ensuite appliquée sur le plot de contact présent sur la puce puis on applique des ultrasons permettant l'inter-diffusion des métaux et donc la soudure entre le fil et le contact. On déplace ensuite le capillaire jusqu'au plot de contact présent sur le PCB et on vient réaliser la soudure à nouveau à l'aide d'ultrasons en appliquant une pression de haut en bas (voir Figure 81).

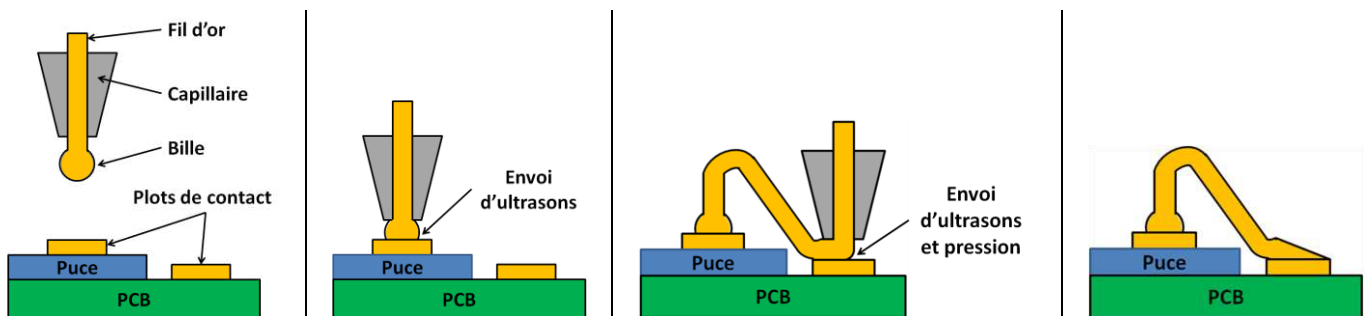


Figure 81. Soudure des puces sur PCB par wire-bonding

Pour des raisons de fiabilité, deux bondings sont effectués pour chaque plot de contact. Enfin, pour protéger les fils de câblage, les soldures sont noyées dans une goutte de silicone. Les puces reportées et soudées sur la plateforme PCB sont représentées en Figure 82.

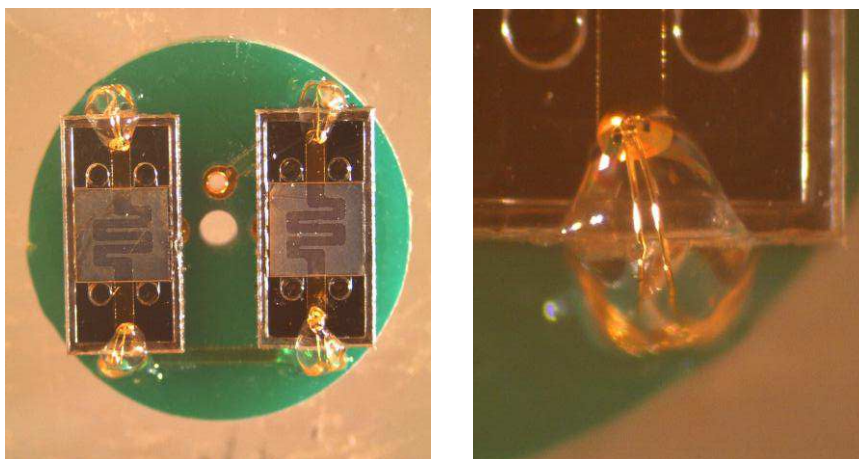


Figure 82. Puces reportées et soudées par wire-bonding sur la plateforme PCB

6.2. Assemblage de la plateforme d'armement sur l'axe du moteur

Notre plateforme PCB porte puce est prête et doit être assemblée avec le moteur d'armement mécanique. Nous avons choisi un moteur brushless Faulhaber de 2mm de diamètre. Ce moteur est représenté dans la Figure 83.

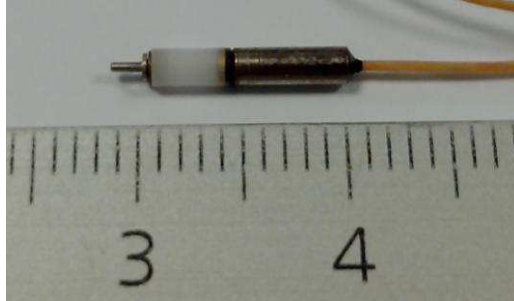


Figure 83. Moteur brushless d'armement mécanique

L'assemblage de la plateforme PCB porte puce sur l'axe du moteur est une étape délicate au vue des faibles dimensions des éléments à assembler. De plus, le trou présent au centre de la plateforme PCB et l'axe du moteur sont tous deux cylindriques, ce qui ne permet pas un accouplement efficace. Nous avons dans un premier temps essayé d'assembler la plateforme sur l'axe par soudure, mais la faible mouillabilité de l'acier constituant l'axe n'a pas permis d'assurer une bonne tenue mécanique, même après traitement de l'axe par l'acide ortho-phosphorique diluée. Nous avons alors opté pour un assemblage par collage. Nous avons choisi une colle époxy réticulant après exposition aux UV. Cette solution permet d'éviter la réticulation de la colle si jamais elle devait fluer dans les roulements du moteur, la colle étant assez peu visqueuse. L'assemblage ainsi obtenu est représenté en Figure 84.

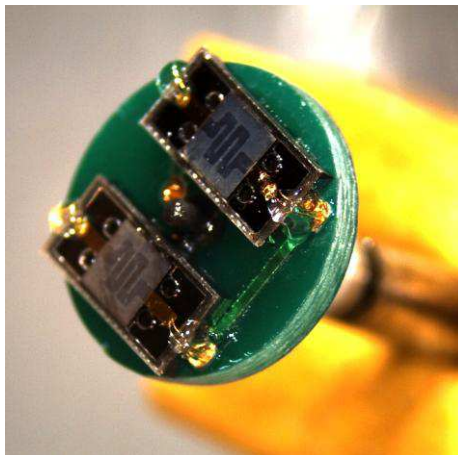


Figure 84. Plateforme PCB porte puce collée sur l'axe du moteur

6.3. Réalisation des interconnexions entre le corps mécanique de l'IFI et le système d'armement mécanique

La dernière étape d'assemblage nécessaire à la réalisation du système d'armement mécanique consiste à faire remonter la connexion électrique depuis l'électronique de commande vers la plateforme porte puce. Dans notre conception, nous avons choisi

d'utiliser des connecteurs à ressorts qui viendront s'appuyer sur la face arrière de la plateforme PCB pour l'alimentation électrique des puces et pour repérer la position du moteur, et des connecteurs de types tulipes pour venir se brancher sur le corps réalisant l'interface mécanique et électrique de l'IFI. Ces connecteurs à ressorts et tulipes sont encapsulés dans des blocs en polymère mis en forme par injection moulage.

6.3.1. Réalisation des blocs intégrant les connecteurs

Pour la réalisation du démonstrateur de thèse, l'utilisation de la technologie d'injection-moulage n'a pas été retenue car trop chère et peu souple, puisque chaque changement de design implique la re-fabrication des moules. Nous avons donc choisi de réaliser ces blocs polymères par usinage, même si cette technologie implique des difficultés en termes de tolérances et de géométries réalisables.

▪ Bloc de contacts à ressorts :

Le bloc contenant les contacts à ressort a ainsi été réalisé en deux morceaux qui seront finement assemblés par collage. Les contacts à ressort sont alors encastrés entre ces deux blocs pour assurer leur encapsulation. Des photos représentant les contacts à ressort puis leur assemblage sont données dans la Figure 85.



Figure 85. (a) Contact à ressort (b) Assemblage des contacts dans la première moitié du bloc polymère (c) Assemblage collé

▪ Bloc moteur à tulipes :

Le bloc intégrant les tulipes pour l'interconnexion avec le corps mécanique de l'IFI a été mis en forme par usinage et les tulipes y sont insérées en force. Les deux types de tulipes utilisées et leur assemblage dans le bloc sont représentés dans la Figure 86



Figure 86. Tulipes assemblées dans le bloc moteur en polymère

6.3.2. Intégration du moteur d'armement mécanique dans les blocs

Pour permettre le blocage en rotation du moteur et assurer son pilotage par l'électronique de commande, le moteur doit être collé dans le « bloc moteur » décrit précédemment, et les fils d'alimentation soudés sur l'extrémité des tulipes. Cette étape est particulièrement délicate à réaliser car les fils d'alimentation de chacune des bobines du moteur ne sont pas accessibles individuellement. En effet, ces fils d'alimentation se trouvent sous la forme d'un câble coaxial torsadé se terminant par un connecteur comme représenté dans la Figure 87.

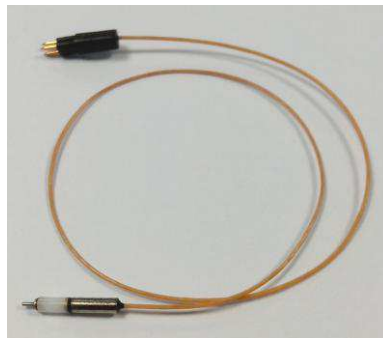


Figure 87. Connectique du moteur d'armement mécanique

Nous avons donc cherché à réaliser cette connexion en coupant le câble d'alimentation coaxial à sa base puis de reporter la connexion depuis l'extrémité des fils vers les tulipes par wire-bonding. Cette solution n'a, pour l'heure, pas permis de réaliser un assemblage correct. En effet, en dénudant le câble d'alimentation du moteur, nous n'avons pu identifier les 3 phases puisque le câble contient 15 fils différents (voir Figure 88) dont 1 bleu, 1 rouge et 13 cuivrés.



Figure 88. Câble d'alimentation du moteur dénudé

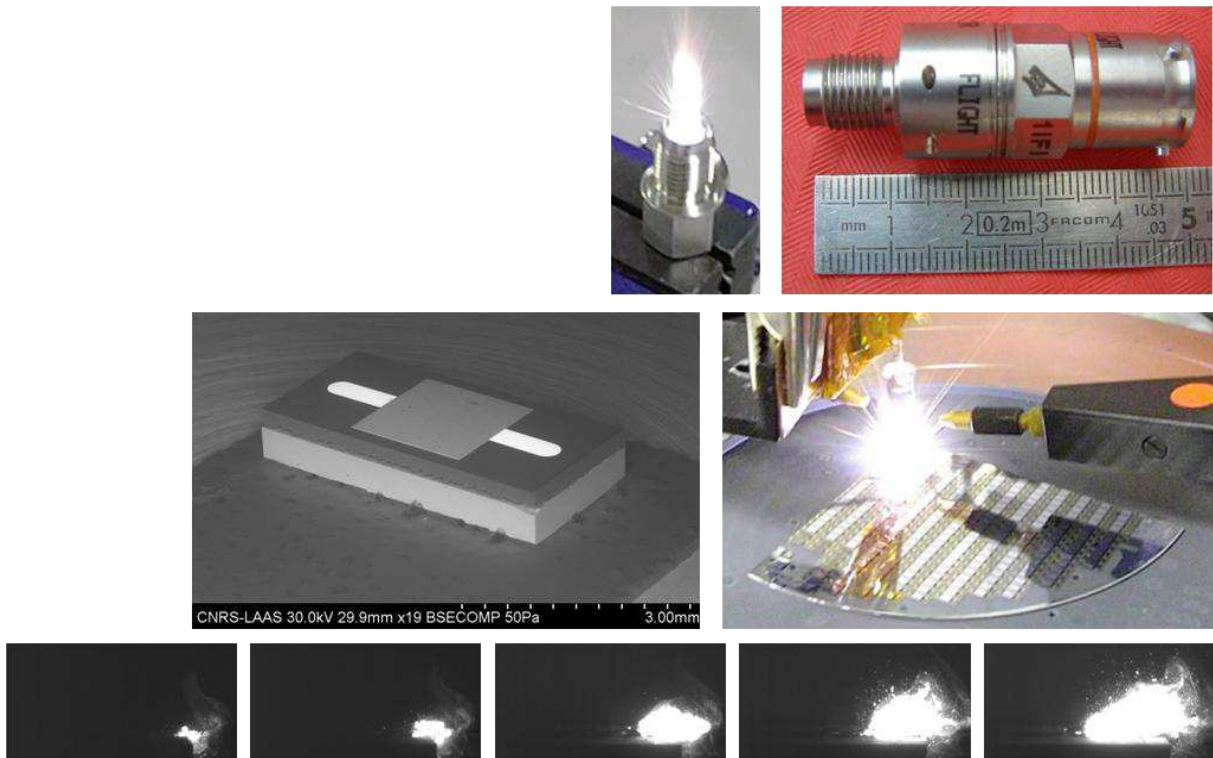
Une solution technologique proposée pour résoudre ce problème consiste à intégrer les contacts à ressorts et à tulipes ainsi que le moteur dans le même bloc, le report de la connexion entre le moteur et les tulipes étant réalisé à la fabrication. Cette proposition est actuellement en cours d'étude auprès de la société Faulhaber, fournisseur du moteur brushless utilisé.

En raison de ces difficultés d'assemblage, nous ne pourrions pas valider la fonction armement mécanique de l'IFI dans notre chapitre de caractérisation. Toutefois la présence d'un simulateur de BSA intégrant le même système d'armement à l'échelle macro sur la carte du démonstrateur de l'électronique nous permettra au minimum de valider le mode de pilotage du moteur et la lecture de la position par l'électronique de commande.

7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé les procédés de fabrications utilisés pour réaliser les différents éléments constitutifs de l'IFI. La fabrication du corps d'interface mécanique et électrique utilise les procédés d'usinages classiques puis un scellement des contacts électriques dans des perles de verres. Pour valider nos choix technologiques concernant l'électronique de commande et de contrôle de l'IFI, nous avons choisi de réaliser une carte électronique intégrant les différents composants en technologie CMS. Ce choix nous permet d'optimiser les technologies utilisées avant la réalisation de cette électronique en technologie « system on chip ». La fabrication des puces de conversion électro-pyrotechniques sur membrane a fait l'objet d'une mise au point technologique approfondie, en particulier concernant la mise au point de structures suspendues en résine SU-8. Les puces ainsi réalisées ont été discrétisées puis assemblées sur la plateforme PCB porte-puce. Enfin, les étapes d'assemblage permettant les interconnexions du système d'armement mécanique se sont révélées extrêmement délicates en raison des faibles dimensionnalités et de la nécessité de connecter des composants sur étagère dont les connectiques ne sont pas adaptées aux microsystèmes.

Le prochain chapitre traitera des caractérisations effectuées sur les composants ainsi réalisés pour valider leur fonctionnement conformément au cahier des charges.



Chapitre 4

Caractérisations de l'Initiateur à Fonctions Intégrées

1. Introduction

Le chapitre précédent a été consacré à la fabrication des différentes briques constitutives de l'IFI. Nous avons pu procéder à la fabrication du corps d'interface mécanique et électrique et d'un simulateur de l'électronique de commande. Nous avons mis au point et exploité les procédés de micro-technologie pour réaliser des puces de conversion électro-pyrotechnique à la fois sur Pyrex et sur membrane SU-8. Ce chapitre est dédié aux caractérisations et validations expérimentales du démonstrateur de thèse.

Nous commencerons par caractériser le corps d'interface mécanique de l'IFI, en particulier concernant sa tenue mécanique et son étanchéité. Nous validerons ensuite la capacité de l'électronique de commande de l'IFI à communiquer avec le bus numérique et à piloter le moteur d'armement mécanique. Enfin, les puces de conversion électro-pyrotechniques fabriquées et présentées au chapitre 3 seront caractérisées en initiation sous différentes conditions électriques et les propriétés des puces sur Pyrex et sur membrane SU-8 seront comparées lors d'essais de mise à feu, y compris après vieillissement. Leur capacité à allumer des compositions inflammables et propulsives sera aussi évaluée par des essais de tirs en bombe manométrique.

2. Caractérisations du corps d'interface mécanique de l'IFI

Le corps d'interface mécanique et électrique de l'IFI doit tenir les environnements du spatial et rester étanche en fonctionnement pour ne pas endommager ou polluer la charge utile. Nous avons donc réalisé des essais de tenue mécanique et de perméabilité pour démontrer sa compatibilité avec les environnements.

2.1. Tenue mécanique du filetage et du scellement à haute pression

Pour valider la tenue mécanique du filetage et du scellement de verre lorsqu'ils sont soumis à de fortes pressions, nous avons réalisé l'essai représenté en Figure 89 :

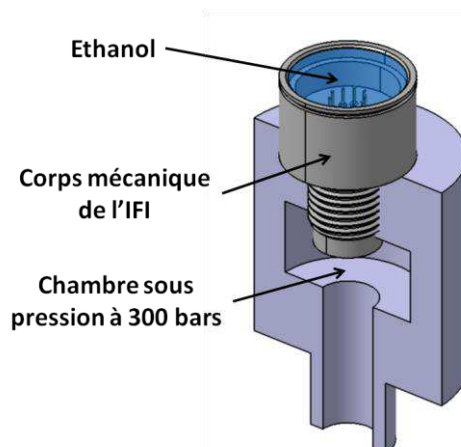


Figure 89. Essai de tenue mécanique et d'herméticité du corps mécanique de l'IFI sous haute pression

Dans cet essai, le corps de l'IFI est vissé sur une enceinte dont la pression monte jusqu'à 300 bars. Si la tenue mécanique du filetage est mauvaise, les filets cèdent sous l'effort mécanique. Pour évaluer l'herméticité des scellements sous la pression, la partie arrière du corps mécanique de l'IFI est rempli d'éthanol. En cas de fuite, l'apparition de bulles dans l'alcool met en évidence ces fuites.

Les essais réalisés montrent la bonne tenue mécanique du corps ainsi que l'herméticité des contacts soumis à une pression de 300 bars. Des essais réalisés à plus forte pression (jusqu'à 6000 bars) seront réalisés ultérieurement pour valider complètement la structure.

2.2. Mesure de la perméabilité des scellements de verre

Pour mesurer la perméabilité des scellements de verre, nous avons réalisé des essais appelés héli-test. Le schéma de principe de l'essai est décrit dans la Figure 90 :

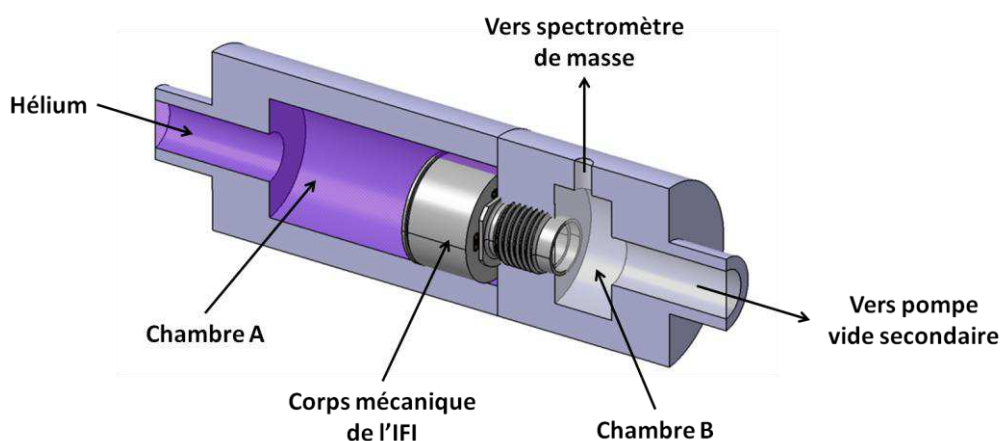


Figure 90. Mesure de perméabilité par héli-test

Le dispositif de test consiste en deux chambres distinctes séparées par une paroi étanche sur laquelle se trouve un filetage M10 sur lequel est vissé l'initiateur. L'une des chambres (appelée chambre A) contient de l'hélium gazeux et l'autre chambre (chambre B) est sous vide secondaire et intègre un spectromètre de masse détectant la concentration d'hélium. Si le corps de l'initiateur est perméable, l'hélium présent dans la chambre A passe dans la chambre B qui est sous vide secondaire au travers du corps et la concentration d'hélium dans cette même chambre augmente, se traduisant au niveau du spectromètre de masse.

Les essais réalisés donnent une perméabilité de l'ordre de 10^{-10} atm.cm³/s, correspondant à la limite basse de mesure de l'appareil, contre 10^{-6} atm.cm³/s pour les initiateurs utilisés actuellement. On peut donc conclure que le corps de l'IFI est complètement imperméable, en bon accord avec notre cahier des charges.

3. Validation de la carte de simulation de l'électronique de commande

La carte de simulation de l'électronique de commande réalisée au chapitre précédent doit permettre de valider un certain nombre de fonctions comme la communication avec le bus numérique ou encore le pilotage du moteur d'armement mécanique, en alimentant successivement les 3 bobines. Ces fonctions ont été testées et sont décrites dans les paragraphes qui suivent.

3.1. Validation de la communication avec le bus numérique

L'architecture pyro-numérique impose aux IFI d'intégrer un module de communication permettant la réception et l'envoi de messages au gérant. Pour des raisons de fiabilité, nous avons choisi un bus ARINC 825 (CAN) redondé respectant le standard ECSS-E-ST-50-15C avec l'architecture dite « sélective » pour réaliser cette communication. En effet, le bus ARINC 825 dispose de nombreux dispositifs de détection d'erreurs dans les messages, le rendant ainsi plus fiable que les bus Digibus ou encore MIL-STD-1553 [60]. La carte de simulation intègre donc 2 coupleurs CAN dont la commutation en réception est gérée par le microcontrôleur. Le schéma de cette architecture CAN redondée est donné en Figure 91 :

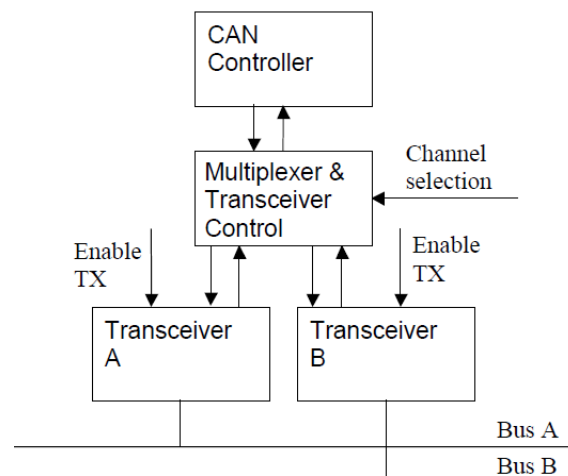


Figure 91. Bus CAN redondé - Architecture sélective

Le principe de fonctionnement est le suivant :

Par défaut, l'émission a lieu sur les deux bus simultanément et à l'initialisation de l'IFI, le contrôleur CAN sélectionne un des deux bus en réception via le multiplexeur. Cycliquement, un message spécifique appelé Watch-Dog émis par le gérant circule sur au moins l'un des deux bus. Après réception (sur le bus sélectionné par le multiplexeur) et décodage, le contrôleur CAN arme une temporisation. Si pendant le temps de la temporisation, le contrôleur CAN reçoit de nouveau le Watch-Dog il réarme la temporisation. Sinon le contrôleur bascule pour se positionner en réception sur l'autre bus. Ce processus permet de détecter et de corriger soit une défaillance physique (coupure/court-circuit) d'un bus ou une défaillance des coupleurs d'interface.

Nous avons validé le fonctionnement de la communication redondée selon l'architecture sélective. La carte présente deux diodes électroluminescentes permettant de visualiser lequel des deux bus est écouté par la carte. Ensuite, le bus écouté par la carte (par exemple le bus A) est court-circuité à l'aide d'un cavalier et nous vérifions que la carte bascule alors sur le second bus (bus B). Le bus A est ensuite décourt-circuité, puis le bus B est court-circuité et on vérifie alors que la carte rebasculé à nouveau sur le bus A. Cet essai a permis de mettre en évidence la capacité de l'électronique de commande de maintenir la communication avec le bus numérique, même en cas de défaillance d'un bus ou d'un coupleur d'un abonné.

3.2. Validation du pilotage des différentes fonctions de l'IFI

La capacité de l'électronique à communiquer avec le bus numérique a été démontrée. Il nous faut maintenant démontrer la capacité de cette électronique à réaliser le pilotage des autres fonctions de l'IFI, tout en conservant un dialogue nominal (multitâche). L'ensemble des fonctions reposent sur le même type de logique, à savoir l'ouverture et la fermeture d'interrupteurs réalisés à l'aide de transistors. Pour démontrer la faisabilité de toutes ces fonctions, il suffit donc d'en démontrer une seule. Nous prendrons donc l'exemple de la mise en rotation du moteur d'armement mécanique du BSA par le microcontrôleur.

Dans ce cas précis, il s'agit d'alimenter en séquence les trois bobines du moteur pour permettre sa rotation. Nous avons donc programmé le microcontrôleur de manière à générer les signaux décrits dans le chapitre 2 §4.6.1 à l'aide des 6 transistors du triple pont en H. La fréquence de génération de ces signaux est réglée suffisamment faible pour donner à l'aimant le temps de tourner sous l'effet du champ magnétique généré par les bobines. Lorsque la carte en reçoit l'ordre, nous générons alors les signaux et observons que le moteur s'est bien mis à tourner, démontrant alors la capacité de l'électronique de commande à piloter les fonctions intégrées à l'initiateur.

Bien entendu, l'ensemble des fonctions sera testé dans la suite des travaux, permettant d'optimiser aussi bien les choix matériels, mais aussi le programme du microcontrôleur.

4. Caractérisations en initiation des puces de conversion électro-pyrotechniques sur Pyrex et sur membrane SU-8

Les puces de conversion électro-pyrotechniques sur Pyrex et sur membrane SU-8 doivent être caractérisées pour démontrer leur capacité à initier des nano-thermites multicouches et mesurer leurs réponses en termes de temps d'initiation et puissances de mise à feu. Des tests de mise à feu sous différents créneaux de courant constant ont donc été réalisés et sont décrits dans les paragraphes qui suivent.

4.1. Description du banc de test

Les puces de conversion électro-pyrotechnique sont placées sur un testeur sous pointes (Karl Süss PA-200) permettant de positionner et connecter précisément les plots de contact des puces à un générateur de courant constant. Ce générateur permet de délivrer des créneaux de courant dont les valeurs sont reportées dans le Tableau 15, pendant une durée de 40 ms avec une compliance de 60 V.

Valeur du courant (A)	0,25	0,5	1	1,5	2	2,5	3	4
-----------------------	------	-----	---	-----	---	-----	---	---

Tableau 15. Valeur de courants constants délivrés par le générateur du LAAS

La valeur du courant circulant réellement dans la puce est mesurée par une sonde de courant à effet Hall (Tektronix TCP 202) et la valeur de tension dans la puce est mesurée grâce à une sonde de tension (Tektronix P6139A) connectée aux bornes de la puce. Enfin, un photo-capteur est placée à 1cm en vis-à-vis de la puce permettant d'enregistrer l'émission de lumière lors de la réaction de la thermité. Les signaux de ces deux sondes ainsi que celui du photo-capteur sont renvoyés sur un oscilloscope numérique (Tektronic DPO 4054) permettant de visualiser l'ensemble des informations pour chaque essai de tir. Ce montage expérimental est représenté en Figure 92.

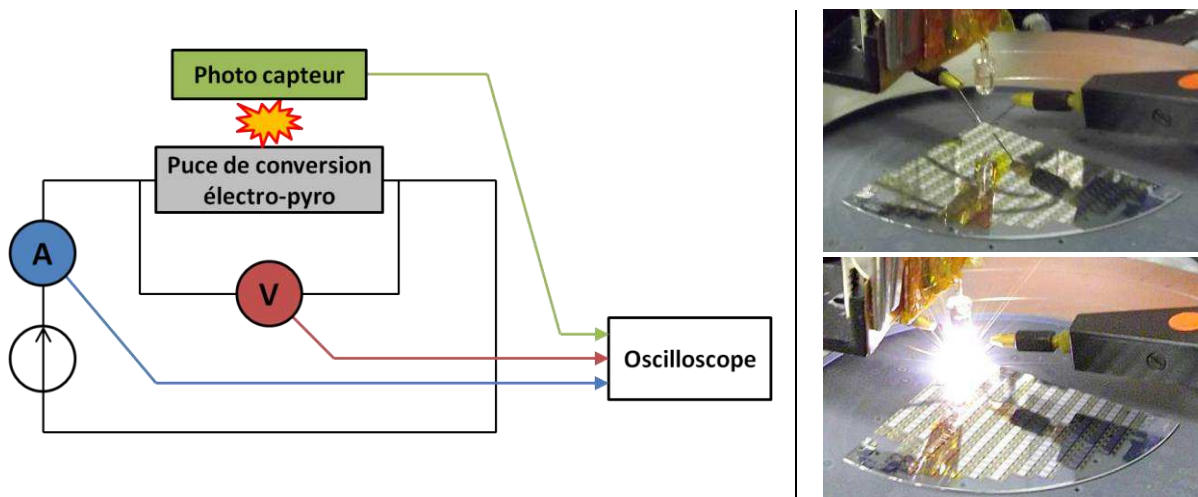


Figure 92. Dispositif de test de mise à feu des puces de conversion électro-pyrotechnique

Les essais de tirs sont réalisés à température et pression ambiante. Pour chaque valeur de courants testés, 10 tirs sont effectués sur les puces sur substrat pyrex et 10 tirs sur puces à membrane SU-8.

4.2. Comparaison des propriétés des puces sur substrat Pyrex et sur membrane SU-8

4.2.1. Comportement électrique des puces

Les essais de tirs réalisés permettent de déterminer le pourcentage de réussite d'initiation en fonction de courant de mise à feu. Ces taux de réussite en fonction du courant sont répertoriés dans le Tableau 16.

Valeur du courant (A)	0.25	0.5	1	1.5	2	2.5	3	4
Taux de réussite Pyrex (%)	0	100	100	100	100	100	100	100
Taux de réussite membrane SU-8 (%)	100	100	100	100	100	100	100	100

Tableau 16. Taux de réussite d'initiation en fonction du courant suivant le type de substrat

Lorsque la mise à feu est réussie, la réponse électrique des puces soumises à un même créneau de courant est semblable pour les puces sur Pyrex et les puces sur membrane SU-8, à l'exception du temps d'initiation qui est plus long pour les puces Pyrex en raison de l'inertie thermique du substrat (ce point sera détaillé dans le paragraphe qui suit). Un exemple de réponse électrique pour une puce sur membrane soumise à un courant de 500 mA est donné dans la Figure 93.

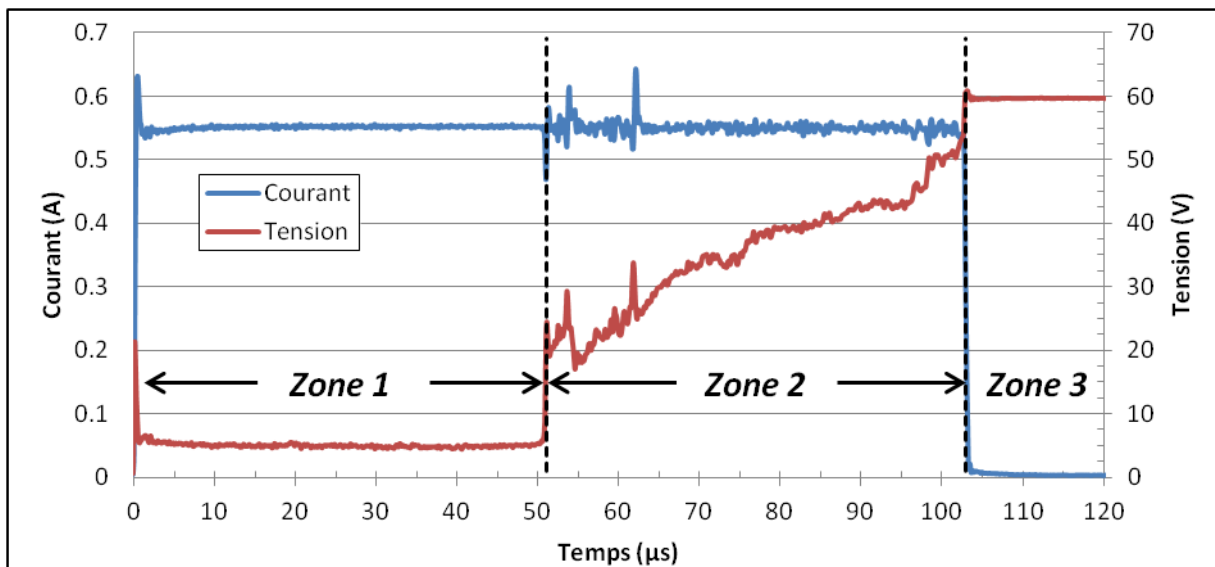


Figure 93. Exemple de réponse électrique d'une puce sur membrane SU-8 soumise à un courant de 500 mA

On distingue 3 zones correspondant à 3 régimes de fonctionnement distincts :

- **Zone 1 : de $t = 0$ à $52 \mu s$**

La valeur du courant mesurée aux bornes de la puce est de 550 mA pour une consigne de 500 mA. La valeur de la tension s'établit à 4,8 V et reste quasiment constante. Cette réponse ne correspond pas à un comportement résistif puisqu'il n'y a pas de dérive de la valeur de la résistance avec le temps (et donc avec la température). En effet, si le courant passait dans le

filament, celui-ci s'échaufferait par effet Joule, conduisant à une augmentation de sa résistance électrique.

On peut donc penser que les électrons ne circulent pas uniquement dans le filament mais aussi dans la thermitite. En effet, la première couche de thermitite est constituée d'une couche de CuO semi-conducteur, en contact direct avec le filament (cf Figure 94), formant ainsi une jonction métal/semi-conducteur. La thermitite se comporterait alors comme une diode Schottky, dont la tension de seuil serait inférieure à 4,8 V, et de résistance dynamique d'environ 10 Ohm. Le circuit équivalent des puces est représenté en Figure 94.

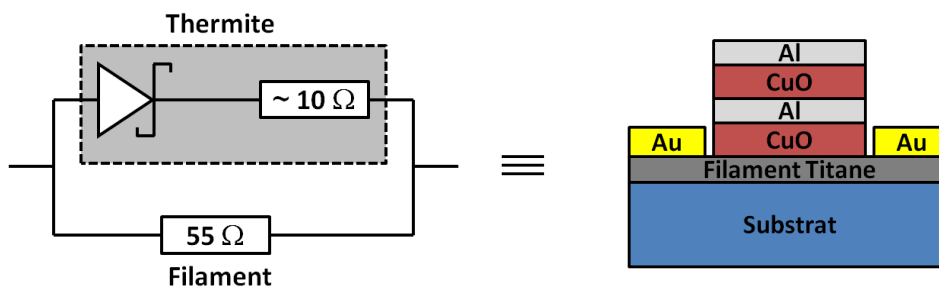


Figure 94. Modèle électrique équivalent des puces de conversion électro-pyrotechnique en zone 1

Cette hypothèse a été validée par des mesures I(V) aux bornes de la puce. La Figure 95 représente la courbe caractéristique ainsi que la résistance électrique de la puce :

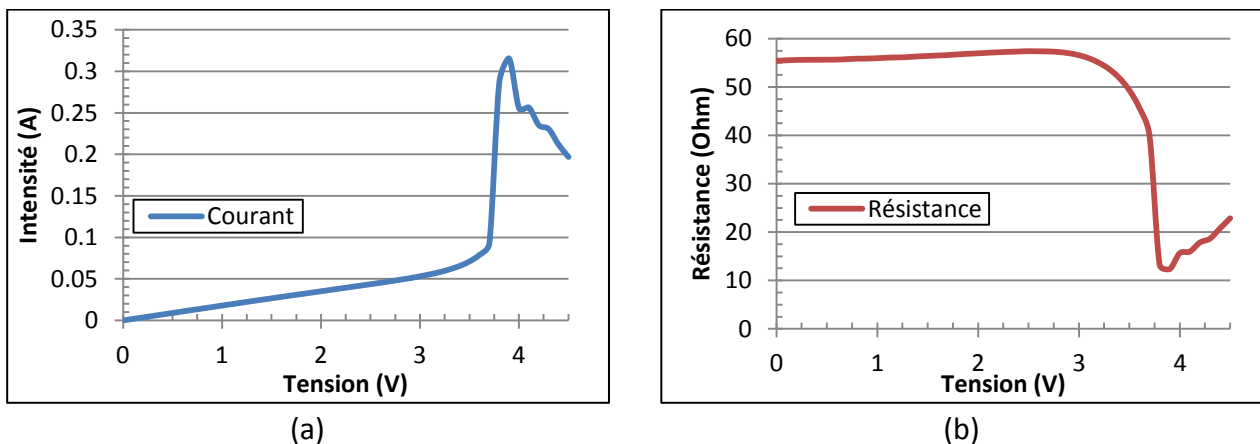


Figure 95. Courbe caractéristique (a) et résistance électrique (b) de la puce

Cette courbe caractéristique met en évidence le comportement de diode de la thermitite. On observe pour une tension inférieure à 3,7 V une résistance de 55 Ω correspondant au filament de la puce. Une légère dérive est observée, correspondant à l'échauffement du filament sur la membrane. Au-delà de 3,7 V, la diode devient passante et la résistance équivalente diminue jusqu'à 12 Ω , correspondant à la résistance dynamique de la diode en parallèle avec le filament.

Une perspective intéressante consisterait à réaliser des puces sans filament dont les plots de contact permettraient d'alimenter directement la thermitite via la première couche de CuO. Cette solution permettrait de réaliser des initiateurs hybrides, à pont semi-conducteurs et

réactifs, dont le seuil de déclenchement pourrait être paramétrable, par exemple en jouant sur la nature du métal réalisant le plot de contact, modifiant alors les paramètres de la jonction métal/semi-conducteur. Un projet ANR ASTRID Maturation a été déposé pour explorer ces propriétés.

- **Zone 2 : de $t = 52$ à $103 \mu\text{s}$**

A $t = 52 \mu\text{s}$, la thermitte réagit et on bascule dans la zone 2. Le courant traversant la puce reste à 550 mA, et la tension augmente de manière quasi linéaire de 20 à 50 V. Cette fois, le comportement est résistif et correspond à l'échauffement du filament. En effet, la thermitte s'est initiée et les électrons ne peuvent plus y circuler. Cette période ne contribue donc pas à l'initiation de la thermitte, ce qui a été validé en tronquant le créneau de courant juste après la fin de la zone 1, permettant quand même l'initiation de la puce.

- **Zone 3 : $t > 103 \mu\text{s}$**

La zone 3 démarre avec la fusion du filament. On se retrouve alors en circuit ouvert, ce qui est observé par un courant nul dans la puce, et une tension entre les bornes correspondant à la compliance du générateur, à savoir 60 V.

4.2.2. Temps d'initiation en fonction du courant de mise à feu

Bien que les puces de conversion électro-pyrotechnique sur Pyrex et sur membrane SU-8 présentent le même type de comportement électrique, le temps nécessaire à l'initiation (durée de la zone 1) est plus long sur les puces Pyrex que sur celles sur membranes en raison des pertes thermiques plus importantes sur Pyrex. Ces temps d'initiation diminuent aussi lorsque le courant de mise à feu augmente comme représenté dans la Figure 96 :

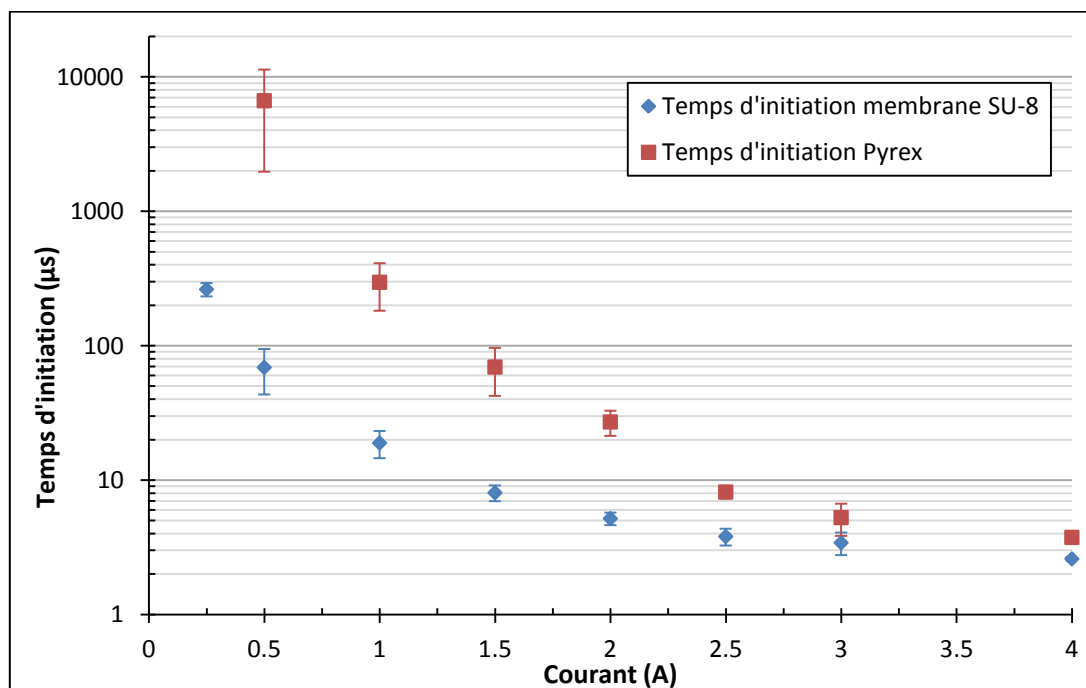


Figure 96. Temps d'initiation en fonction du courant de mise à feu

Nous faisons deux observations. La première est que la dispersion des temps d'initiation pour chaque courant de mise à feu est plus réduite dans le cas des puces sur membranes, la dispersion étant l'écart entre le temps d'initiation minimum et maximum sur les 10 puces testées. Ensuite, on peut observer une grande différence de temps d'initiation entre les deux types de puces, en particulier pour des courants faibles : pour un courant de 0,5 A, les puces sur membranes s'initient en moyenne en 70 μ s contre 66ms pour les puces sur Pyrex. Cette différence s'atténue aux forts courants puisque la contribution des pertes thermiques est moins importante sur de courtes durées. Toutefois, l'IFI ne pouvant fonctionner qu'avec des courants et tensions assez faibles, l'avantage des structures sur membranes est incontestable. Ceci contribuera à réduire la taille de la capacité de stockage permettant la mise à feu de l'IFI, puisque la faible consommation énergétique des puces sur membrane permet d'utiliser des capacités de stockage de faible dimension.

4.2.3. Evaluation de la « puissance » délivrée lors de la réaction de la nano-thermite

Le photo-capteur présent en vis-à-vis des puces lors des essais de mise à feu permet de détecter l'initiation, mais aussi d'obtenir une évaluation de la puissance délivrée lors de la combustion de la thermitite. En effet, le flash lumineux émis par la thermitite lors de sa mise à feu est représentatif de la quantité d'énergie libérée par rayonnement puisque la température de combustion de la thermitite est très élevée, pouvant atteindre 3000 K.

La Figure 97 représente le signal du photo-capteur pour des puces sur membranes et des puces sur Pyrex :

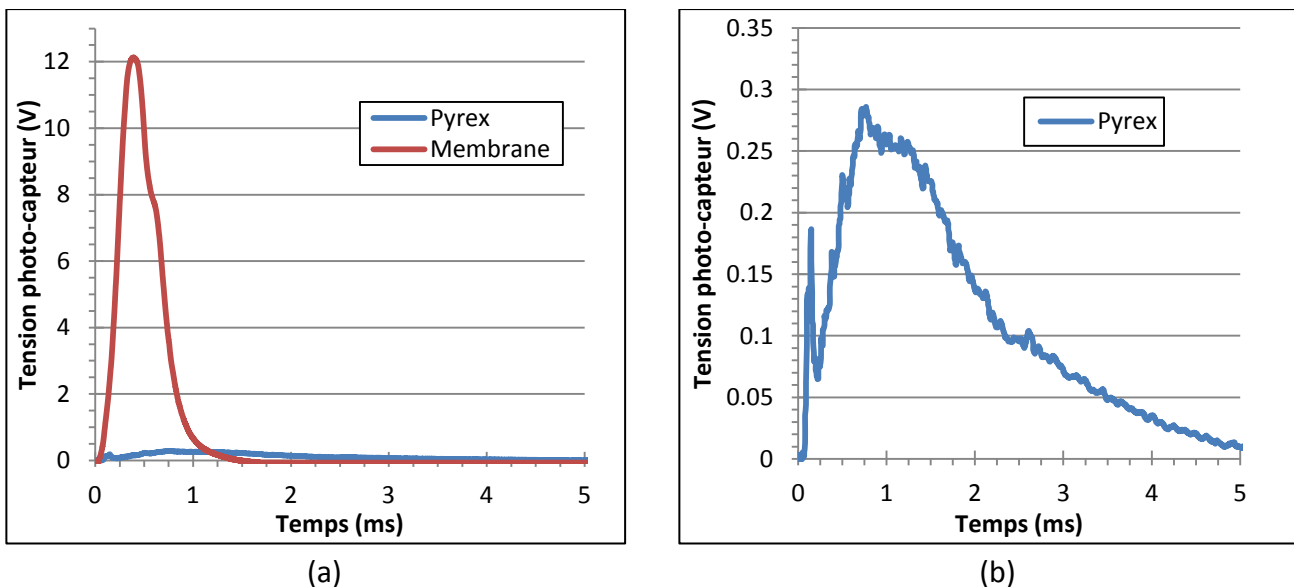


Figure 97. Comparaison des flashes émis lors de la réaction de la nano-thermite
(a) sur membrane SU-8 et sur pyrex (b) zoom pyrex

On observe une grande différence de comportement entre les deux types de puces. En effet, la durée du flash est de 1 ms pour les puces sur membrane, contre 4 ms pour celles sur pyrex et la tension du photo-capteur atteint 12 V max pour les puces sur membrane, contre 0,29 V max pour les puces Pyrex. L'énergie délivrée par la nano-thermite évaluée en intégrant le signal est 40 fois plus importante pour les puces sur membranes que pour Pyrex. Cette différence peut s'expliquer par les pertes thermiques qui sont bien plus faibles sur membranes.

5. Caractérisations de l'allumage de charges relais inflammables, propulsives et explosives

Nous avons montré dans le paragraphe précédent que les puces de conversion électro-pyrotechniques à nano-thermite s'initient sous 2,5 W en moins de 70 μ s et que le flash de la réaction dure environ 1 ms pour celles sur membranes. Il nous faut maintenant démontrer la capacité de ces puces à allumer à leur tour des charges relais inflammables, propulsives ou explosives.

5.1. Initiation de charges inflammables et propulsives

La capacité des puces à initier des charges inflammables et propulsives a été validée par des essais de tirs en bombe manométrique. Il s'agit ici d'initier une charge inflammable en contact avec une charge propulsive et de mesurer l'augmentation de pression dans un volume étanche de 1cm³. En effet, l'initiation d'une charge propulsive génère une grande quantité de gaz, qui dans un volume confiné, se traduit par une importante augmentation de pression. La Figure 98 représente le montage expérimental :

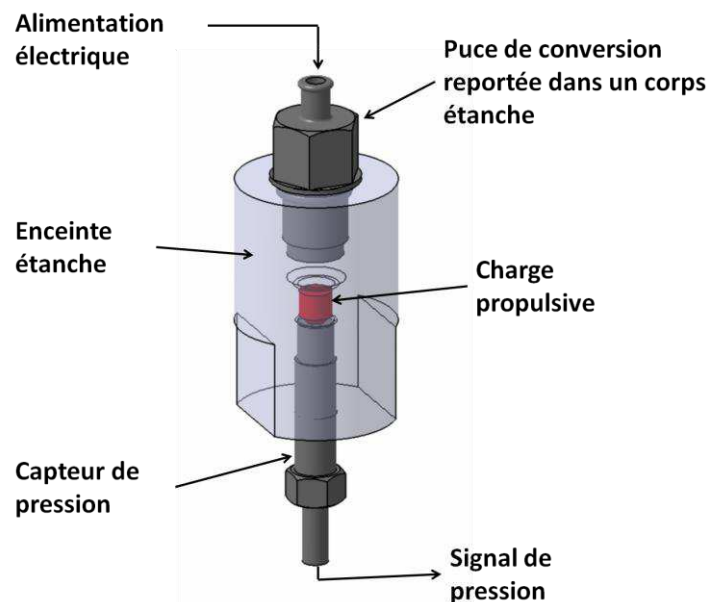


Figure 98. Montage expérimental de tir en bombe manométrique

Pour réaliser ces essais, les puces de conversion électro-pyrotechniques sur membranes ont été reportées et connectées dans des corps étanches (à savoir ceux des inflammateurs actuellement utilisés) ; ces corps ont ensuite été vissés sur une enceinte étanche contenant la charge à allumer. La distance entre la puce de conversion électro-pyrotechnique et la charge à allumer est de l'ordre de 1 cm. Pour réaliser la mesure de pression, un capteur Kistler 601H connecté à un amplificateur Kistler type 5018 est vissé hermétiquement sur la bombe.

La Figure 99 donne le résultat d'un essai de tir en bombe manométrique avec une charge propulsive constituée de 20mg de double base dopée avec 17mg de nano-thermite.

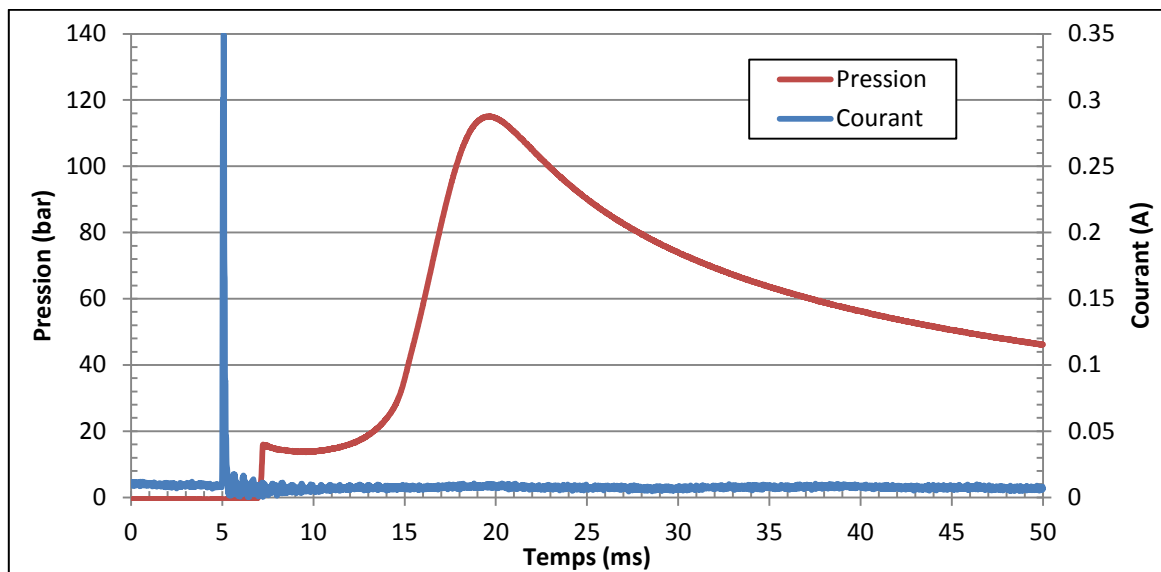


Figure 99. Initiation d'une charge propulsive en bombe manométrique

A $t=5\text{ms}$, un créneau de courant de 350 mA est injecté dans la puce de conversion électro-pyrotechnique qui s'initie en $200\mu\text{s}$. A $t=7\text{ms}$, la pression monte rapidement à 18 bars correspondant à l'initiation des flocons de thermitite multi-couches. A $t=12\text{ms}$, la pression atteint 117 bars en 10ms correspondant à la déflagration de la double base. La pression diminue ensuite en raison de la diminution de température dans la bombe.

Ces essais ont permis de démontrer la capacité des puces à nano-thermite d'initier des charges relais inflammables et propulsives. Le temps nécessaire à l'initiation de la charge relais peut être diminué en diminuant le gap entre la puce et la charge relais et sera réalisé dans les travaux futurs.

5.2. Initiation de charges explosives

Pour initier des charges d'explosifs secondaires en détonation, la composition doit être attaquée par une onde de choc détonante, c'est-à-dire supersonique dans le solide. Classiquement, un explosif secondaire est initié par un explosif primaire ou un dispositif capable de générer une onde de choc (fil explosé, percuteur...). Les nano-thermites sont caractérisées par des vitesses de propagation allant du m/s à quelques centaines de m/s en

fonction de leur structuration (1D nanofil, 2D nano-feuillet, 3D nano-poudres), et de leur composition (nature des espèces, stœchiométrie...). Nous avons donc évalué la vitesse de propagation du front de flamme dans nos nano-thermites multicouches à l'aide d'une caméra rapide. Ce montage expérimental est représenté en Figure 100:

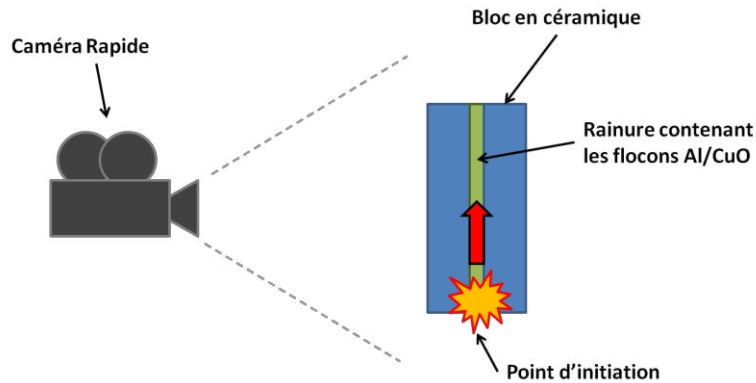


Figure 100. Mesure de vitesse de propagation du front de flamme par caméra rapide

L'essai consiste à placer des flocons de nano-thermites multicouches dans un bloc céramique présentant une tranchée de 60mm de long pour 5mm de large et 5mm de profondeur. Ces thermites sont initiées à l'une des deux extrémités du bloc céramique, et la propagation du front de flamme est suivie à l'aide d'une caméra rapide SA3 Photron placée perpendiculairement au bloc céramique. Un exemple de résultat obtenu est présenté en Figure 101.



Figure 101. Propagation du front de flamme dans les nano-thermites

Connaissant la distance parcourue par la flamme (longueur du bloc en céramique) et le temps entre chaque image, nous pouvons alors en déduire la vitesse de propagation. Nous avons donc mesuré cette vitesse pour différentes nano-thermites multicouches dont les caractéristiques sont données dans le Tableau 17. Les résultats sont représentés en Figure 102.

Epaisseur Al (nm)	Epaisseur CuO (nm)	Vitesse de propagation (m/s)
50	100	80
100	200	27
150	300	17
200	400	9,2
300	600	5,7
500	1000	1,2

Tableau 17. Caractéristiques des thermites testées en vitesse de combustion

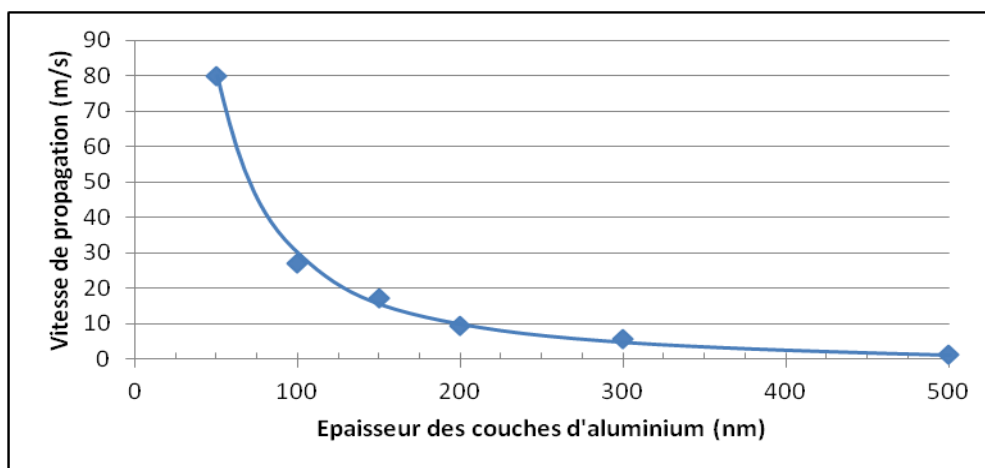


Figure 102. Vitesse de combustion en fonction de l'épaisseur des couches

Ces mesures montrent que la vitesse de propagation du front de flamme décroît avec l'épaisseur des couches. La plus performante des nano-thermites multicouches aujourd'hui disponible au LAAS présente une vitesse de propagation de 80 m/s obtenu pour des dépôts de 50nm d'Al et 100nm de CuO, alors que cette vitesse est de l'ordre de 1m/s pour des thermites micro-structurées. Ces vitesses étant inférieures à la vitesse du son dans l'air, il s'agit ici d'initiation de type inflammation. Il n'est donc pas possible d'utiliser directement les puces de conversion électro-pyrotechniques pour allumer des charges relais d'explosif secondaire. Deux solutions sont toutefois envisageables pour réaliser l'allumage d'explosifs secondaire à l'aide des puces à nano-thermite :

- **Option 1 : chargement d'explosif primaire au contact de la puce**

La première option consiste à charger un explosif primaire compatible REACH au contact des puces permettant de générer l'onde de choc détonante (voir Figure 103). Toutefois, la quantité d'explosif primaire nécessaire pour réaliser l'amorçage d'un secondaire au travers d'une barrière de sécurité mécanique n'est pas connue. Par ailleurs, la manipulation d'échantillons présentant un explosif primaire représente un danger évident ce qui complexifie les essais potentiels. C'est donc une voie que le LAAS ne peut pas suivre car il n'a ni les équipements, ni les habilitations nécessaires à la synthèse et la manipulation de matière aussi dangereuse que sont les explosifs primaires.

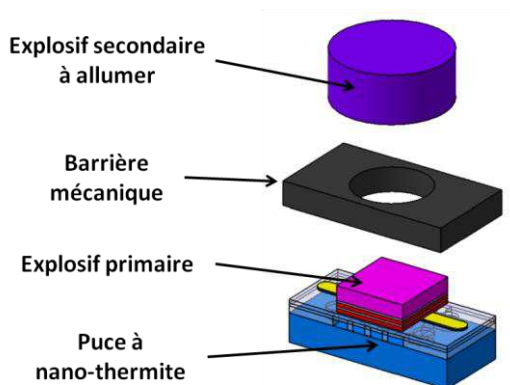


Figure 103. Chargement d'explosif primaire sur une puce à nano-thermite

- **Option 2 : arrachement et mise en vitesse d'un impacteur**

La seconde option envisageable pour initier des charges d'explosif secondaire consiste à utiliser la pression générée lors de l'allumage des thermites pour arracher et mettre en vitesse un impacteur qui viendra ensuite initier la charge relais par impact (voir Figure 104). Cette solution présente l'avantage de ne pas utiliser d'explosif primaire, mais aussi d'utiliser une barrière mécanique de faible dimension (puisque l'impacteur à arrêter est de faible dimension).

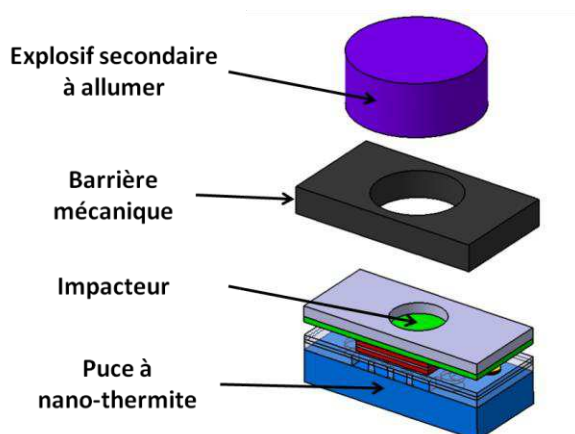


Figure 104. Impacteur intégré sur puce à nano-thermite

Cette solution très innovante nécessite une étude spécifique car il nous faut répondre à de nombreuses questions : Quels sont les pressions générées par la combustion de nano-thermites Al/CuO ? Peut-on atteindre des niveaux de pressions suffisants pour arracher et mettre en vitesse un impacteur capable d'initier en détonation un explosif secondaire ? S'en suit des verrous technologiques comme la conception d'un dispositif MEMS capable de tenir les fortes pressions, la conception et le dimensionnement d'un impacteur (géométrie, matériau, etc...). Cette solution, quoique séduisante, sort du cadre de ce travail de thèse et sera traité dans une thèse ultérieure.

6. Tenue des puces de conversion électro-pyrotechniques aux environnements

Dans les paragraphes précédents, nous avons montré la capacité des puces de conversion électro-pyrotechnique à initier les nano-thermites multicouches Al/CuO et de transmettre l'ordre pyrotechnique à des charges inflammable et propulsives. Comme ces puces doivent être compatibles avec les environnements spatiaux, nous avons fait subir aux puces des agressions représentatives de ces environnements et les avons caractérisées en initiation pour valider leur fonctionnement après agressions.

6.1. Description des agressions réalisées sur les puces

Les puces d'initiation ont subi des agressions climatiques (température, humidité, chocs thermiques) et des rayonnements (neutrons, rayons X). La description des agressions est résumée dans le Tableau 18 :

Agression	Description
<i>Chaleur Sèche</i>	10h à +100°C
<i>Froid Sec</i>	10h à -100°C
<i>Chocs Thermiques</i>	3 cycles de 5h à 20°C puis 5min à 70°C puis retour à 20°C
<i>Chaleur Humide</i>	40 cycles de 1h à 22°C puis 1h à 33°C sous 93% HR
<i>Froid-Chaud Extrême</i>	20 cycles de -150°C / +160°C à 35°C/min

Tableau 18. Description des agressions

Deux séries d'essais ont été réalisés sur des lots de 10 puces d'initiation :

- Une série dans laquelle les puces ne subissent *qu'un seul type d'agression*
- Une série dans laquelle les puces subissent *des agressions cumulées*

130 puces prélevées sur le même wafer ont été divisées en 13 lots. Un lot est conservé pour référence et les 12 lots de 10 puces sont placées dans des boîtes de pétri identifiées par leur numéro de lot de sorte de pouvoir comparer les résultats. Le plan d'expérience des agressions est donné dans le Tableau 19 :

Nom du lot de 10 puces	Détails des agressions
Référence	<i>Aucune</i>
1	<i>Chaleur Sèche</i>
2	<i>Froid Sec</i>
3	<i>Chocs thermiques</i>
4	<i>Chaleur Humide</i>
5	<i>Froid-Chaud Extrême</i>
6	<i>Chaleur Sèche + Froid Sec</i>
7	<i>Chaleur Sèche + Froid Sec + Chocs Thermiques</i>
8	<i>Chaleur Sèche + Froid Sec + Chocs Thermiques + Chaleur Humide</i>
9	<i>Chaleur Sèche + Froid Sec + Chocs Thermiques + Chaleur Humide + Froid Chaud-Extrême</i>
10	<i>Neutrons</i>
11	<i>Rayons X</i>
12	<i>Neutrons + Rayons X</i>

Tableau 19. Plan d'expérience des agressions imposées aux puces

Ces essais sont réalisés sur des puces Pyrex et sur membranes SU-8. Pour des raisons de disponibilité des moyens d'essais, les agressions aux rayons X et aux neutrons n'ont pas pu être réalisées sur les puces à membranes SU-8.

6.2. Résultats des essais de tirs

Des essais d'initiation ont été menés sur la totalité des puces ayant subi les agressions ainsi que sur les lots de référence. Lors de ces essais, deux paramètres sont mesurés sur chacune des puces :

- Le temps nécessaire à l'initiation électro-pyrotechnique pour un courant de mise à feu de 0,35 A
- La valeur de la tension max du signal de la photodiode

100% des puces sur Pyrex et sur membrane s'initient après avoir subi les agressions. En termes de temps d'application du courant nécessaire à l'initiation, aucune modification notable n'est observée avant et après les agressions.

Si l'on regarde la « puissance » délivrée par la nano-thermite lors de sa réaction, c'est-à-dire le signal de la photodiode, on observe une diminution du signal après agressions thermiques. Les agressions de type rayons X et neutrons ne contribuent pas. Les Figure 105 et Figure 106 représentent le pourcentage de « puissance » émise par rapport aux références (correspondant à 100%) des puces sur Pyrex et sur membranes SU-8.

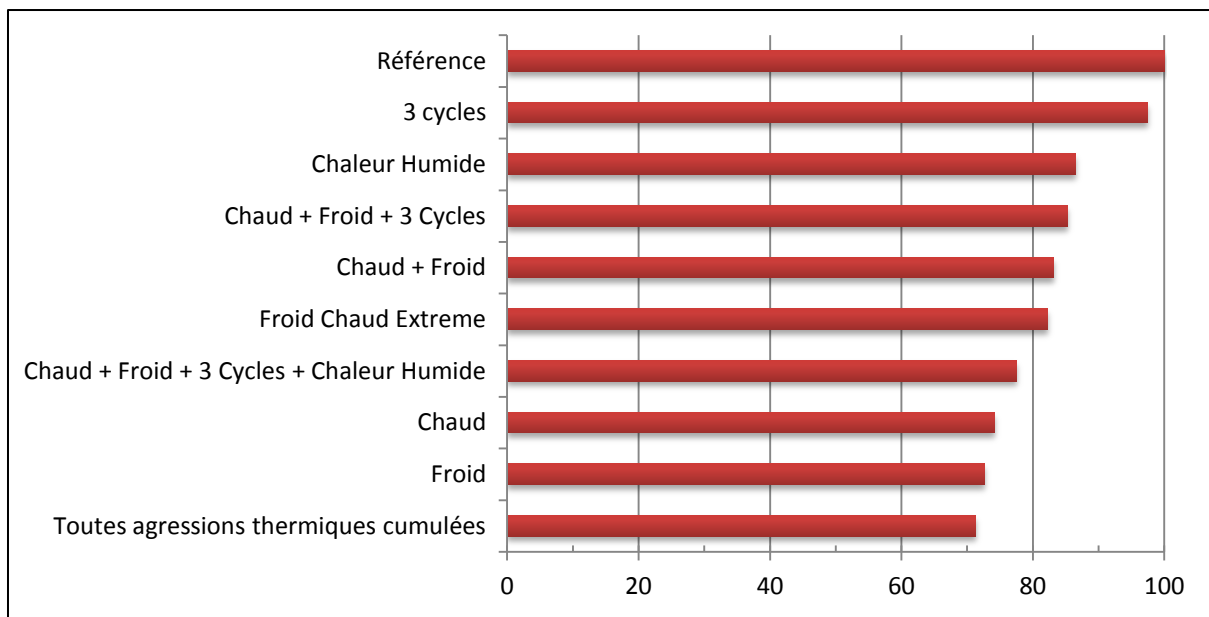


Figure 105. Evaluation de la puissance du signal lumineux émis lors de l'initiation des puces Pyrex après agression thermique

Concernant les puces sur Pyrex, le cumul de toutes les agressions diminue les performances de 30% par rapport aux puces de référence. A l'inverse, les agressions de type 3 cycles n'affectent que très peu les performances, avec une diminution d'environ 3%.

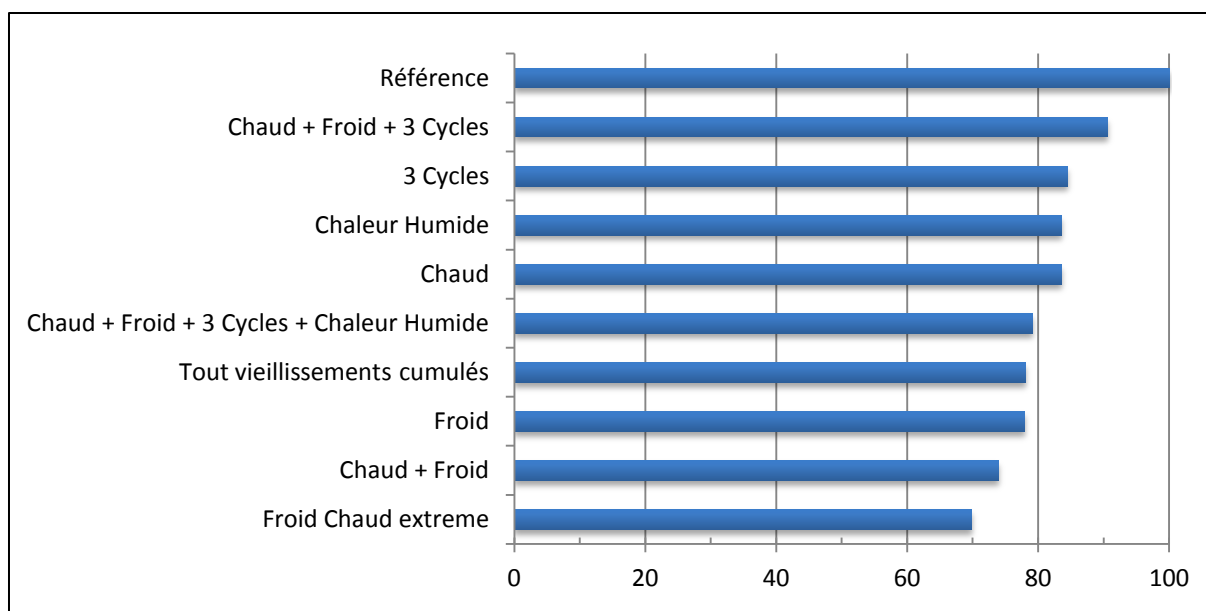


Figure 106. Evaluation de la puissance du signal lumineux émis lors de l'initiation des puces sur membrane après agression thermiques

Concernant les puces sur membranes, l'agression de type « Froid Chaud Extrême » diminue les performances de l'ordre de 30%. Le cumul des agressions « Chaud + Froid + 3 cycles » affecte les performances d'environ 10%. On peut souligner que quel que soit le type d'agression imposée, aucun endommagement de la structure suspendue n'est à noter.

Globalement, il est très difficile de statuer sur ces répartitions : en effet, des puces ayant subi des agressions cumulées présentent de meilleures performances que celles soumises à un seul type d'agression. Cependant, on peut constater que dans le pire des cas, on obtient une dégradation des performances de l'ordre de 30% par rapport à la référence, ce qui nous permet de dimensionner les puces pour anticiper l'effet des vieillissements.

7. Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons caractérisé les différentes briques constitutives de l'IFI. Les essais réalisés ont permis de montrer la tenue mécanique du corps mécanique aux sollicitations spatiales comme la tenue et l'herméticité sous haute pression, et la très faible perméabilité des scellements de verre, assurant ainsi de leur bonne compatibilité avec les environnements lanceurs. La carte de simulation de l'électronique de commande a montré sa capacité à communiquer avec un bus numérique de type ARINC 825 (CAN) redondé, permettant de garantir les niveaux de fiabilité élevés du spatial. La capacité de cette électronique à piloter des fonctions a aussi été évaluée et a montré qu'il est possible de piloter simplement l'armement mécanique, la sécurité électrique, et la mise à feu. Enfin, les puces de conversion électro-pyrotechnique ont démontré leur capacité à initier des nano-thermites multi-couches Al/CuO sous différentes puissances d'alimentation, et les structures sur membranes SU-8 ont clairement montré leur intérêt au regard des temps de fonctionnement très rapide et donc des faibles énergies nécessaires pour réaliser la mise à feu, mais aussi en termes d'énergie libérée par la nano-thermite lors de sa réaction. Ces

puces ont par ailleurs démontré leur capacité à allumer à leur tour des charges relais inflammables et propulsives grâce à des essais de tirs en bombe manométrique. Enfin, les puces de conversion électro-pyrotechnique ont été caractérisées après agressions thermiques et radiatives et montrent que le taux de réussite aux essais de tirs reste de 100% après agression, avec une baisse maximale des performances de l'ordre de 30%.

L'étape suivante consiste à étudier spécifiquement la capacité de ces puces pour générer de la pression permettant l'arrachement et la mise en vitesse d'un impacteur avec pour objectif l'initiation de charges relais d'explosifs secondaires. En effet, il s'agit d'un verrou technologique important, notamment en ce qui concerne les niveaux de pression à atteindre et de l'herméticité des dispositifs MEMS qui intégreront ces structures. Le développement de telles structures permettra alors d'obtenir des détonateurs sans explosif primaire, à faible consommation électrique, et intégrant tous les dispositifs de sûreté et de sécurité de l'IFI.

Un second point de travail consiste à simplifier les étapes d'assemblage et d'interconnexion des différentes briques constitutives de l'IFI sur lesquelles nous avons buté. Nous proposons différentes voies de simplification et d'amélioration que nous n'avons pu mettre en œuvre faute de temps :

- La première simplification consiste à intégrer dans le même bloc le moteur du BSA avec les contacts à tulipes et à ressorts. Le report de la connexion du moteur sur les contacts serait alors réalisé à la fabrication, et le bloc polymère serait réalisé par injection moulage autour du moteur.
- La seconde voie d'amélioration consiste à réaliser la plateforme porte-puce directement en technologie silicium. Les puces seraient réalisées en face avant et les pistes en face arrière. Cette option permettrait d'utiliser des technologies collectives pour la fabrication des plateformes et supprimerait les étapes de découpes, de report et de wire-bondings.

Des perspectives plus complètes et plus globales de ce travail sont détaillées dans la conclusion générale.

CONCLUSION GENERALE

Nous rappelons que ce travail de thèse s'inscrit dans la continuité des travaux démarrés dès 1995 par l'équipe micro-pyrotechnie du LAAS-CNRS. L'idée d'origine consistant à intégrer des matériaux pyrotechniques dans les microsystèmes a depuis été déclinée au travers de nombreuses applications et a connu de nombreux développements permettant de pousser l'intégration de fonctions de plus en plus complexes au sein même de ces systèmes ainsi qu'une miniaturisation accrue. Nous nous sommes intéressés au développement de systèmes d'initiation pyrotechniques miniatures, intelligents et sécurisés permettant une réduction des tailles et des masses des systèmes pyrotechniques utilisés sur lanceurs. Ces initiateurs pyrotechniques ont été développés à partir de briques technologiques mises au point au LAAS au cours de thèses précédentes, en particulier concernant les thématiques de l'initiation sécurisée et de l'intégration de matériaux pyrotechniques en technologie micro-électronique.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les technologies actuellement utilisées pour réaliser les fonctions pyrotechniques sur les lanceurs spatiaux. Cet état de l'art a permis de mettre en évidence les limitations de ces systèmes, en particulier leur incapacité à répondre aux problématiques de demain que sont le besoin de miniaturisation, de réduction des coûts, et la compatibilité des équipements avec les nouvelles réglementations environnementales européennes. Nous avons alors présenté les architectures alternatives aux systèmes actuels et les avons évaluées en termes de gains de masse, de volume et de coûts. Cette analyse montre que l'architecture pyro-numérique, basée sur le déploiement d'initiateurs pyrotechniques miniatures, sécurisés et intelligents, constitue une solution ambitieuse et innovante pour répondre à ces besoins. L'examen des différentes technologies d'initiation et de sécurisation actuellement disponibles a montré qu'aucune solution existante ne permet de réaliser simplement ce type d'initiateur ; c'est pourquoi ce travail de thèse s'est axé sur la conception, la fabrication et la caractérisation d'un initiateur pyrotechnique intégrant des fonctions de sécurités électriques et mécanique, de stockage local d'énergie, de tests et de communication, capable d'allumer les fonctions classiques d'un lanceur (démarreur, cisailles, fusées d'éloignement...).

Dans le second chapitre, nous avons présenté notre démarche de conception de l'initiateur à fonctions intégrées pour répondre aux besoins identifiés dans notre cahier des charges. Notre proposition consiste à intégrer l'ensemble des fonctions de l'IFI dans un corps mécanique dont l'herméticité de la connectique est assurée par scellement de verre. Les fonctions d'intelligence, de stockage d'énergie et de sécurité électrique sont prévues dans une même puce de silicium, constituant alors un « system-on-chip » extrêmement compact. La fonction d'armement mécanique a été conçue en utilisant un moteur brushless miniature entraînant une plateforme portant les puces de conversion électro-pyrotechnique en vis-à-vis d'une barrière d'armement mécanique, permettant d'intégrer les fonctions d'armement mécanique et de conversion électro-pyrotechnique dans un volume inférieur à 1cm³. Enfin,

nous avons proposé de réaliser les puces de conversion électro-pyrotechnique en intégrant des nano-thermites multicouches Al/CuO sur plateforme de chauffe à membrane SU-8. Cette solution innovante permet de tirer profit de l'isolation thermique des structures sur membranes tout en garantissant une bonne tenue mécanique, ainsi que d'utiliser des matériaux pyrotechniques compatibles REACH. Cette conception a été appuyée par des simulations par éléments finis mettant en évidence l'intérêt de telles structures en comparaison de la technologie sur Pyrex développée au LAAS lors de travaux antérieurs.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté les procédés mis au point pour fabriquer les différentes briques constitutives de l'IFI. Nous avons en premier lieu détaillé le procédé et les outillages nécessaires à la réalisation des scellements de contacts électriques du corps de l'IFI dans des perles de verre. Nous avons ensuite présenté la carte de simulation de l'électronique de l'IFI puisque la réalisation du system-on-chip complet doit au préalable être validée sur table. La fabrication des puces de conversion électro-pyrotechnique a fait l'objet d'une mise au point technologique plus poussée puisque les technologies de membranes SU-8 ont dû être adaptées à notre application. Ce procédé collectif basé sur 5 niveaux de masquages permet de réaliser environ 1000 puces par lot de fabrication, tirant pleinement parti des technologies collectives de la micro-électronique. Enfin, nous avons présenté les différentes étapes d'assemblage permettant d'interconnecter les différentes briques dans le même corps mécanique. Cette dernière étape a montré la difficulté d'interconnecter tous ces éléments vu les faibles dimensionnalités de notre système.

Le dernier chapitre de la thèse a été consacré à la présentation des caractérisations du prototype d'IFI. Nous avons en premier lieu validé la tenue du corps mécanique aux environnements spatiaux, en particulier la tenue mécanique et l'herméticité de contacts sous haute pression. La carte de simulation de l'électronique de commande a démontré sa capacité à assurer la communication avec le bus numérique et nous avons démontré la fiabilité de la communication ARINC 825 (CAN) redondée selon l'architecture sélective. Nous avons par ailleurs validé la capacité de cette électronique à piloter l'armement mécanique, garantissant alors la capacité à piloter les autres fonctions du système. Les puces de conversion électro-pyrotechnique ont été caractérisées en initiation sous différentes puissances électriques et présentent un taux de réussite de 100% aux essais de tirs pour des courants supérieurs à 250 mA. Les structures sur membrane SU-8 ont montré leur supériorité en termes de temps de réponse ($< 300\mu\text{s}$) et de « puissance » pyrotechnique délivrée par rapport aux puces sur substrat Pyrex, en bon accord avec les simulations réalisées au chapitre 2. La capacité de ces puces à initier des charges relais inflammables et propulsives a de plus été prouvée par des essais de tirs en bombe manométrique. Leur comportement après agressions environnementales a été évalué et montre que le taux de réussite aux essais de tir reste de 100% avec une diminution maximale de 30% de la « puissance » délivrée lors de l'initiation.

En résumé, ce travail de thèse financé par le CNES et Dassault-Aviation a permis de réaliser un premier prototype d'Initiateur à Fonctions Intégrées validant en grande partie nos choix technologiques. Bien entendu, des travaux sont encore nécessaires pour permettre à l'IFI de répondre complètement à son cahier des charges.

Un point crucial à développer consiste à produire une détonation avec l'IFI. L'option que nous proposons consiste à utiliser les puces de conversion électro-pyrotechnique pour allumer un générateur de pression capable de décrocher et mettre en vitesse un impacteur MEMS capable d'initier un explosif secondaire en détonation au travers d'une barrière de sécurité d'armement. Il s'agit ici d'une amélioration du brevet Dassault-Aviation EP Patent 2103896 A1, puisque nous cherchons ici à miniaturiser le dispositif déjà décrit en 2007. L'utilisation de ces détonateurs MEMS intégrés à l'IFI présente de nombreux avantages puisque cette solution permet de conserver toutes les propriétés de l'IFI, à savoir la testabilité, le fonctionnement sur stockage local d'énergie, la compatibilité REACH, la miniaturisation... De plus, la réalisation d'un détonateur sans primaire permettrait de garantir un niveau de sécurité bien supérieur à ceux actuellement disponibles. Enfin, la réalisation en technologie MEMS de ce détonateur permettrait une fabrication collective, mais aussi d'atteindre de très faibles dimensions. Un impacteur de quelques microns d'épaisseur aurait alors une très faible inertie et il serait alors plus simple d'atteindre les vitesses de plusieurs centaines de m/s nécessaires à une initiation par impact.

Un second point de développement important pour l'IFI consiste à simplifier les étapes d'assemblages et d'intégration sur lesquels nous avons buté. Nous avons pu nous rendre compte dans le chapitre 3 que les très faibles dimensionnalités du système ne permettent pas d'interconnecter simplement les différents modules de l'IFI. Nous proposons différentes voies de simplification concernant ces assemblages :

- Tout d'abord, nous proposons d'intégrer dans le même bloc le moteur d'armement mécanique et les contacts électriques de type tulipes et les contacts à ressorts. L'interconnexion entre le moteur et les tulipes serait alors réalisée par wire-bonding à la fabrication. De plus, l'encapsulation du moteur dans un bloc polymère permettrait de supprimer le boîtier du moteur, permettant de gagner alors quelques millimètres, à l'origine d'une plus grande souplesse dans le positionnement des contacts. Pour simplifier l'intégration de la plateforme porte puce sur l'axe du moteur, l'axe présenterait un méplat ou une section étoilée permettant un accouplement mécanique bien plus fiable que le collage. Des discussions ont été engagées avec le fabricant du moteur (Faulhaber) pour réaliser ce type de structures.
- Concernant la plateforme PCB porte puce, une solution de simplification des assemblages consiste à réaliser l'intégralité de cette plateforme en technologie silicium. Les puces de conversion électro-pyrotechnique seraient réalisées en face avant, et les pistes en face arrière par métallisation classique (évaporation,

pulvérisation...)). La reprise de connexion entre la face avant et la face arrière serait réalisée par des vias métallisés réalisés par gravure profonde du silicium puis par métallisation PVD ou électrochimique. Le trou central permettant l'accouplement avec l'axe du moteur serait lui aussi réalisé en gravure DRIE et pourrait alors présenter un méplat ou une section étoilé correspondant exactement à celle de l'axe moteur. Lors de cette même étape de DRIE, les plateformes sur silicium seraient alors discrétisées. Cette solution permettrait de s'affranchir des étapes de découpe et de report de puces sur PCB, de wire-bondings et de collage sur l'axe du moteur, et permettrait de réaliser les plateformes de manière collective, et donc moins chère, plus fiable et plus industrielle.

Le troisième point de développement à réaliser sur l'IFI consiste à valider l'électronique de commande et plus généralement l'architecture pyro-numérique. Nous avons pu dans cette thèse montrer la faisabilité du système, nous devons maintenant confirmer ces résultats par des essais à plus grande échelle. En effet, il nous faut montrer la fiabilité d'un tel système pour un réseau d'abonnés plus nombreux, analyser le comportement du réseau en cas de conflits entre différents messages ou encore en mode dégradé en cas de panne. La réalisation de tous ces essais permettra de définir le system-on-chip pour, à terme, disposer d'une électronique miniature intégrée au corps de l'IFI.

Au-delà des perspectives applicables directement à l'IFI, ces travaux ouvrent la porte à d'autres développements. On peut par exemple imaginer des fonctions terminales intelligentes intégrant directement leur adresse numérique, des fonctions de tests, voir même des sécurités additionnelles pour les fonctions critiques. Ces équipements pourraient de plus être simplifiés par rapport à ceux déjà existants, puisque le signal pyrotechnique d'entrée ne serait pas nécessairement détonique. Ainsi certaines fonctions n'auraient plus besoin de systèmes d'amorces à percussion pour convertir le signal détonique en flamme puis en pression, mais intégreraient directement un générateur de gaz et une interface de raccord pour inflammateur ou étoupille. Ces simplifications se traduiraient alors par un coût moins important, une fiabilité accrue, et potentiellement une réduction de masse et de volume.

En plus des activités spatiales, les développements technologiques apportés par ces travaux pourraient trouver d'autres domaines d'applications comme par exemple l'automobile, l'aéronautique, le minage, l'artifice civil, ou encore l'armement. L'architecture pyro-numérique pourrait, par exemple, être envisagée comme solution de remplacement des systèmes classiques utilisés pour l'éjection des pilotes d'avions de chasse, ou encore pour le déclenchement d'extincteurs dans les réacteurs. Le BSA présent dans l'IFI pourrait être adapté au STANAG 4187 pour répondre aux besoins du monde militaire et ainsi être utilisé dans les munitions. Les puces de conversion électro-pyrotechniques ayant démontré leur capacité à initier des charges inflammables et propulsives, elles pourraient être adaptées pour l'initiation d'artifices, d'airbags, ou

encore en tant que solution de protection anti « reverse-engineering » permettant alors l'autodestruction de composants électroniques.

Il apparait à la fin de ces travaux que la recherche dans ce domaine n'en est encore qu'à ses débuts et que les possibilités offertes par la micro-pyrotechnie sont loin d'être complètement exploitées. Mon souhait est évidemment de poursuivre mon activité dans ce domaine et voir un jour ces technologies appliquées sur un produit industriel, pourquoi pas Ariane 6 ?

ANNEXE 1 : QUELQUES NOTIONS DE PYROTECHNIE

Les matériaux énergétiques libèrent leur énergie lors d'une réaction chimique très rapide. Ces réactions peuvent être une décomposition chimique, ou bien une réaction d'oxydoréduction :

- Décomposition de l'hexogène : $C_3H_6N_6O_6 \rightarrow 3 CO + 3 H_2O + 3 N_2$
- Oxydoréduction d'une thermite : $2 Al + 3 CuO \rightarrow 2 Al_2O_3 + 3 Cu$
 - Oxydation de l'aluminium : $2 Al + 3 O^{2-} \rightarrow Al_2O_3 + 6 e^-$
 - Réduction de l'oxyde de cuivre : $CuO + 2 e^- \rightarrow Cu + O^{2-}$

Ces réactions chimiques nécessitent une énergie d'activation pour avoir lieu (voir Figure 107). Dans le cas des matières pyrotechniques, l'énergie libérée lors de la réaction d'une molécule (température, pression) permet à la molécule voisine de réagir en lui permettant de passer cette énergie d'activation. On parle alors de réaction auto-entretenu. La zone de réaction est couramment appelée flamme.

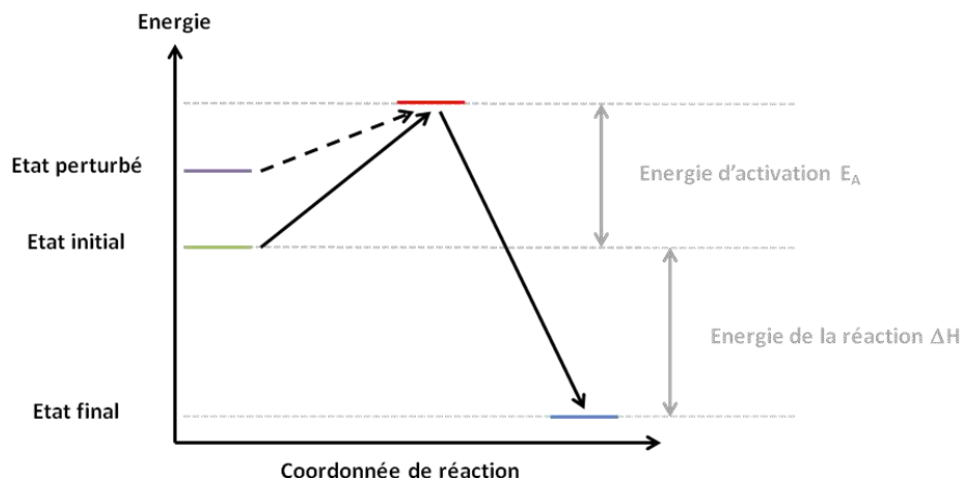


Figure 107. Variation de l'énergie au cours de la réaction chimique

La vitesse de réaction augmente avec la température selon la loi d'Arrhénius :

$$\ln(k) = \frac{-E_A}{R \cdot T} + A \text{ avec}$$

k	la constante de vitesse de la réaction
E_A	l'énergie d'activation de la réaction
R	la constante des gaz parfaits
T	la température
A	une constante dépendant de la réaction

Équation 4. Loi d'Arrhénius

Les matériaux énergétiques peuvent réagir selon trois modes différents correspondants à trois phénomènes physiques différents :

- La combustion
- La déflagration
- La détonation

La combustion est une réaction qui se transmet par **conductibilité thermique**. Lorsqu'une particule brûle, elle chauffe les particules voisines jusqu'à leur température d'auto-inflammation (apport d'énergie supérieur à l'énergie d'activation). **La vitesse de propagation de la flamme est inférieure à la vitesse du son dans l'air, soit $v < 334$ m/s.**

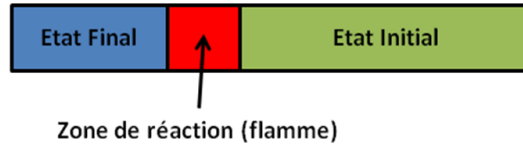


Figure 108. Schéma de principe de la combustion

La déflagration est semblable à la combustion (se transmet par **conductibilité thermique**), à la différence que la réaction est aussi à **l'origine d'une onde de pression** pouvant atteindre plusieurs milliers de bars. Cette onde de pression apporte de l'énergie (pression et chaleur) à la composition pyrotechnique, sans dépasser l'énergie d'activation (état perturbé). L'énergie nécessaire pour permettre la réaction est donc moins importante, ce qui correspond à une cinétique de réaction plus rapide. **La vitesse de propagation du front de flamme est cette fois supérieure à la vitesse du son dans l'air, soit $v > 334$ m/s.** La déflagration est un régime obtenu fréquemment par confinement d'une matière pyrotechnique.

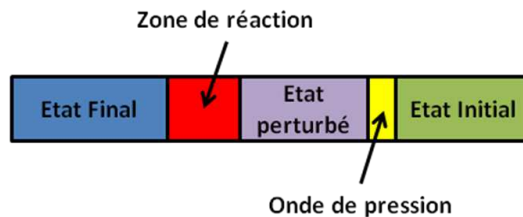


Figure 109. Schéma de principe de la déflagration

La détonation est une réaction qui se **transmet par l'intermédiaire d'une onde de choc**. Lorsque l'onde de choc traverse une particule, celle-ci subit une rapide compression locale à l'origine d'un échauffement brutal de la matière. Une auto-explosion de la particule à lieu, dégageant l'énergie sous la forme d'une onde de pression. **La vitesse de propagation de l'onde de choc, et donc celle de la flamme, est supersonique dans le matériau énergétique et se situe entre 1500 et 9000m/s.** La détonation est obtenue à partir d'une composition pyrotechnique de type explosif.

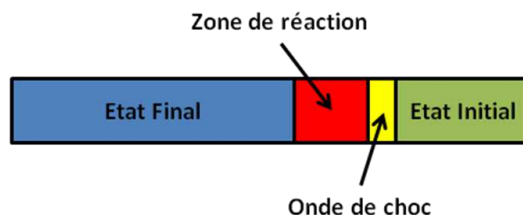


Figure 110. Schéma de principe de la détonation

Les explosifs sont divisés en deux catégories en fonction de leur sensibilité :

- **Explosif primaire :**
Matériau pyrotechnique extrêmement sensible dont le mode de décomposition ne peut être que la détonation.

- **Explosif secondaire :**
Matériau pyrotechnique bien plus stable qu'un primaire. Il ne détone que s'il est attaqué par une onde de choc. S'ils sont attaqués par d'autres modes de combustion, les explosifs secondaires vont alors se décomposer dans un régime de déflagration ou de combustion. Un explosif secondaire est classiquement initié par un explosif primaire ou un dispositif capable de générer une onde de choc (fil explosé, percuteur...).

ANNEXE 2 : RECUEIL DES EXIGENCES DE SECURITE

Les exigences de sécurité répertoriées correspondent aux règles définies dans l'arrêté CNES/P N°2010-1 du 9 décembre 2010 portant sur la Réglementation de l'Exploitation des Installations du Centre Spatial Guyanais L208-518 [24].

Les exigences générales sont les suivantes :

- Pour les activités présentant des risques à conséquence grave, le critère de la panne unique doit être respecté. Aucune défaillance (panne simple ou erreur humaine) ne doit présenter de risque à conséquence grave ou a fortiori catastrophique (caractère dit « Fail Safe » ou FS).
- Pour les activités présentant des risques à conséquence catastrophique, le critère de la double panne doit être respecté. Aucune combinaison de deux défaillances (panne ou erreur humaine) ne doit présenter de risque à conséquence catastrophique (FS/FS ou FO/FS).
- Des barrières de sécurité sont exigées pour les circuits ou systèmes à risques pouvant être activés intempestivement, soit par défaillance matérielle, soit par erreur humaine. Leur nombre minimal dépend de la gravité de l'événement redouté :
 - trois barrières pour un événement à conséquence catastrophique,
 - deux barrières pour un événement à conséquence grave.
- Pour les circuits ou systèmes à risques, l'organe situé sur ledit circuit ou système, qui commande le passage du courant, est considéré comme une barrière.
- Les barrières s'opposant à un même événement redouté sont indépendantes et, si possible, de natures différentes. Elles peuvent être de nature mécanique, électrique, logicielle ou être des procédures lorsque des barrières physiques sont technologiquement impossibles. Les procédures de mise en œuvre des barrières ne doivent pas permettre que plusieurs barrières d'un même circuit ou système soient levées simultanément.
- Pour les circuits ou systèmes dont les risques sont à conséquence catastrophique, l'entité de sauvegarde de l'établissement doit disposer:
 - d'une part, de la commande d'une des barrières ou de l'interdiction de levée de celle-ci,
 - d'autre part, du compte-rendu d'état de la barrière concernée. Cette barrière est dénommée « interception ».

- L'interception ne doit pas pouvoir être techniquement surpassée. Une absence d'énergie dans les circuits d'une interception ne doit pas faire changer l'état du système ou du circuit. Après levée de l'interception et exécution de la commande, la remise en place de cette interception ne doit avoir aucune action sur le circuit ou système considéré.
- Les initiateurs pyrotechniques (inflammateurs, amorces-détonateurs) doivent procurer un niveau de sécurité au moins équivalent à ceux de type « 1A, 1W, 5min non feu ».
- L'intensité délivrée par les équipements de contrôle des dispositifs électro-pyrotechniques est telle qu'il ne puisse se produire d'amorçage intempestif ou de flegmatisation de l'initiateur. L'intensité de contrôle est limitée à au moins 20dB en-dessous du courant maximal de non feu.
- La mise en place des électro-détonateurs et/ou le raccordement des chaînes électro-pyrotechniques classées à risque doit se faire le plus tard possible dans la séquence de préparation du lanceur [...]. Dès leur raccordement, l'entité de sauvegarde de l'établissement doit pouvoir avoir accès au contrôle de l'état des chaînes pyrotechniques.
- Pour les systèmes pyrotechniques présentant un risque à conséquence catastrophique, la barrière à proximité de la source de risque est obligatoirement constituée d'une barrière mécanique (le boîtier de sécurité et d'armement) qui doit empêcher la mise à feu intempestive du système.

Les boîtiers de sécurité et d'armement sont réalisés de telle sorte que :

- La barrière une fois positionnée dans un des états « armé » ou « désarmé », ne puisse pas quitter cette position en l'absence de commande ou sous l'effet d'une sollicitation extérieure (chocs, vibrations, phénomène électrostatique, etc.) dans un environnement normal ou accidentel.
- Le compte rendu d'état de positionnement soit représentatif de l'état réel « armé » ou « désarmé » et puisse être déporté.
- L'état « armé » ou « désarmé » soit visualisé par un indicateur physiquement lié au dispositif d'interception.
- Ils soient commandés à distance mais qu'un désarmement manuel soit toujours possible.
- Le montage du détonateur soit impossible physiquement si le boîtier n'est pas en position « désarmé ».
- L'implantation des boîtiers de sécurité et d'armement doit permettre un accès facile pour le montage et le raccordement des détonateurs et le désarmement manuel. Les boîtiers de sécurité et d'armement sont en position de sécurité en présence de personnel. Cette position de sécurité doit pouvoir être contrôlée pour s'assurer de l'état du système.

ANNEXE 3 : RECUEIL DES EXIGENCES DE TENUE AUX ENVIRONNEMENTS

Les exigences de tenue aux environnements répertoriées sont issues spécifications de qualification et réception des équipements lanceur (A5-SG1-40-ASAI).

Les exigences de tenue aux environnements climatiques sont décrites dans le Tableau 20:

Type d'agression climatique	Définition
Froid	équipements généraux: sévérité 1 -20°C t >5h Vmax < 3°C/min
	équipements en contacts direct avec des ergols cryogéniques sévérité 2 limite du domaine >10 heures Vmax <3°C/min
	équipements peu dissipatifs soumis a des phases balistiques: sévérité 3 -30°C t >5h Vmax <3°C/min
	équipements dans des inter-étages cryogéniques : sévérité 3 -30°C t >5h Vmax <3°C/min
Chaleur sèche	tous les équipements: sévérité 1 +75°C > 5h
	équipements moteur: sévérité 2 valeur limite du domaine > 2h
Chaleur Humide	tous les équipements: 2 cycles (20-->35°C en 6h+12h 0 35°C+35->20°C 3h +20°C 6h à 93% HR)
Cyclage air humide	tous les équipements: 40 cycles (21-33°C/ 1h*1h 100% HR)
Choc thermique	Matériel en contact avec les ergols Cryogéniques: sévérité 2 20°C 5h - valeur limite 10min
	Matériels Moteur: sévérité 3 20°C 5h +valeur limite 10min
	Autres matériels : sévérité 1 20°C 5h +70°C 10min
Vide	matériel électrique ou électronique et boîtier ou capacités étanches: 1000 à 10⁻⁵ mbar >30 minutes
Vide thermique transitoire	matériels devant supporter la phase balistique: 10⁻⁵mbar + Flux thermique
Brouillard salin	matériel soumis directement a l'environnement naturel du CSG: 2 fois 24h d'exposition à 24h d'intervalle
Pluie	Les matériels qui peuvent être exposés à la pluie lors du stockage ou du transport ou en fonction de leur position sur le lanceur : 10 minutes sous 10 centimètre d'eau distillée

Tableau 20. Exigences de tenue aux environnements climatiques

Les exigences de tenue aux environnements mécaniques sont décrites dans le Tableau 21:

Type	Application	Paramètres		
		Gamme de fréquence	niveau	vitesse
Vibrations sinusoïdale	Recherche de fréquence critique	5-13Hz	3 mm	2 oct/min
		13-50Hz	2g	
		50-2000Hz	2.5g	
	Tenue aux vibrations lanceur	5-16Hz	10mm	1/3 oct/min
		16-60Hz	10g	
		60-70Hz	22.5g	2 oct/min
		70-200 Hz	22.5g	
		200-2000 Hz	10g	
	Transport	0.5-5Hz	10mm	1 oct/min
		5Hz-300Hz	1g	
Vibration aléatoire	Matériel commun à tous les étages	20-2000Hz	20g eff	4min/axe
		20 Hz	0.0913g ² /Hz	
		20-60Hz	3 db	
		60-1000Hz	0.273g ² /Hz	
		1000-2000Hz	6 db	
Vibration acoustique	Equipements de grandes dimensions	sévérité définie au cas par cas avec l'architecte industriel		
Choc moyen	Tout matériel, mais pas indispensable au matériel soumis aux chocs Pyrotechniques		50g demi sinus	11 ms
Chocs Pyrotechniques	Matériel à proximité d'équipements pyrotechniques	fréquence	niveau	pente
		200-700Hz	430-1900g	7.4
		700-1100Hz	1900-2380g	2.7
		1100-2200Hz	2380-7930g	10.5
		2200-3500Hz	7930g	0
		3800-4100Hz	7930-4760g	-18.4
4100-25000Hz	4760g	0		
Accélération constante			7.5g	180s

Tableau 21. Exigences de tenue aux environnements mécaniques

ANNEXE 4 : LES DIFFERENTES SOLUTIONS D'ADRESSAGE DES INITIATEURS

Il existe différentes solutions permettant de donner une adresse numérique aux initiateurs connectés sur le bus. Il est possible de :

Programmer l'adresse dans l'initiateur à la fabrication :

- Avantages : Simple et Fiable
 - C'est un moyen simple puisqu'une adresse est programmée en « dur » en EPROM ou ROM sur chaque initiateur.
 - Cette solution est fiable car il n'y a pas de risque de mauvaise lecture et l'adresse est contrôlable en usine.
- Inconvénients : Manque de souplesse
 - Les adresses sont programmées en « dur » dans le contrôleur. Un changement d'initiateur impose une modification du logiciel et donc une revalidation.
 - Le logiciel est spécifique à chaque configuration

Programmer l'adresse dans l'initiateur à l'installation :

- Avantages : Simple et Fiable
 - C'est un moyen simple puisqu'une adresse est programmée en RAM chaque initiateur lors de sa mise en place via l'interface bus
 - Cette solution est fiable car il n'y a pas de risque de mauvaise lecture et l'adresse est contrôlable au moyen de l'outil de programmation
 - Le logiciel du contrôleur est stable et il n'y a pas besoin de revalider en cas de changement d'initiateur
- Inconvénients : Manque de souplesse
 - Un changement d'initiateur impose une opération de reprogrammation de l'initiateur
 - Nécessité de disposer d'un outil de programmation
 - Risque d'erreur de programmation

Programmer l'adresse par le connecteur :

- Avantages :
 - Banalisation des initiateurs
 - L'affectation de l'adresse se fait par le connecteur
 - Contrôlable au moyen de l'outil de contrôle du connecteur
 - Un changement d'initiateur n'impose pas une opération de reprogrammation de l'initiateur
 - Logiciel du contrôleur stable pas de revalidation en cas de changement d'initiateur
- Inconvénients :
 - Risque d'interversion des connecteurs si ceux-ci sont physiquement proches
 - Interface électrique de l'initiateur complexifiée → augmentation de taille

Programmer l'adresse par la fonction terminale :

- Avantages :
 - Banalisation des initiateurs
 - L affectation de l'adresse se fait par le montage de l'initiateur sur la fonction terminale
 - Un changement d'initiateur n'impose pas une opération de reprogrammation de l'initiateur
 - Logiciel du contrôleur stable pas de revalidation en cas de changement d'initiateur
- Inconvénients :
 - Intégrer dans l'initiateur un moyen de lecture de l'adresse de la fonction terminale (lecteur de puce)

ANNEXE 5 : STRATEGIE DE CHARGE DU CONDENSATEUR DE STOCKAGE LOCAL D'ENERGIE

Pour la charge d'un condensateur de stockage, deux stratégies différentes sont comparées, mettant en évidence leurs propriétés du point de vue énergétique.

- La première de ces méthodes est celle du couplage direct d'une source de tension. Cette méthode est appelée « charge exponentielle ».
- La deuxième méthode, appelée « charge à courant constant », fait appel à un circuit d'électronique de puissance. Cette méthode est appelée charge linéaire.

Charge à tension constante ou charge exponentielle :

Dans le cas de la charge exponentielle, il faut tenir compte de la présence de la résistance interne R du condensateur : on se retrouve dans le cas classique du rendement pauvre de 50%, indépendamment de la valeur de la résistance.

En effet, pour une tension de charge E , la tension aux bornes du condensateur est :

$$V = \frac{Q}{C} = \frac{I \cdot t}{C}$$

La différence de potentiel aux bornes de la résistance est :

$$E - V = R \cdot I$$

Le courant de charge répond alors à la loi :

$$I = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{RC}}$$

On atteint alors 99% de charge pour $t = 5 RC$. Durant cette phase de charge, le bilan d'énergie s'établit ainsi :

La source perd (énergie consommée) :

$$\int_0^{\infty} E \cdot I dt = \int_0^Q E dq = E \cdot Q$$

L'énergie stockée par le condensateur est (énergie utilisable) :

$$\int_0^{\infty} V \cdot I dt = \int_0^Q V dq = \int_0^E C \cdot V dV = \frac{1}{2} E \cdot Q$$

Le rendement énergétique η d'une charge exponentielle est donc majoré par 0,5 :

$$\eta = \frac{\text{Energie utilisable}}{\text{Energie consommée}} = \frac{1}{2}$$

Charge à courant constant ou charge linéaire :

Pour le cas de la charge à courant constant, le rendement du transfert d'énergie peut prendre des valeurs proches de l'unité, à condition de maintenir le courant à une valeur faible. Une augmentation du courant de charge permet une diminution du temps de transfert, mais augmente les pertes sur la résistance interne et affecte le rendement.

La charge de la capacité s'écrit :

$$Q = I \cdot t_1 = C \cdot V$$

La quantité d'énergie perdue dans la résistance R pendant ce cycle de charge est :

$$E_r = \int_0^{t_1} R \cdot I^2 dt = R \cdot I^2 \cdot t_1 = C \cdot V \cdot R \cdot I$$

On veut que le rendement soit de η . On pose :

$$C \cdot V \cdot R \cdot I = (1 - \eta) \frac{C \cdot V^2}{2}$$

On obtient alors le rendement en fonction du courant :

$$\eta = 1 - \frac{2 R \cdot I}{V}$$

On observe qu'en ajustant I, on ajuste le rendement. Si l'on prend $\eta = 90\%$ soit 10% de pertes, on atteint la charge complète au bout de $20RC$, soit 4 fois le temps nécessaire à tension constante mais avec seulement 10% de perte par rapport à 50% (soit un rendement de 90% au lieu de 50%).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] C. Rossi, D. Estève, Micropyrotechnics, a new technology for making energetic microsystems: review and prospective, *Sensors and Actuators A120/2* (2005) 297-310
- [2] C. Rossi, Conception et réalisation d'un système de réhydratation pour patch transdermique à partir de micro actionneurs pyrotechniques, Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, Toulouse, 1997
- [3] B. Larangot, Conception, fabrication et caractérisation de matrices de micropropulseurs pyrotechniques sur silicium, Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2004
- [4] A. Chaalane, Microsystème de propulsion à propergol solide sur silicium : Application au contrôle d'assiette de microdrone, Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2008
- [5] P. Pennarum, Conception et intégration d'un micro-initiateur sécurisé à base de micro-interrupteurs pyrotechniques sur silicium, Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, Toulouse, 2006
- [6] H. Pezous, Conception et intégration en technologie MEMS d'un micro-amorce sécurisée, Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2009
- [7] G. A. Ardila Rodriguez, Conception, simulation et réalisation d'un micro actionneur à base de matériau énergétique pour l'actionnement, Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2008
- [8] M. PETRANTONI, Nanomatériaux énergétiques sur puce : élaboration, modélisation et caractérisations, Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2010
- [9] R. Fulcrand, A. Bancaud, C. Escriba, Q.H. He, S. Charlot, A. Boukabache, A.M. Gue, *Sensor Actuat-Chem*, 160 (2011) 1520-1528.
- [10] Olivier Huwart, *Du V2 à Véronique : la naissance des fusées françaises*, Marines, 2005, ISBN 2-915379-19-X
- [11] NSSDC ID : 1965-096A
- [12] NSSDC ID : ARIANV1
- [13] NSSDC ID: 1979-104A
- [14] Historique des lancements de 1979 à 2013, CNES CSG
- [15] Rapport Annuel 2011 Arianespace
- [16] Christian Lardier, « Lanceurs : la guerre des prix », *Air & Cosmos*, N° 2170, Mai 2009

-
- [17] Communiqué de presse de l'ESA N°37-2012
- [18] NSSDC ID : 2001-055A
- [19] NSSDC ID : 2006-016A
- [20] NSSDC ID : 2006-063A
- [21] NSSDC ID : 2008-032A
- [22] NSSDC ID : 2009-059A
- [23] C. Rossi, M. Djafari Rouhani, D. Estève, Prediction of the performance of a Si-micromachined microthruster by computing the subsonic gas flow inside the thruster, *Sensors & Actuators A* 87, pp96-104, 2000
- [24] MICROPYROS- Development of an emerging technology based on Micropyrotechnics. Applicative exploration of Energetic Microsystem, projet européen piloté par le LAAS, IST 1999 - 29047
- [25] Christophe Talbot (CNES), Pilar Gonzalez Gotor, Alejandro Ruiz Merino (CDTI), Ludger Froebel (DLR). 7th Responsive Space Conference, April 27–30, 2009 - Los Angeles, CA
- [26] Arrêté CNES/P N°2010-1 du 9 décembre 2010
- [27] NATO STANAG 4187: Fuzing Systems - Safety Design Requirements
- [28] S. Phelep, T. Nguyen, Method of producing an electropyrrotechnic interface between an electro-thermal bridge and a primary composition inside an initiator, WO Patent number 2006/051199A1, 2006
- [29] C. Rossi, P. Temple-Boyer, and D. Esteve, *Realization and performance of thin SiO₂/SiNx membrane for microheater applications*. *Sensors and Actuators a-Physical*, 1998. **64**(3): p. 241-245
- [30] Tanaka, S., et al., *Test of B/Ti multilayer reactive igniters for a micro solid rocket array thruster*. *Sensors and Actuators a-Physical*, 2008. **144**(2): p. 361-366
- [31] R. W. Bickes, Jr., A. C. Schwarz, "Semiconductor Bridge (SCB) Initiator," U.S. Patent Number 4,708,060, 1987
- [32] F.N. Mandigo, G. C. Mei, J. C. Fister, Semi Conductor Bridge packaging system, US Patent Number 5,029,529, 1991
- [33] Benson, D. A., et al., *Semiconductor Bridge – a Plasma Generator for the Ignition of Explosives*. *Journal of Applied Physics*, 1987. **62**(5) : p. 1622-1632

- [34] P. Wilson, K. L. Gray, Non-explosive two component initiator, EP Patent number 1 662 224 A1, 2005
- [35] Cooper, Paul W. (1996). "Exploding bridgewire detonators". *Explosives Engineering*. Wiley-VCH. pp. 353–367. ISBN 0-471-18636-8
- [36] J.R. Stroud, A new kind of detonator-the slapper, UCRL-7739, Lawrence Livermore Laboratory report, 1976
- [37] James M. Barker, Exploding foil initiator using a thermally stable secondary explosive, US Patent 5,431,104, 1995
- [38] Brett Rice, Explosive foil initiator and method of making, US Patent 8,281,718 B2, 2012
- [39] C. Rivière, E. Poulard, Initiateur électro-pyrotechnique sécurisé à haute énergie, EP Patent Number 1 172 628 A2, 2001
- [40] A. Stepanski, Paillet and detonator without primary explosive comprising such a paillet, EP Patent 2103896 A1
- [41] Daniel Jean, MEMS Micro-Detonator Based Fuzing, Naval Surface Warfare Center, Indian Head, MD
- [42] C. Rossi, N. Larangot, D. Lagrange, A. Chaalane, Final characterizations of MEMS-based pyrotechnical microthrusters *Sensors & Actuators A* 121, pp508-514, 2005
- [43] B. S. Bockmon, M. L. Pontoya, S. F. Son, B. W. Asay, and J. T. Mang, Combustion velocities and propagation mechanisms of metastable interstitial composites, *J. Appl. Phys.* **98**, 064903 (2005)
- [44] C. Rossi, K. Zhang, D. Esteve, P. Alphonse, P. Tailhades, and C. Vahlas, Nanoenergetic Materials for MEMS : A review, *J. Microelectromech. Syst.* **16**(4), 919 (2007)
- [45] H. L. Grant, A. Djidics, Electric Detonator, US Patent Number 1,516,009,1924
- [46] R. L. Allen, Safe Arm Initiator, US Patent Number 3,658,009,1972
- [47] P. Magnan, R. Lafont, Dispositif de sécurité pyrotechnique à écran micro usiné, Brevet Européen Numéro 1 780 496 A1, 2007
- [48] H.Pezous, C.Rossi, M.Sanchez, F.Mathieu, X.Dollat, S.Charlot, L.Salvagnac, V.Conedera, Integration of a MEMS based Safe Arm and Fire device, *Sensors and Actuators A: physical* , Vol.159, N°2, pp.157-167, Mai 2010
- [49] W. O. Maruska, M. A. Bayerkohler, Safing and arming mechanism, US Patent Number 4,770,096,1988
- [50] Projet DGA REI micro initiateur n°0634042

- [51] M. Worthington, Safety and arming apparatus and method for a munition, US Patent Number 7,258,068,2007
- [52] J. D. Titus, P. E. Hall, Electro-Explosive safety and arming device, US Patent Number 4,691,634,1987
- [53] D. S. Lenko, T. P. Frederik, Miniature, low power, electromechanical safety and arming device, US Patent Number 5,594,195,1997
- [54] W. J. Donahue, D. L. Blanchard, J. M. Wack, Fuze Arming device, US Patent Number 3,670,656,1972
- [55] S. H. Fishcher and M.C. Grubelich, Conference : 24th International Pyrotechnics Seminar, Montrey, CA, 27-31 July (1998)
- [56] S. M. Umbrajkar, M. Schoenitz, E. L. Dreizin, Exothermic reactions in Al-CuO nanocomposites, *Thermochim. Acta* 451, 34-43 (2006)
- [57] K. J. Blobaum, A. J. Wagner, J. M. Plitzco, D. Van Heerden, D. H. Fairbrother, T. P. Weihs, Investigating the reaction path and growing kinetics in CuOx/Al multilayer doils, *J. Appl. Phys.* 94(5), 2923-2929 (2003)
- [58] A. Bertsch, H. Lorenz, P. Renaud, 3D microfabrication by combining micro stereolithography and thick resist UV lithography, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 73, Issues 1-2, 9 March 1999, p14-23
- [59] M. Petrantoni, C. Rossi, L. Salvagnac, V. Conedera, C. Tenailleau, P. Alphonse, K. Zhang, Multilayered Al/CuO thermite by reactive magnetron sputtering: nano versus micro, *Journal of Applied Physics*, Vol.108, N°8, 084323p.
- [60] Joachim Charzinski, Performance of the Error Detection Mechanisms in CAN, 1st International CAN conference, 1994