Développement d'un système d'initiation pyrotechnique, sécurisé, autonome, intelligent et intégrant des nanothermites

Jean-Laurent Pouchairet

▶ **To cite this version:**

Jean-Laurent Pouchairet. Développement d'un système d'initiation pyrotechnique, sécurisé, autonome, intelligent et intégrant des nanothermites. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. INSA de Toulouse; Lacroix-Défense, 2019. Français. NNT : 2019ISAT0001 . tel-02089163v2

HAL Id: tel-02089163

https://laas.hal.science/tel-02089163v2

Submitted on 26 Mar 2019

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 FÉDÉRALE TOULOUSE MIDI-PYRÉNÉES

Délivré par :
l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA de Toulouse)
Cotutelle *Lacroix-Défense*

Présentée et soutenue le *14/02/2019* **par :**

JEAN-LAURENT POUCHAIRET RAMONA

Développement d'un système d'initiation pyrotechnique, sécurisé, autonome, intelligent et intégrant des nanothermites.

JURY

PROF. MICHEL ARRIGONI	Rapporteur
PROF. MARC BELLENOUE	Rapporteur
PROF. DANIELA DRAGOMIRESCU	Membre du Jury
DR. ERIC LAFONTAINE	Membre du Jury
DR. DOMINIQUE MEDUS	Membre du Jury
DR. CAROLE ROSSI	Membre du Jury
DR. ALAIN ESTÈVE	Invité

École doctorale et spécialité :
GEET : Micro et Nanosystèmes
Unité de Recherche :
LAAS-CNRS (UMR 8001)
Directeur(s) de Thèse :
Dr. Dominique Medus et *Dr. Carole Rossi*
Rapporteurs :
Prof. Michel Arrigoni et *Prof. Marc Bellenoue*

Remerciements

A tous ceux qui m'ont accompagné, soutenu, porté pendant ces trois ans.

A ma directrice et directeur de thèse, Carole Rossi et Dominique Medus qui m'ont offert l'opportunité de suivre cette thèse.

A Andréa Nicollet et Andrès Bellisario, sans les travaux et l'aide desquels ce manuscrit n'existerait même pas.

A Pierre Rivals, Marine Petrantonni, Thierry Secco, Caroline Lapeyre et Laurent Valencia pour avoir répondu à plus de questions que ce que la décence ne m'autorisait à poser.

A Marc Pignol, Mathieu Maggiolo, Olivier Vrammont et Solène Cuxac, dont les idées fleurissent ce manuscrit.

A tous ceux avec qui j'ai travaillé : Samuel Charlot, Mathieu Maupeu, Thierry Virenque, Lionel Truquet, Erwan Pellenec, Xavier Dollat, Daniel Médale, Xavier Bouquet, Mael Moguedet, ...

A tous ceux avec qui j'ai partagé ces trois ans : Guillaume, Mathilde, Titou, Pomme, Val, Hélène, Jo, Sylv, Thomas, Sarah, Emeric, Michel, Nicolas, Richard, Segolène, Jeremy, Ludo, Théo, Marion ...

A mes parents, mes grands parents, ma famille. Je vous aime.

Table des matières

Liste des principales abréviations **ix**

Introduction Générale **1**

1 Vers une nouvelle génération de leurres infrarouges intelligents : État de l'art et problématique **9**
1.1 Introduction . . . 10
1.2 Il était une fois ... La guerre électronique infrarouge . . . 10
1.3 Etat de l'art . . . 14
1.3.1 Leurres . . . 14
1.3.2 Systèmes pyrotechniques intelligents . . . 16
1.3.3 Inflammateurs . . . 18
1.3.4 Résumé . . . 21
1.4 Objectifs de la thèse . . . 21
1.5 Cahier des charges du système CASSIS . . . 22
1.5.1 Exigences fonctionnelles . . . 22
1.5.2 Contraintes, fiabilité et robustesse . . . 22
1.5.3 Résumé du cahier des charges . . . 23
1.6 Analyse fonctionnelle du système CASSIS . . . 23
1.6.1 Syntaxe, outils, méthode . . . 23
1.6.2 Modélisation fonctionnelle . . . 24
1.7 Conclusion . . . 28

2 Conception et développement du bloc fonction terminale **31**
2.1 Introduction . . . 32
2.2 Conception . . . 32
2.2.1 État de l'art de la génération de signal infrarouge pour systèmes de leurrage . . . 32
2.2.2 Recherche de solutions de contrôle de la combustion d'un pain infrarouge . . . 34
2.2.3 Initiation . . . 34
2.2.4 Propositions de solutions de bloc terminal contrôlable . . . 36
2.3 Prédimensionnement . . . 36
2.3.1 Description du modèle . . . 38
2.3.2 Résultats . . . 42
2.3.3 Discussion et conclusion . . . 49
2.4 Validation expérimentale . . . 50
2.4.1 Essais d'allumage de compositions d'initiation de pains IR à l'aide de micro-inflammateurs . . . 51
2.4.2 Essais d'allumage de pains IR semi-inertes à l'aide de micro-initiateurs . . . 55

2.4.3 Essais d'allumage de pains IR actifs à l'aide de micro-initiateurs 61
2.5 Conclusion 66

3 Conception et développement du bloc éjection 69
3.1 Introduction 70
3.2 Conception 70
3.2.1 État de l'art de l'éjection pyrotechnique pour leurres infrarouges 70
3.2.2 Recherche de solutions de contrôle d'un bloc d'éjection pyrotechnique à effet mortier 72
3.3 Prédimensionnement 79
3.3.1 Description du modèle 80
3.3.2 Détermination paramètres expérimentaux 83
3.3.3 Étude d'optimisation 84
3.3.4 Résultats 88
3.3.5 Discussion et conclusion 90
3.4 Validation expérimentale 92
3.4.1 Essai de tir de micro-inflammateurs en bombe manométrique 92
3.4.2 Essais de tir à l'air libres de filaments plastroniques 96
3.4.3 Essais de tirs d'impulseurs plastroniques triples en bombe manométrique 102
3.4.4 Essais de tir semi-dynamiques de cartouches intégrant un impulseur plastronique triple 106
3.5 Conclusion 110

4 Conception et développement du bloc électronique et sécurités 113
4.1 Introduction 114
4.2 État de l'art des systèmes de contrôle et de sécurisation des leurres . 114
4.3 Analyse fonctionnelle du bloc électronique et sécurités 116
4.4 Recherches de solutions technologiques pour le bloc électronique et sécurités de CASSIS 117
4.4.1 Armement 117
4.4.2 Gestion de l'énergie 118
4.4.3 Autotest 120
4.4.4 Contrôle/commande 120
4.5 Prototypage et validation de l'électronique 120
4.5.1 Prototypage virtuel 120
4.5.2 Plate-forme d'expérience 121
4.5.3 Module taille réelle 121
4.6 Conception et développement de la sécurité mécanique 123
4.6.1 État de l'art des sécurités mécaniques dans les leurres 123
4.6.2 Recherche de solutions de sécurités mécaniques 124
4.6.3 Concept retenu 129
4.6.4 Prototypage et validation expérimentale 129
4.7 Conclusion 132

5 Perspectives et intégration 135
5.1 Introduction . . . 136
5.2 Perspectives . . . 136
5.2.1 Bloc fonction terminale . . . 136
5.2.2 Bloc éjection . . . 139
5.2.3 Bloc électronique et sécurités . . . 141
5.3 Intégration . . . 142
5.4 Conclusion . . . 146

Conclusion générale 151

A Pseudocode du schéma d'ULTRA-BEE limité à la 3D 155

B Coefficients des RSM appliquées au modèle de balistique intérieure à paramètres globaux 157

C Plan de Doehlert 159

D Conditions initiales et limites 161
D.1 Modèle filament plastronique . . . 161
D.2 Insert sécurité mécanique . . . 161

E IHM LabView 163

Bibliographie 165

Liste des principales abréviations

BNP Bore-Nitrate de Potassium

CASSIS Controlable, Autonomous, Safe and Smart Initiation System

CFL Courant-Friedrich-Lewy

CNRS Centre National de la Recherche Scientifique

IFI Initiateur a Fonctions Intégrées

IMPYACT Innovative Microsystems for Pyrotechnic Applications of Combined Technologies

IR InfraRouge

LAAS Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes

MANPAD Man Portable Air Defense System

MEMS Micro Electro-Mechanical Systems

MTV Magnésium-Téflon-Viton

NEO Nano-Engineering of metal Oxides and their interfaces

NOTS Naval Ordnance Test Station

OTAN Organisation du Traité de l'Atlantique Nord

PCB Printed Circuit Board

PEP Propellants, Explosives, Pyrotechnics

PVC PolyChlorure de Vinyle

RLM Reichsluftfahrtministerium

RSM Response Surface Methodology

STANAG STandardization AGreement

UB Ultra-BEE

ZPP Zirconium-Perchlorate de Potassium

Introduction Générale

La pyrotechnie, l'étude des phénomènes de combustion, déflagration et détonation, est aussi vieille que la domestication du feu. Tous les effets pyrotechniques, depuis la flamme d'une bougie jusqu'à la détonation d'une charge d'hexogène, trouvent leur origine dans le même type de réaction chimique, les réactions exothermiques d'oxydoréduction. Selon la rapidité de la réaction et la nature des espèces mises en jeu, ces réactions libèrent de l'énergie sous diverses formes, thermique, d'onde de pression ou encore de radiation lumineuse. En cela, la pyrotechnie possède un vaste champ d'application, qui va de l'aérospatiale aux feux d'artifices, en passant par les avalancheurs et les chauffes-mains longue durée.

Durant le siècle dernier, l'essor de la chimie moderne a ouvert l'accès à un vaste choix d'oxydants, de réducteurs et d'additifs. Les compositions pyrotechniques se sont alors diversifiées, laissant bien souvent à l'Histoire le salpêtre, le souffre et le charbon. Les progrès dans ce domaine ont permis de développer des compositions plus énergétiques, qui émettent sur des bandes de fréquences plus étroites, qui génèrent plus de gaz, ou qui sont plus ou moins sensibles. En somme, des compositions plus performantes lorsqu'il s'agit de remplir des tâches spécifiques.

En parallèle, pour diversifier les fonctions réalisées lors de leur combustion, ces compositions se sont vues intégrées dans des systèmes de plus en plus complexes. Considérons, par exemples les initiateurs, systèmes pyrotechnique élémentaires intégrant une petite charge de composition sensible. Ils se situent en amont d'une chaîne pyrotechnique, un ensemble de composants combustibles, et ont pour vocation de transformer une énergie incidente en énergie pyrotechnique. A partir du milieu du XXème siècle, certains initiateurs ont commencé à devenir plus élaborés, intégrant tout d'abord un retard pyrotechnique, puis, plus tard, un retard électronique. De nos jours, les initiateurs les plus performants vont jusqu'à intégrer leur propre électronique de commande et de mise à feu, et peuvent être mis en réseau, permettant ainsi un contrôle et une sécurité accrus.

La démocratisation de la micro-électronique et des MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) a conduit au développement de systèmes pyrotechniques intelligents. Les têtes militaires, autrefois passives, intègrent aujourd'hui des systèmes de navigation, de détection et de décision. Pour autant, ces systèmes sont souvent aussi onéreux que volumineux. L'intégration de nouvelles fonctions dans les systèmes pyrotechniques de plus petite taille se heurte encore à un grand nombre de verrous technologiques :

Tout d'abord, s'il est acquis qu'intégrer de l'électronique de commande permet de contrôler un initiateur, peut-on pour autant contrôler des effets terminaux de combustion, en bout de chaîne pyrotechnique ?

Ensuite, même si l'électronique se miniaturise, les initiateurs pyrotechniques restent gourmands en énergie d'activation, pour des raison de sécurité, et donc en volume de stockage énergétique. Des initiateurs innovants, basse énergie, couplés à des sécurités électroniques pourraient-ils réduire la taille globale d'un système pyrotechnique tout en assurant le même niveau de sécurité et de fiabilité ?

Enfin, en admettant que l'on arrive à diminuer la taille des systèmes pyrotechniques, leurs interfaces restent volumineuses, peu fiables et peu reconfigurables. Comment ne pas perdre en interfaces ce que l'on aura pu gagner en développant des blocs technologiques innovants ?

C'est dans ce contexte qu'Etienne Lacroix, fabricant de systèmes pyrotechniques pour applications civiles et militaires, et l'équipe NEO du LAAS-CNRS, spécialiste des nanothermites et de leur intégration ont mis leur compétences en commun. Ils aspirent, au travers du laboratoire commun IMPYACT, au développement de blocs technologiques innovants qui permettront le développement de systèmes pyrotechniques de faibles dimensions intégrant de l'intelligence.

Cette thèse, qui s'intitule **"Développement d'un nouveau système d'initiation pyrotechnique, sécurisé, autonome, intelligent et intégrant des nanomatériaux énergétiques"**, a pour but de proposer et d'évaluer des solutions de micro-initiation intelligente. Elle doit conduire à la conception, au développement et à la validation de blocs technologiques innovants et versatiles.

Afin de se placer dans le cadre classique d'une analyse descendante, nous avons choisi de nous restreindre au développement d'un système d'initiation pour une application spécifique. Cette application devait être suffisamment complexe pour mettre en œuvre un maximum de fonctions intelligentes. Elle devait être symptomatique des problèmes présentés plus haut, être petite, posséder de fortes contraintes d'interfaces et de fortes exigences de sécurité. Elle devait enfin être suffisamment représentative pour que les résultats de ces travaux puissent être, sans trop de pertes, être étendus à d'autres systèmes. Sur cette base, nous avons choisi de travailler sur un leurre infrarouge (IR) au format 1"1"8".

Les plateformes militaires (avions, navires ...) peuvent être la cible de menaces (roquettes, missiles ...) capables de détecter leur signature infrarouge. Afin de s'en protéger, elles sont dotées de systèmes de leurrage infrarouge : lorsque la plateforme détecte une menace, elle transmet au système de leurrage l'ordre d'éjecter ses cartouches ; propulsées par effet mortier, elles quittent leur douille et s'éloignent de la plateforme. Une fois en l'air, elles initient le pain de composition infrarouge qu'elles contiennent. Ce pain, en brûlant, reproduit une signature infrarouge proche de celle de la cible, perturbant ainsi le guidage de la menace. De nos jours, les missiles sont devenus intelligents et intègrent des dispositifs de contre-contre-mesures, leur permettant de limiter ou d'annuler l'efficacité des systèmes de leurrage. De fait, si les

systèmes de leurrage veulent rester efficaces, ils doivent proposer des séquences de leurrage plus adaptées et moins prévisibles.

Cependant, le leurre est un objet passif et il faudrait pour ce faire développer, gérer et embarquer autant de types de leurres que d'effets désirés. De fait, le développement de leurres de nouvelle génération, aux réponses programmables est un enjeu d'avenir majeur pour l'autoprotection.

En synthèse, ce travail cherche à mettre à jour les technologies d'initiation des leurres infrarouge pour les rendre programmables tout en conservant, voire en améliorant, leur fiabilité et leur sécurité. Il s'inscrit dans la problématique plus large du développement de systèmes électro-pyrotechniques intelligents. Compte tenu des objectifs de performance, de fonctionnalisation et de miniaturisation attenants, des solutions technologiques innovantes devront être développées.

****

Ce mémoire s'articule en 5 chapitres

Dans le premier d'entre eux, nous détaillerons plus avant le contexte avant de dresser un état de l'art général du leurre infrarouge et des munitions intelligentes. Puis, nous construirons le cahier des charges de notre leurre intelligent. Fort de ces bases, nous mènerons une analyse fonctionnelle, formalisée à travers des diagrammes SysML, destinée à définir l'architecture de notre système. Elle s'articule autour de trois grands blocs, l'éjection, la fonction terminale et l'électronique/sécurité, que détaillent respectivement les trois chapitres suivants.

Dans le deuxième chapitre, nous détaillerons le développement d'une fonction terminale contrôlable. Nous y proposons et détaillons un concept d'allumage d'un pain pyrotechnique en 4 points à l'aide de micro-inflammateurs, de manière séquentielle et / ou partielle de manière à contrôler sa combustion. Nous avons développé un code de simulation de combustion 3D multi-composition, basé sur les méthodes de *level-set*. Nous l'exploitons pour simuler l'effet d'une initiation contrôlée électroniquement sur le signal infrarouge et pour valider de manière théorique notre concept. Nous détaillons enfin les résultats de plusieurs expériences qui nous ont respectivement servi à valider l'allumage de compositions pyrotechniques à l'aide de micro-inflammateurs, l'allumage séquentiel de pains, et le contrôle électronique du signal infrarouge correspondant.

Le troisième chapitre est consacré au développement d'un bloc d'éjection contrôlable. Nous avons choisi d'évaluer un concept de bloc d'éjection doté de trois chambres de combustion, initiées soit par filaments plastroniques, soit par micro-inflammateurs. L'idée étant que l'allumage d'une, deux ou trois chambres devrait

conduire à trois vitesses d'éjection différentes. Afin de prédimensionner ce bloc, nous avons implémenté un modèle de balistique intérieure à paramètres globaux sous Matlab. Nous exploiterons ce code grâce à la méthode des plans d'expérience et à une étude basée sur la *Response Surface Methodology* pour extraire des paramètres constructifs optimaux. Basé sur ces résultats, des prototypes ont été développés puis validés sous conditions atmosphériques, en bombe manométrique et sur des tirs représentatifs. Nous avons alors démontré que notre concept est viable, que l'allumage d'une ou deux chambres n'entraîne pas l'allumage des autres, et que l'on peut effectivement, de cette façon, piloter la vitesse d'éjection d'un leurre.

Le quatrième chapitre décrit le bloc électronique et sécurités. Il aborde la réalisation d'une première plate-forme d'essai sur table, dont l'architecture répond au STANAG 4187 (STandardization AGreement, document normatif OTAN), et sur laquelle différentes solutions technologiques ont été testées, notamment pour la gestion de l'énergie et les capteurs. Il détaille ensuite sa miniaturisation et sa validation fonctionnelle dans un bloc au format 1"1"2". Il expose enfin le développement d'une sécurité mécanique innovante, compatible avec l'électronique et les micro-inflammateurs.

Le cinquième et dernier chapitre conclut ce manuscrit en synthétisant les résultats de notre étude. Nous soulignons notamment les méthodes nouvelles employées, les outils développés et les preuves de concept apportés. Nous les mettons en regard de notre objectif initial, à savoir les appliquer au plus grand nombre d'applications pyrotechniques possibles, et ouvrons la voie à leur déclinaison ou leur continuation future. Nous y pointons le travail réalisé aux interfaces entre sous-systèmes, et les innovations en terme d'intégration mises en œuvre à travers nos travaux.

To be whole is to be part ; true voyage is return.

Epitaphe de Laia Asieo Odo dans *The Dispossessed* d'Ursula K. Le Guin, 1974

Chapitre 1

Vers une nouvelle génération de leurres infrarouges intelligents : État de l'art et problématique

Sommaire

1.1 Introduction 10

1.2 Il était une fois ... La guerre électronique infrarouge 10

1.3 Etat de l'art 14

1.3.1 Leurres 14

1.3.2 Systèmes pyrotechniques intelligents 16

1.3.3 Inflammateurs 18

1.3.4 Résumé 21

1.4 Objectifs de la thèse 21

1.5 Cahier des charges du système CASSIS 22

1.5.1 Exigences fonctionnelles 22

1.5.2 Contraintes, fiabilité et robustesse 22

1.5.3 Résumé du cahier des charges 23

1.6 Analyse fonctionnelle du système CASSIS 23

1.6.1 Syntaxe, outils, méthode 23

1.6.2 Modélisation fonctionnelle 24

1.7 Conclusion 28

> The first problem in any design situation is to discover what the problem really is.
>
> *George C. Beakley*

1.1 Introduction

Les systèmes pyrotechniques doivent devenir intelligents. C'est vrai pour les systèmes civils, qui doivent s'adapter à la demande et à l'évolution du marché, ça l'est encore plus pour les systèmes militaires, pour lesquels systèmes d'attaque et systèmes de protection cherchent à se surpasser mutuellement. Cependant, l'électronique, les initiateurs et les compositions pyrotechniques forment souvent un bloc inhomogène, volumineux et peu fiable, ce qui explique l'absence manifeste d'intelligence dans des systèmes à la fois complexes, miniatures et soumis à de fortes exigences. Le présent travail anticipe la levée de ce verrou technologique par le développement de micro-initiateurs adressables et de nouvelles techniques d'intégration, et se propose de paver la voie au design de systèmes électro-pyrotechniques centimétriques ou millimétriques.

Partant du postulat selon lequel il n'est pas possible de concevoir un système d'initiation générique, apte à contrôler tous les objets pyrotechniques quels qu'ils soient, nous avons décidé de nous restreindre à la conception et la validation d'un système spécifique. Plus précisément, nous avons choisi de développer un système d'initiation embarqué destiné à rendre les leurres infrarouges 1"1"8" contrôlables : Contrairement aux leurres passifs actuels, un leurre intelligent permettrait d'adapter la séquence de leurrage à la mission, la menace, ou la cible à protéger, de perturber les systèmes de contre-contre-mesure missiles, qui se basent sur leur connaissance des leurres pour les éviter, et d'améliorer la sécurité et la fiabilité des systèmes de leurrage.

Ce manuscrit se limite donc à un cadre très particulier, mais son ambition, quant à elle, est bien de mettre en place les méthodes, outils et blocs technologiques essentiels au développement de systèmes pyrotechniques intelligents miniatures, pour des applications plus larges que les seules contre-mesures.

L'objectif de ce premier chapitre est de détailler l'étude fonctionnelle qui a précédé la conception de notre leurre intelligent. Il s'ouvre par la présentation du contexte scientifique et technique des systèmes de leurrage. Il se poursuit par la constitution du cahier des charges correspondant, sur base des recommandations OTAN. Il s'achève par l'analyse fonctionnelle et architecturale de notre système, détaillée au travers de diagrammes SysML. Il conduit à la définition de trois grands blocs fonctionnels, dont la conception sera détaillée indépendamment dans les trois chapitres suivants.

1.2 Il était une fois ... La guerre électronique infrarouge

Lorsqu'en 1232, 30000 cavaliers mongols marchèrent sur Kai-Fung-Fu, la capitale du royaume d'Honan, ils furent accueillis par une pluie de *flèches de feu*, des

flèches et des lances sur lesquelles avaient été fixées des tubes contenant de la poudre noire [1]. En brûlant, la poudre produisait des gaz qui s'échappaient par l'arrière du tube. Par principe d'action-réaction, l'arme se voyait propulsée de l'autre côté dans une gerbe de flammes et un bruit de tonnerre. Devant le barrage, les chevaux prirent peur, forçant les mongols à se retirer. Le *Ching Shih*, ou *l'Histoire de la dynastie Ching*, qui décrit cette bataille, constitue le premier rapport écrit de l'utilisation d'armes autopropulsées, de roquettes. Le concept s'est ensuite répandu comme une traînée de poudre, voyageant dans les bagages des marchands et missionnaires d'Inde, du Moyen-Orient et d'Europe venus visiter l'empire du grand Khan. Les autopropulsés, pouvant être envoyés bien plus loin qu'une flèche ou qu'une balle de fusil, furent utilisés comme armes explosives ou incendiaires jusqu'à la fin du XIXème siècle, avant que les canons, beaucoup plus précis, ne manque de les remplacer définitivement.

Puis, lorsqu'au cours de la seconde guerre mondiale, l'Allemagne fut confrontée aux raids aériens de haute altitude alliés, les roquettes regagnèrent de l'intérêt. Les canons anti-aériens étant devenus trop peu puissants pour atteindre les bombardiers ennemis, le Reichsluftfahrtministerium (RLM - ministère de l'aviation du Reich) décida de déployer des moyens considérables pour développer des systèmes d'armes doublement innovants : Il fallait développer des engins volants à la fois suffisamment performants pour atteindre de hautes altitudes rapidement, mais aussi suffisamment précis pour toucher une cible volante capable de manœuvres évasives. Faisant fond des résultats concluants obtenus sur les bombes planantes guidées, comme le Hs 293 A, Hermann Göring valida en septembre 1942 le développement des premiers autopropulsés guidés, des premiers missiles [2]. En seulement trois ans, entre 1942 et 1945, le RLM posa les bases scientifiques et technologiques du missile, tel qu'il existe encore aujourd'hui.

Les premiers missiles, héritant directement des bombes planantes, étaient radiocontrôlés. Un opérateur les pilotait à la vue, jusqu'à se rapprocher suffisamment de la cible pour décider d'initier la charge explosive. Ce système de guidage n'autorisait qu'une précision très relative à grande distance, où les capacités visuelles de l'opérateur, même assisté d'un appareillage optique, voire d'un fumigène ou d'une bombe éclairante fixé au missile, n'étaient plus suffisantes [3]. En conséquence, le RLM développa le système Rheinland, un système de suivi radar initialement prévu pour le missile Wasserfall, dérivé du V2. L'idée était de représenter sur un écran la position relative du missile et de la cible, permettant ainsi à un opérateur au sol d'en corriger la trajectoire, à longue distance, de jour comme de nuit. Malgré sa supériorité sur un système de guidage visuel, Wasserfall-Rheinland était encore loin d'être idéal : Tout d'abord, le missile était radio-guidé, et donc fortement sensible au brouillage. Ensuite, il nécessitait un grand nombre d'opérateurs expérimentés, trop pour être viable contre une attaque de grande ampleur. Enfin, il restait peu précis puisque la fenêtre de déclenchement, pendant laquelle le missile était à portée de sa cible, était trop courte pour une initiation manuelle [4]. Résolu au développement

d'un système de défense efficace, le RLM fit le pari de développer des missiles autonomes, en y intégrant des capteurs : la détection d'une onde émise ou réfléchie par la cible donne au missile sa distance et sa direction, et lui permet de se diriger et de s'activer au bon moment. Plus d'une trentaine de projets de détonateurs de proximité et de systèmes de guidages furent lancés, acoustiques, radar ou infrarouges, mais ne purent arriver à terme avant la fin de la guerre [5].

Fin 1945, l'Europe est en ruine, et la Bombe Nucléaire est tombée sur Hiroshima et sur Nagasaki. Les USA et l'URSS se partagent l'Allemagne, ses connaissances et ses scientifiques. Les blocs de l'ouest et de l'est, dans un climat de méfiance grandissante, se préparent au pire, et cherchent à développer des moyens de défense de leurs territoires respectifs. Les différents services de l'armée américaine, cherchant à s'accaparer le monopole de la recherche missile, développent chacun de leur côté des systèmes de guidage, tous basés sur la technologie radar, alors jugée seule technologie viable. Tous ? Non : au Naval Ordnance Test Station de China Lake (NOTS), California, un jeune ingénieur du nom de William B. McLean postule qu'un missile guidé infrarouge pourrait être non seulement fonctionnel, mais aussi moins cher, moins complexe et plus performant qu'un missile guidé radar [6]. Pourtant, les capteurs IR (infrarouges) de l'époque, à base de galène, souffrent d'un défaut fatal, ils ne détectent que les longueurs d'onde dites de bande 1, comprises entre 1.8 et 2.5 μm, et autant émises par les réacteurs d'avions que réfléchies par les nuages. Pour faire la différence, McLean implémente une idée déjà théorisée par le RLM, moduler le signal lumineux reçu par le capteur en faisant tourner une partie de l'appareillage optique qui l'entoure. Si la cible est ponctuelle - un avion - le signal reçu présentera une fréquence élevée. Inversement, si la cible est étendue - un nuage - la fréquence sera faible.

Le concept de McLean donna naissance au premier missile guidé infrarouge fonctionnel de l'armée américaine, le Sidewinder-EX0. Pour en faire la démonstration opérationnelle, des tirs sur drones, sensés simuler une cible, furent organisés. Malheureusement, les moteurs de drones étant trop peu puissants comparés à ceux d'un avion, les premiers Sidewinders manquèrent leur cible. Pour augmenter le rayonnement des drones, et résoudre ce problème, il fut décidé d'y fixer des bombes éclairantes. Puisque conçues pour illuminer un champ de bataille la nuit, elles émettaient principalement dans le visible, et pas suffisamment dans l'infrarouge. Le NOTS décida alors de développer de nouvelles compositions pyrotechniques émettant dans la bande 1, jusqu'à ce que, le 9 janvier 1954, un Sidewinder finît par toucher un drone portant des bombes à base de Magnésium, Téflon et Kel-F [7]. C'est tout naturellement, en parallèle, que germa l'idée qu'un avion puisse lancer des objets pyrotechniques qui, en brûlant, pourraient reproduire sa signature infrarouge, et donc tromper un système de guidage missile. Il faut et il suffit qu'un leurre soit lancé au bon moment, et que le missile dévie un peu et perde de vue sa cible, pour que ce dernier ne soit pas capable de la retrouver une fois le leurre ayant fini de brûler. Le premier leurre à proprement parler, le NOTS model 704A, vit le jour en

1959 et avec lui, la guerre électronique infrarouge, missiles et leurres cherchant à se rendre mutuellement obsolètes.

Les missiles de première génération, dont le Sidewinder-EX0, souffraient d'un problème lié aux capteurs au galène. Ces derniers n'étant capables de mesurer que la bande 1, et donc les objets très chauds, ils devaient être tirés depuis l'arrière de leur cible, là où ses réacteurs sont visibles [7]. En réponse fut développée une deuxième génération de missiles qui embarquait des capteurs à base d'antimoniure d'indium, capables de détecter le rayonnement infrarouge de sources moins chaudes, entre 3 et 5 μm, dit de bande 2. Les missiles de deuxième génération pouvaient détecter certains points chauds sur le fuselage d'un avion, et donc l'attaquer de tous côtés. Ils étaient, en outre, nettement moins sensibles aux leurres Magnésium-Téflon-Kel-F, prévus pour émettre principalement en bande 1, et aux réflexions parasites sur l'environnement et les nuages. Bien entendu, les compositions des leurres infrarouges évoluèrent, et transitèrent vers des compositions Magnésium-Téflon-Viton (MTV), plus énergétiques, et capables d'émettre suffisamment en bande 1 et 2 pour tromper aussi bien les missiles de première que de seconde génération.

Dans le courant des années 80, une troisième génération de missiles apparut, embarquant à la fois un capteur bande 1 et un capteur bande 2, et capables de faire la différence entre avion, émettant principalement en bande 2, et leurres émettant indifféremment sur toutes les bandes. Cette discrimination était rendue possible par un système optique qui scannait l'espace en face du missile, et un algorithme qui dirigeait le missile vers la zone qui présentait le bon rapport de bande. Inévitablement, dans les années 90-2000 sont apparus les leurres spectraux, dont le rapport de densité spectrale entre bandes est adapté à la plate-forme à protéger.

Jusqu'aux années 2000, les missiles guidés infrarouge n'embarquaient qu'un seul capteur pour chaque bande. Ils scannaient l'espace devant eux, et ne disposaient que d'une résolution temporelle et spatiale très réduite. Ils suivaient la source infrarouge la plus puissante, et étaient facilement séduits par un leurre, pour peu que sa *couleur* soit adaptée. C'est ainsi que, courant des années 2000, est apparue la quatrième génération de missiles, intégrant des rangées, puis des matrices de capteurs, ainsi que des capacités d'analyse et de décision plus poussées. Cette évolution leur permet de suivre avec précision plusieurs sources infrarouges au cours du temps, et donc de discriminer plus efficacement les leurres : ils s'allument à fréquence fixe, forment ensemble un motif géométrique symétrique, et leur signature infrarouge ne varie pas en fonction de l'angle selon lequel le missile voit sa cible, contrairement au signal infrarouge moteur. Logiquement, contrer les missiles de quatrième génération impliquerait de pouvoir faire varier les signatures infrarouges, les délais d'allumage et les trajectoires des leurres, pour mieux s'adapter à la menace et proposer des séquences de leurrage moins prévisibles.

Devant ce constat, ces travaux de thèse se proposent d'entamer le développement d'un leurre infrarouge intelligent, contrôlable et sécurisé. Et avant d'en commencer la conception proprement dite, nous nous proposons d'établir un état de l'art des leurres, incluant les leurres intelligents, et plus généralement des systèmes pyrotechniques intelligents.

1.3 Etat de l'art

1.3.1 Leurres

Au cours de la guerre du Vietnam (1955-1975), plus de la moité des pertes d'aéronefs ont été causées par des tirs de missiles guidés infrarouge. Au cours de la guerre du golfe (1990-1991), c'est près de 80% des aéronefs qui ont été détruits par ce biais [8]. Et voyant que la guerre moderne se veut résolument asymétrique, cette tendance n'est pas prête de s'inverser : les missiles infrarouges constituent l'immense majorité des missiles lancés par les MANPADS (Man Portable Air Defense Systems), systèmes anti-aériens montés à l'épaule, transportables, discrets, performants, peu onéreux et donc proliférants. En 2010, on estimait à plus de 500.000 le nombre de missiles guidés infrarouges pour MANPADs en circulation dans le monde. L'autoprotection infrarouge des aéronefs et, à un moindre niveau, des autres véhicules militaires est tout sauf un luxe.

La base du leurrage IR, nous l'avons vu, est d'essayer de séduire la menace pour l'écarter de sa cible. Par conséquent, un leurre infrarouge devra remplir deux fonctions principales, s'éloigner de la plateforme à protéger et générer un signal IR. Puisque ces deux fonctions nécessitent de libérer une quantité substantielle d'énergie, un leurre sera potentiellement dangereux, pour les personnels et les biens. Il devra donc remplir une fonction complémentaire de sécurité. Quel que soit le type de plateforme à protéger ou le type de menace anticipée, les solutions technologiques qui constituent les leurres IR OTAN sont standards : le bloc d'éjection est constitué d'un squib, une cartouche de cuivre et de verre, de l'ordre du centimètre, sur lequel un fil résistif de nichrome a été soudé. Il embarque une composition propulsive qui, lorsque initiée, génère des gaz et pousse la munition hors de sa douille par effet mortier. Le bloc de sécurité coupe la chaîne pyrotechnique en deux, séparant l'étage d'éjection, sensible, de l'étage terminal, dangereux. Il est constitué d'un relai pyrotechnique et d'un tiroir mécanique. Lors de l'éjection, les gaz propulsifs enflamment le relai. Si l'éjection est nominale, le tiroir s'aligne et laisse passer la flamme du relai. Si elle est dégradée, le tiroir ne s'aligne pas et le feu ne se transmet pas à l'étage terminal. Le bloc terminal reproduit la signature infrarouge de la cible par la combustion d'un pain de composition dite infrarouge. Ce pain est parcouru de rainures remplies de compositions plus rapides à brûler, pour assurer une initiation reproductible. Un exemple en est donné dans la figure 1.1, schéma en coupe d'un leurre infrarouge $\varnothing 40mm$ Lacroix-défense.

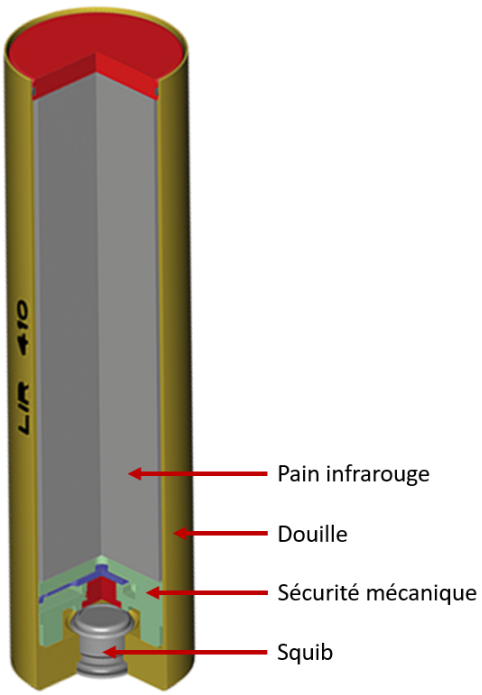


FIGURE 1.1 – Schéma en coupe d'un leurre infrarouge LIR410 - Lacroix-Defense

Les leurres IR actuels fonctionnent de manière entièrement passive. Une fois le squib initié, les différentes fonctions ne s'enchaînent que par propagation du feu. Sa vitesse d'éjection ou son signal infrarouge ne sont fonction que de la masse et du type de compositions pyrotechniques embarquées, et ne peuvent être modifiées que lors de leur fabrication.

Afin de rendre les systèmes de leurrage contrôlables, il serait possible d'envisager une changement de paradigme. Il serait par exemple possible d'imaginer utiliser des liquides pyrophoriques, qui s'enflamment lorsqu'exposés à l'air ambiant. Puisque liquides, il serait possible de faire varier à la volée, à l'aide d'un système fluidique contrôlable, leur composition ou la masse exposée à l'air. Il serait également possible d'imaginer lancer un module électronique intégrant des matrices de diodes LED infrarouges. Cependant, la première solution poserait des problèmes de sécurité bien trop importants, là où la seconde se heurterait à un problème de miniaturisation du stockage d'énergie électrique. La pyrotechnie solide reste imbattable pour des applications de haute énergie, avec de très fortes exigences de fiabilité et de sécurité. Pour enfoncer le clou, notons qu'il est sensiblement plus facile de faire évoluer un leurre qu'un rafale, et qu'il sera presque toujours préférable de privilégier des solutions impliquant un minimum d'évolutions. Nous restreindrons donc notre étude à la mise à jour des systèmes de leurrage à pains IR solides.

Dès lors, imaginons mettre à jour non pas le leurre, mais le système lanceur,

comme sur ce concept de *smart dispenser* Chemring présenté figure 1.2, qui permettrait de lancer différents leurres en fonction de la menace. Le type de leurres embarqués définit les séquences de leurrage possibles. Pour répondre entièrement à notre besoin, il faudrait concevoir, développer et embarquer autant de leurres que d'effets désirés, ce qui, pour des raisons logistiques et financières est impossible.

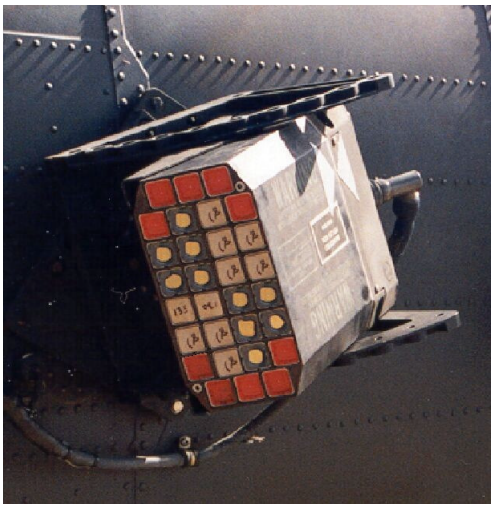


FIGURE 1.2 – Concept de *smart dispenser* - Chemring Countermeasures

Nous proposons donc, pour développer des leurres de quatrième génération, de rendre le leurre lui-même contrôlable. Pour ce faire, nous nous proposons d'y intégrer un bloc de contrôle électronique.

1.3.2 Systèmes pyrotechniques intelligents

L'idée n'est pas nouvelle et quelques leurres se sont déjà essayés à l'exercice. Citons, par exemple, la roquette pour applications marines SEALIR (en service depuis 2004 - voir figure 1.3), qui embarque une petite électronique lui permettant, après retard, d'allumer une ou deux chambres contenant des feuillets phosphore, et SEPIA (en service de 1987 à 2011 - voir figure 1.3), un leurre pour applications véhicules terrestres, qui embarque un retard programmable.

Les blocs électroniques de SEPIA et de SEALIR sont tous deux relativement volumineux, et ne permettent de contrôler que partiellement les fonctions pyrotechniques embarquées. Sachant que nous voulons obtenir un contrôle aussi total que possible dans un volume aussi réduit que possible, ces architectures ne sont pas adaptées à notre besoin. Pour chercher à y répondre, nous nous proposons d'explorer les solutions envisagées dans d'autres domaines de la pyrotechnie.

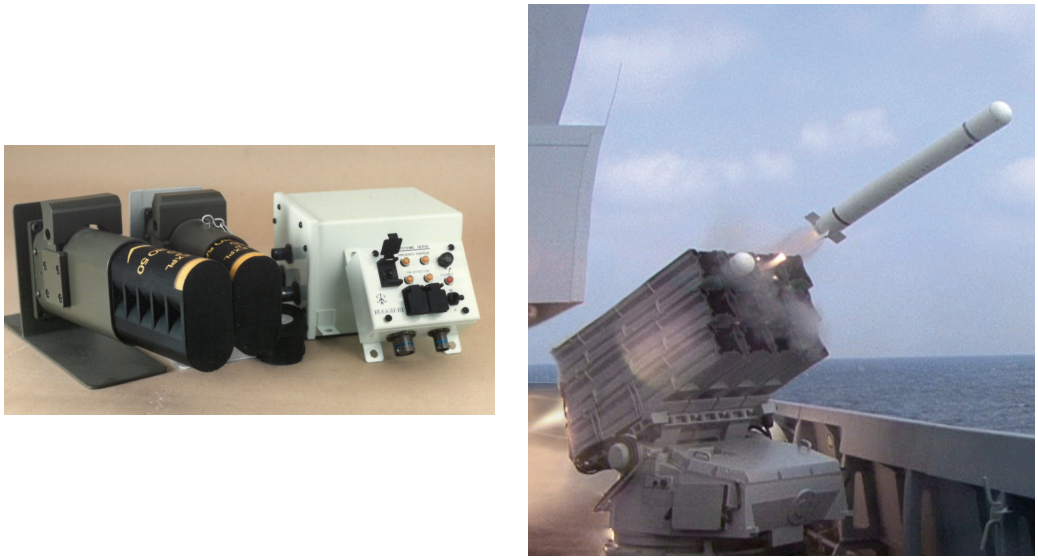


FIGURE 1.3 – Système SEPIA (gauche) et SEALIR (droite) - Lacroix-Defense

Il existe a priori trois méthodes permettant de contrôler une réaction de combustion : la première consiste à piloter la composition des réactifs, la deuxième consiste à piloter les conditions de réaction (température, pression ...) et la troisième à piloter la masse de réactif entré en combustion. Sachant que nous travaillons sur des pains solides, nous pouvons oublier la première. La seconde est intéressante, mais nécessite des systèmes de contrôle beaucoup trop volumineux pour nos applications. Nous choisissons donc de nous concentrer sur la troisième. La méthode la plus simple, la plus efficace, et la plus décrite dans la littérature pour contrôler la masse de réactif entré en combustion est de passer par une initiation multipoint, de chercher à contrôler la forme et l'étendue du front de combustion initial en intégrant de multiples initiateurs pouvant être activés indépendamment. Sur ce principe, il a par exemple été possible à l'US Air Force Reasearch Laboratory de concevoir l'AMIST ([9] - 2006 - Voir figure 1.4), une tête militaire à fragmentation dont la direction préférentielle de projection est contrôlable.

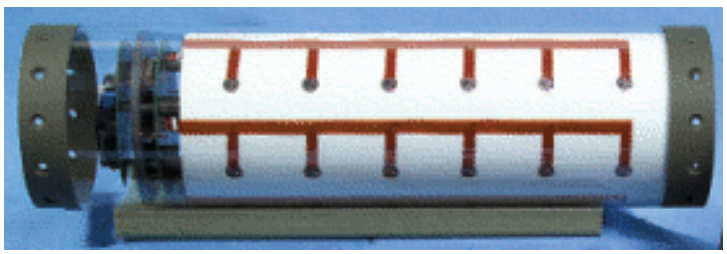


FIGURE 1.4 – Tête AMIST (Adaptable, Miniature Initiation System Technology) configuration 2 - Air Force Reasearch Laboratory

Il a également été possible au LAAS-CNRS de concevoir Micropyros [10] (2003 - Voir figure 1.5), une matrice de micro-propulseurs destinée à corriger finement la trajectoire de satellites. La poussée totale du système correspond à la somme de la poussée des différents propulseurs initiés.

FIGURE 1.5 – Système Micropyros - LAAS-CNRS

Un système d'initiation multipoint permettrait de contrôler finement une combustion, et pourrait être miniaturisé, pour peu que les initiateurs et l'électronique qui les contrôle puisse eux aussi être miniaturisés. Nous faisons donc le choix de contrôler notre leurre à l'aide d'un système d'initiation multipoint, et nous proposons maintenant de voir quels initiateurs se prêteraient le mieux à la miniaturisation.

1.3.3 Inflammateurs

Rappelons que nous voulons initier un pain infrarouge après éjection, pour contrôler son effet. Il nous faut donc embarquer dans la munition nous seulement les initiateurs mais aussi leur énergie d'activation. Si l'un ou l'autre est trop volumineux, il n'y aura pas assez de place pour le pain IR. Nous cherchons donc des initiateurs contrôlables électroniquement, de petite taille, et de faible consommation. Les solutions technologiques qui s'offrent à nous sont multiples.

Commençons par l'initiateur à fil chaud, l'inflammateur le plus simple et le plus répandu, et dont une représentation schématique est donnée en figure 1.6. Il est en général de quelques millimètres cubes, et nécessite typiquement de l'ordre de $10^{-1}J$ et quelques millisecondes pour s'activer [11]. Il a été conçu à la fin du XIXème siècle et fonctionne selon le principe suivant : un filament conducteur est entouré d'une perle de composition combustible très sensible. Lorsque qu'un courant électrique traverse le filament, il s'échauffe par effet Joule. Si le courant est suffisamment important, la perle s'enflamme. S'il ne l'est pas, la dissipation naturelle de chaleur du système assure qu'il reste inerte, et qu'il ne s'initie pas de manière intempestive.

Les initiateurs fil chaud étant souvent prévus pour dissiper 1 ampère ou 1 watt pendant 5 minutes sans s'initier, on parle de sécurité $1A/1W/5min$. S'il est possible de rendre ces initiateurs plus sensibles, ce n'est pas souhaitable, les effets de courant induits - par un rayonnement radar, radio, par une décharge électrostatique ou par une élévation du potentiel de la masse - pouvant déclencher l'initiation de manière intempestive. Ces initiateurs sont donc gourmands en énergie, difficile à interfacer avec un système électronique - il faut reporter un filament sur un circuit - et difficile à interfacer avec des compositions pyrotechniques - la perle de composition sensible pouvant se détacher lors d'un choc.

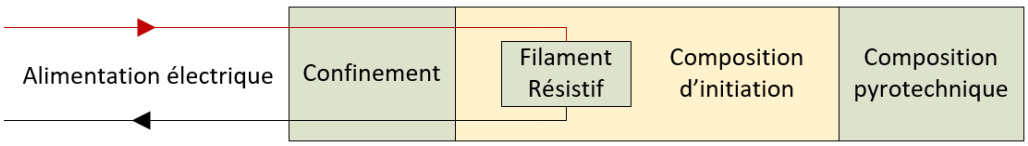


FIGURE 1.6 – Schéma de principe d'un initiateur à fil chaud

L'initiateur optopyrotechnique, quant à lui, occupe une part non négligeable des travaux et développements de pyrotechnie de cette dernière décennie. Son principe repose sur l'utilisation d'une diode LASER pour chauffer et initier par radiation une composition pyrotechnique, comme représenté figure 1.7. Ces initiateurs font en général de plusieurs centaines à plusieurs milliers de mm^3, et nécessitent de 10^{-6} à $10^{-1}J$ et $1\mu s$ à $1ms$ selon la sensibilité de la composition à allumer [12]. Les initiateurs optopyrotechniques présentent l'immense avantage d'être absolument insensibles aux effets de conduction électrique, et de s'interfacer facilement avec une électronique de commande et une composition pyrotechnique. Ils sont en revanche volumineux, onéreux et gourmands en énergie d'activation pour des applications de combustion.

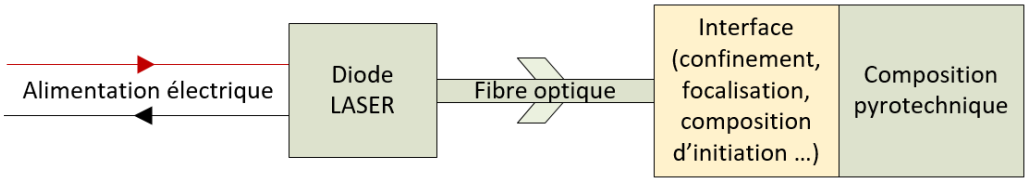


FIGURE 1.7 – Schéma de principe d'un initiateur optopyrotechnique

Enfin, les micro-initiateurs en couches minces, développés depuis la thèse de Marine Petrantoni en 2008 [13], et amélioré successivement à travers les travaux de Guillaume Taton en 2014 [14], Ludovic Glavier en 2017 [15] et Andrea Nicollet en 2018, [16], sont des initiateurs fabriqués à l'aide de procédés de de fabrication

collective dans la salle blanche du LAAS-CNRS. Leur principe repose sur le dépôt sur substrat de silicium ou de verre couvert d'une membrane kapton ou autre polymère isolant, d'un filament résistif de titane en couche mince et de nano-couches d'aluminium et d'oxyde de cuivre. Le filament, de par sa finesse et grâce au polymère qui l'empêche de dissiper son énergie dans le substrat, est capable d'atteindre plus de $500°C$ en quelques centaines de μs, lorsqu'alimenté par une puissance d'une dizaine de watts. Passé cette température, le cuivre libère son oxygène qui oxyde violemment l'aluminium dans une réaction dite de thermites. Puisque fabriqués au travers de processus développés pour la micro-électronique, ces inflammateurs peuvent facilement être interfacés avec un circuit de commande. Leurs contacts et leurs filaments sont si cours qu'il est possible de les rendre insensibles aux effets de conduction électrique en les couplant avec des sécurités électroniques. Nous invitons les lecteurs intéressés à consulter la review [17] publiée récemment dans le journal PEP (Propellants, Explosives, Pyrotechnics). Nous les invitons également, pour plus de détails sur les nanothermites multi-couches à consulter les publications suivantes : [18] [19] [20] [21] [22] [23] [24].

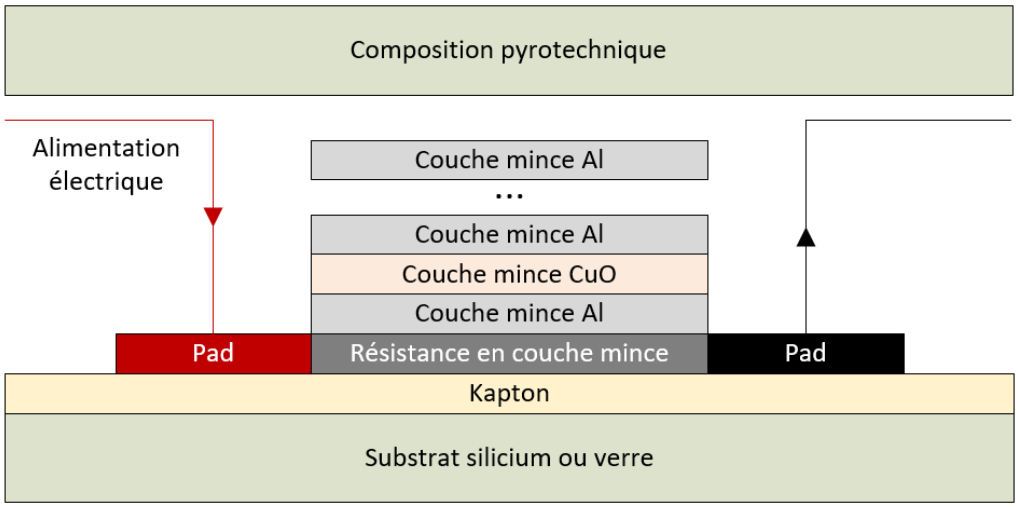


FIGURE 1.8 – Schéma de principe d'un micro-initiateur en couche minces

Les micro-initiateurs en couche mince ont déjà été intégrés dans des systèmes électro-pyrotechniques, mais jamais dans une perspective de contrôle, seulement de sécurisation et de miniaturisation.

A noter qu'il existe de très nombreux autres types d'inflammateurs que nous ne détaillons pas ici, puisque moins adaptés à être contrôlés par un système d'initiation multipoint. Mentionnons par exemple les initiateurs à induction, pour lesquels un rayonnement électromagnétique est utilisé pour chauffer des compositions métalliques, les amorces à percussions, qui sont initiées par un choc mécanique, les

rugueux, qui sont initiés par frottement ou encore les pyrophoriques qui sont initiés par exposition à l'air ambiant.

1.3.4 Résumé

Nous avons vu que les systèmes pyrotechniques permettent de générer beaucoup d'énergie dans un temps très court, avec une masse ou un volume utile faible. Ils sont donc imbattables pour certaines applications de la défense ou de l'aérospatiale. Depuis les années 70, la tendance est au développement de systèmes électro-pyrotechniques intelligents, plus sécurisés et plus efficaces. Parmi les systèmes les plus avancés, nous avons cité les missiles, aujourd'hui capables de se guider, de se déclencher ou de s'adapter à leur cible. En parallèle, les plus petits des systèmes pyrotechniques, comme les leurres, sont restés passifs, et menacent de devenir obsolètes. Dans une perspective d'amélioration des systèmes pyrotechniques centimétriques ou millimétriques, il est nécessaire de développer de nouvelles solutions d'intégration, assurant de nouvelles fonctions tout en améliorant la sécurité et la fiabilité. La section qui suit détaille plus précisement nos objectifs de thèse.

1.4 Objectifs de la thèse

Nous nous proposons donc de paver le chemin de la micro-pyrotechnie intelligente, en commençant par le développement d'un leurre $1''1''8''$ rendu contrôlable par l'intégration d'un système d'initiation multipoint. Si le monde de la pyrotechnie s'est déjà penché sur le contrôle multipoint d'une détonation, tout reste à inventer quant au contrôle multipoint d'une combustion. D'autre part, les inflammateurs en fil chaud existants sont trop gourmands en énergie et trop peu pratiques pour nos contraintes de miniaturisation. Il nous faudra donc innover et intégrer des micro-initiateurs en couches minces basse énergie, couplés à un système de sécurisation électronique dédié que nous allons devoir concevoir et développer.

Concrètement, pour guider nos travaux de recherche, nous proposons de concevoir et développer le système CASSIS, pour Controlable, Autonomous, Safe and Smart Initiation System, qui intégrera dans un cube de $1''^3$ les fonctions suivantes :

- Initiation
- Stockage d'énergie
- Contrôle / Commande
- Autotest
- Sécurités électroniques et mécaniques
- Suivi cycle de vie et traçabilité

L'état de l'art nous a appris qu'aucune architecture existante ne permettrait d'atteindre les objectifs que nous nous sommes fixés. Nous proposons donc de concevoir une architecture nouvelle, aussi fiable, sécurisée et miniature que possible. Nous choisissons de définir un cahier des charges à la fois contraignant et générique, pour pouvoir décliner nos solutions à l'envie.

1.5 Cahier des charges du système CASSIS

Nous commençons la recherche de solutions par la rédaction d'un cahier des charges, que nous nous proposons de formaliser en deuxf catégories d'exigences :

1.5.1 Exigences fonctionnelles

- Sous ordre électrique, le système doit provoquer l'initiation en aval d'une composition propulsive à l'aide de 1 à 3 points d'initiation.
- Sous ordre électrique, le système CASSIS doit provoquer l'initiation en aval d'une composition de type infrarouge à l'aide de 1 à 4 points d'initiation.
- Le différentiel de temps entre la mise à feu électrique et la mise à feu effective de la composition d'éjection doit être inférieur ou égal à $5ms$.
- Le différentiel de temps entre la mise à feu électrique et la mise à feu effective de la composition du pain IR doit être inférieur à $100ms$.
- Le système CASSIS doit pouvoir assurer la mise à feu électrique de la composition infrarouge jusqu'à $30s$ après éjection.
- Le système CASSIS doit assurer une sécurité de bouche. Tant que la cartouche est dans le tube lanceur, le système doit rester en position sécurisée.
- En position sécurisée, quoi qu'il arrive, le système CASSIS ne doit pas provoquer la combustion en aval du pain IR.
- Le système CASSIS doit assurer l'étanchéité entre les différentes fonctions pyrotechniques.

1.5.2 Contraintes, fiabilité et robustesse

Le système d'initiation, sans le pain IR, doit s'intégrer dans un volume d'environ $1''^3$ imposé par les interfaces de la munition $1''1''$ et les besoins de charge utile du pain infrarouge. Notre conception devra également essayer autant que possible de reprendre les interfaces électriques et mécaniques existantes, pour des questions de rétrocompatibilité.

Pour réaliser la sécurité de bouche, nous faisons le choix de nous aligner sur le STANAG 4187 dans une première phase de développement. Ce STANAG décrit l'architecture du bloc de sécurité d'un système d'initiation pour tête militaire et n'est pas supposé s'appliquer aux leurres. Nous faisons le choix de l'appliquer tout

de même, en attendant qu'un document attenant aux leurres intelligents ne soit développé. Il impose d'intégrer trois *interrupteurs*, qui coupent la ligne énergétique entre le stockage d'énergie et la fonction terminale.

Enfin, le système CASSIS doit afficher une durée de vie d'au minimum 10 ans et doit rester fonctionnel et fiable avoir été stocké dans les conditions suivantes :

- Température : $-55°C/+125°C$
- Choc thermique : $-55/+95°C$ en moins d'une minute
- Humidité : $60°C, 93\%$ d'humidité
- Chocs : $200g/4ms$ (chocs d'appontage / catapultage) – $40g/9ms$ (chute)
- Accélération : $26g$ en quasi statique, jusqu'à $400g$ / $100ms$ à l'éjection
- Brouillard salin : $48h$
- Sensibilité aux charges électrostatiques : jusqu'à $150pf, 15kV$
- Sensibilité aux rayonnements électromagnétiques : jusqu'à $4000W.m^{-2}$

1.5.3 Résumé du cahier des charges

Produit :	CASSIS
Objet :	Développement technologique
Documents associés :	STANAGs & normes françaises
Fonctions principales :	Piloter les effets d'un leurre infrarouge
Contraintes à respecter :	Compatibilité REACH & ITAR Compatibilité normes munitions OTAN & France Compatibilité spécifications plate-formes MIRAGE 2000, RAFALE & A400M
Mise en œuvre :	Essais de tir statiques et semi-dynamiques
Points critique :	Miniaturisation et intégration
Choix technologiques :	Restriction aux pains IR solides Intégration de micro-inflammateurs LAAS-CNRS
Orientation définition :	Choix technologiques réutilisables pour d'autres applications
Client :	DGA (Direction Générale de l'Armement)

1.6 Analyse fonctionnelle du système CASSIS

1.6.1 Syntaxe, outils, méthode

La conception d'un système complexe comme CASSIS nécessite de manipuler et de faire interagir un grand nombre de concepts et d'idées. La démarche intuitive d'analyse systématique manque de lisibilité : il devient difficile de se représenter les

tenants et les aboutissants d'un projet, et encore plus de communiquer clairement au sein d'un groupe de travail. De manière à faciliter le dialogue et plus généralement le processus de conception, nous faisons le choix d'utiliser un langage de métamodélisation. Le système est alors représenté sous la forme d'un ensemble de structures de données - des objets – et de leurs interactions. Un système constitué de sous-systèmes sera représenté par un objet contenant d'autres objets. Une abstraction se ramènera à une inclusion. Il devient possible de mener simplement une analyse descendante du système en explorant le contenu des objets, du plus abstrait au plus effectif. Afin d'avoir un support de communication aussi commun que possible, nous faisons le choix d'utiliser le langage SysML, reconnu internationalement et conçu spécifiquement pour l'ingénierie système. Reste à l'utiliser au travers de la méthode de conception retenue. Puisque notre étude part d'un problème abstrait pour lui donner une solution concrète, nous choisissons la méthode d'analyse fonctionnelle descendante en trois phases suivante :

1. Phase d'expression fonctionnelle du besoin : formaliser le cahier des charges en un ensemble de fonctions et d'exigences.
2. Phase d'architecture fonctionnelle : hiérarchiser les fonctions ainsi extraites en blocs fonctionnels.
3. Phase de définition de sous-ensembles et recherche d'architecture : itérer sur les blocs fonctionnels jusqu'à obtenir une architecture fonctionnelle cohérente.

A noter que si, dans le fond, cette méthode est directement dérivée des méthodes d'analyse fonctionnelle traditionnelles (APTE, Kano), **compte tenu de l'aspect recherche du projet, nous valoriserons avant tout les solutions innovantes.**

1.6.2 Modélisation fonctionnelle

Les fonctions qu'un produit satisfait lorsqu'il est utilisé découlent directement du besoin. Il est donc possible, partant de notre cahier des charges, de construire :

1. Un diagramme des cas d'utilisation. Il présente les interfaces et les fonctions principales de notre système. Il est présenté en figure 1.9.
2. Un diagramme d'exigences. Il présente les principaux besoins auxquels doit répondre notre système. Une version simplifiée est présentée en figure 1.10.
3. Un diagramme de séquence. Il représente le processus de fonctionnement de notre système et découle de l'existant et du STANAG 4187. Il est présenté en figure 1.11.

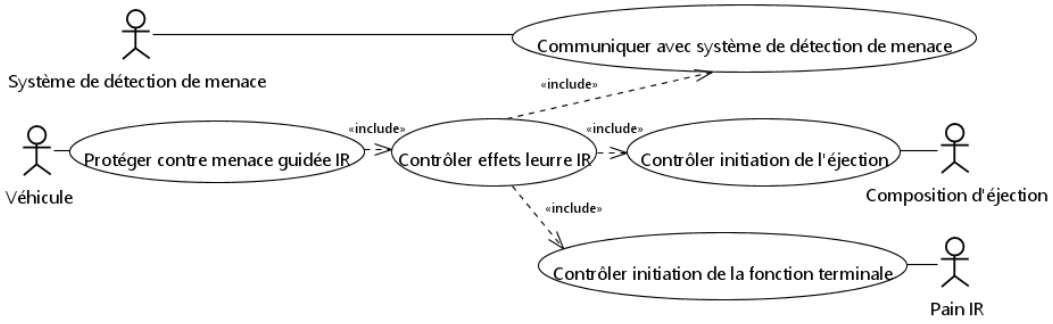


FIGURE 1.9 – Diagramme des cas d'utilisation de CASSIS

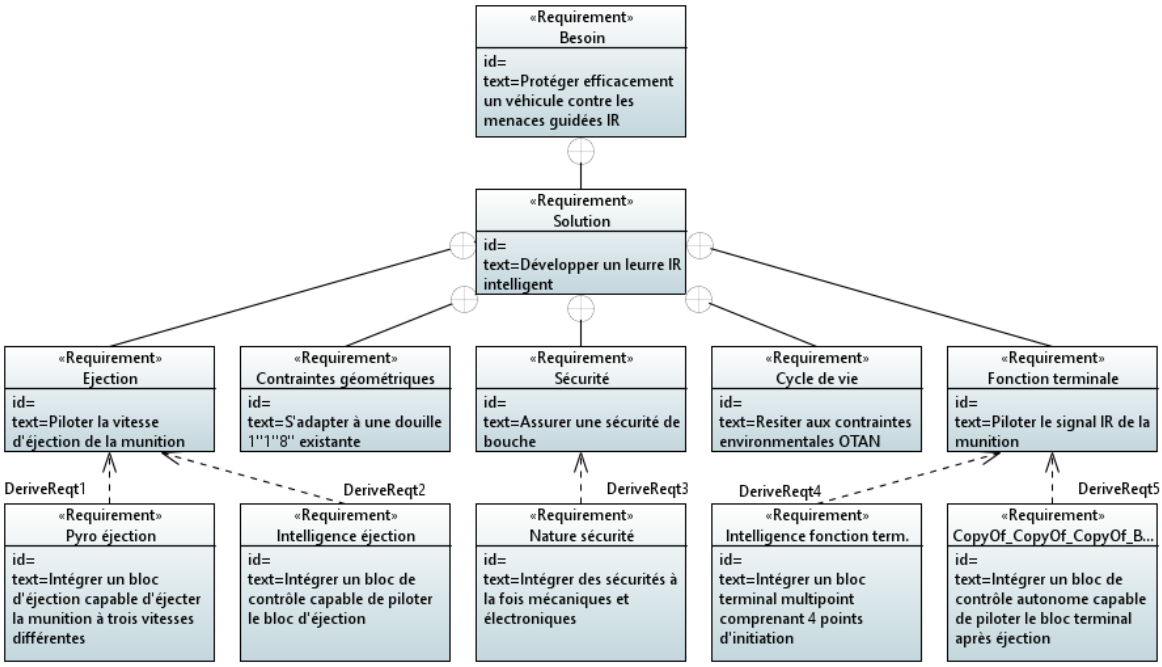


FIGURE 1.10 – Diagramme des exigences de CASSIS

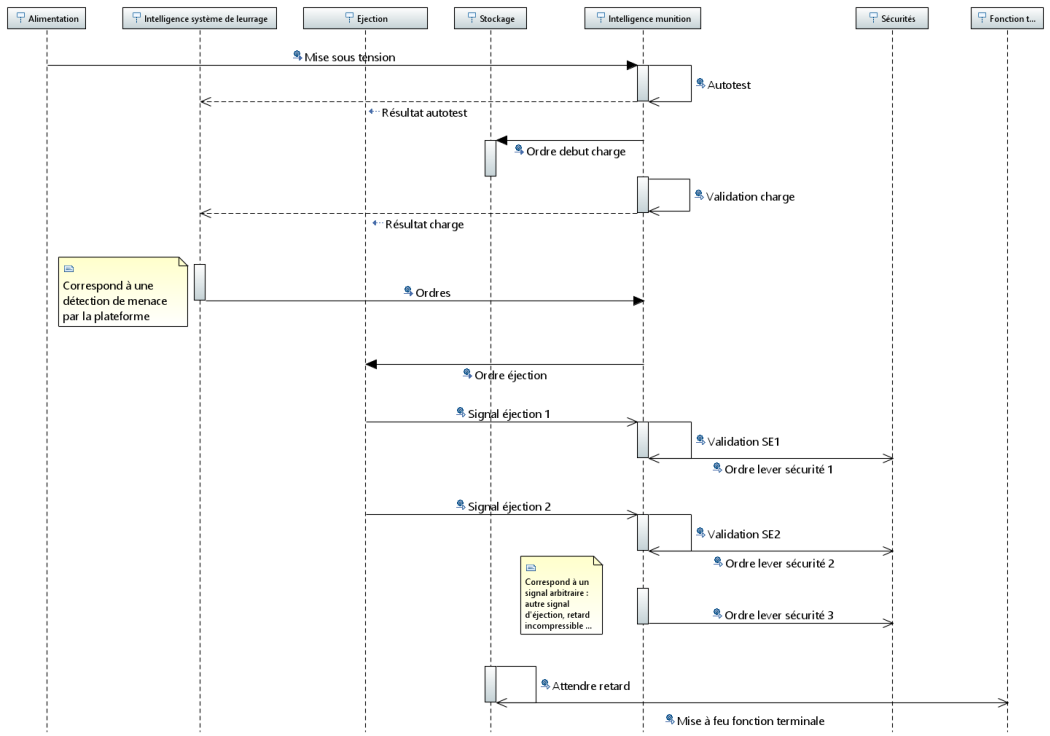


FIGURE 1.11 – Diagramme de séquence de CASSIS

Pour plus de clarté, cette séquence est décrite ci-après textuellement :

1. L'intelligence est mise sous tension.
2. L'intelligence effectue un autotest.
   2.1. Si l'intelligence détecte un défaut, elle renvoie un signal d'erreur au lanceur, puis s'arrête.
   2.2. Si l'intelligence ne détecte aucun défaut, elle renvoie un signal de validation au lanceur, puis commence la charge des dispositifs de stockage d'énergie.
3. L'intelligence vérifie la charge des dispositifs de stockage d'énergie.
   3.1. Si la charge est validée, l'intelligence patiente.
   3.2. Si un défaut de charge est détecté, l'intelligence renvoie un signal d'erreur, décharge les dispositifs de stockage d'énergie et s'arrête.
4. L'intelligence patiente jusqu'au moment où elle reçoit des ordres ou reçoit un signal d'arrêt.
   4.1. Si l'intelligence reçoit des ordres, elle les mémorise et attend de recevoir les signaux d'éjection.
5. Lorsque l'intelligence reçoit le premier signal d'éjection, il le valide.

6. Lorsque ce signal est validé, l'intelligence ferme le premier interrupteur d'armement statique.
7. Lorsque l'intelligence reçoit le deuxième signal d'éjection, il le valide.
8. Lorsque ce signal est validé, l'intelligence ferme le deuxième interrupteur d'armement statique.
9. Lorsque les deux signaux ont été validés, l'intelligence ferme l'interrupteur d'armement dynamique (possibilité de rajouter une condition, par exemple un retard incompressible).
10. Le dispositif de stockage d'énergie temporaire de la fonction terminale est alors alimenté et commence à accumuler de l'énergie.
11. L'intelligence a attendu le retard demandé dans les ordres et ferme l'interrupteur de mise à feu.
12. L'intelligence confirme la mise à feu puis décharge les dispositifs de stockage d'énergie et d'arrête.

Sur la base de ces schémas, les trois sous-ensembles fonctionnels hiérarchisés suivants sont proposés :

- Fonction terminale (initiateurs et pain infrarouge) : génération de signal infrarouge. Ce sous-système, sa géométrie, et son placement dans la cartouche dépendent du signal infrarouge à reproduire. C'est cette fonction qui imposera le reste du système.
- Éjection (initiateurs et poudre d'éjection) : cette fonction doit être située entre le lanceur et la fonction terminale, pour éjecter la fonction terminale hors de la douille.
- Électronique et sécurités (ou intelligence - commande, contrôle, stockage d'énergie, capteurs, autotest et sécurités) : cette fonction rassemble tous les composants électroniques et de sécurité. Ils seront à rassembler sur un ou plusieurs PCB et devront s'adapter au reste de la conception.

Nous proposons de les étudier dans l'ordre, en commençant par le bloc fonction terminale et en finissant par le bloc électronique et sécurités. Pour chacun, un travail d'inventaire des solutions technologiques disponibles, de recherche de solutions puis de prédimensionnement sera effectué afin de proposer, de prototyper et d'enfin valider la solution la plus appropriée au cahier des charges CASSIS. Ce travail, mêlant modélisation, fabrication et caractérisation a constitué le cœur de ma thèse de doctorat et sera décrit en détail dans les chapitres qui suivent.

Mentionnons également que l'on considère aussi la douille dans l'architecture, puisqu'elle constitue l'interface directe avec la cartouche. La représentation graphique de cette architecture fonctionnelle sous forme de diagramme de définition de bloc est donnée en figure 1.12.

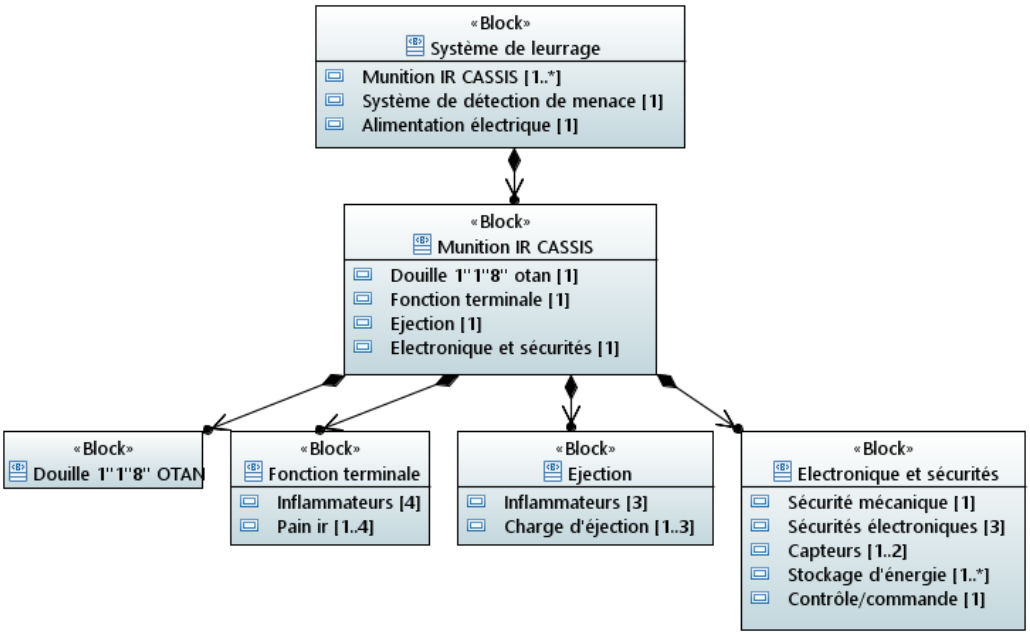


FIGURE 1.12 – Diagramme définition de bloc

1.7 Conclusion

Mes travaux de thèse visent à développer des leurres infrarouges de nouvelle génération capables, en intégrant de l'intelligence, de s'adapter à la volée à une menace, un véhicule ou un théâtre d'opération particulier. Nous avons vu que les objets pyrotechniques intelligents existent déjà et qu'ils se basent souvent sur un système d'initiation multipoint, embarquant plusieurs initiateurs adressables pour contrôler un effet pyrotechnique. Un rapide état de l'art des inflammateurs montre qu'ils sont souvent volumineux ou qu'ils nécessitent une énergie d'initiation élevée pour des raisons de sécurité, ce qui rend impossible d'envisager d'en embarquer plusieurs dans une munition $1''1''8''$. Si les micro-initiateurs LAAS-CNRS semblent pouvoir résoudre ce problème, il faudra les adapter à notre cahier des charges et proposer une technologie d'intégration au contact d'un pain de composition infrarouge, qu'il faudra s'assurer d'être capables d'initier dans des délais inférieurs ou égaux à l'existant (de 20 à $200ms$ selon la composition). Enfin, si la littérature est extensive quant au contrôle de réactions de détonation, le contrôle des réactions de combustion solide reste une terre vierge. Nos travaux sont, en ce sens, novateurs et d'un intérêt majeur pour le monde de l'autoprotection.

Une analyse fonctionnelle a permis de passer de la conception du système complexe CASSIS à la conception et au développement de trois sous-systèmes indépendants, le bloc fonction terminale, le bloc éjection et le bloc électronique et sécurité. Pour chacun de ces blocs, nous commencerons par identifier les verrous technologiques et scientifiques liés à la miniaturisation ultime et à l'intégration, ferons

l'inventaire des composants ou solutions technologiques disponibles pour réaliser les fonctions et, faute de solution sur étagère, nous concevrons et développerons des solutions innovantes que nous prédimensionnerons et validerons expérimentalement. Les chapitres 2, 3 et 4 rapportent les travaux portant respectivement sur les blocs fonction terminale, éjection et intelligence.

Le cinquième et dernier chapitre 5 analysera, au regard du cahier des charges que nous avons établi et présenté dans ce premier chapitre, les résultats des chapitres 2, 3 et 4, détaillera les perspectives d'évolution de chacun de nos blocs, et enfin leurs perspectives d'intégration.

Rappelons enfin que mes travaux, au-delà de la démonstration de la faisabilité d'un leurre intelligent de nouvelle génération, s'attacheront à développer des solutions et technologies génériques et versatiles, déclinables pour d'autres systèmes pyrotechniques et applications. Aussi, tirant profit des micro-initiateurs en couche mince aux caractéristiques d'initiation réglables [22], nous avons proposé une architecture générique d'initiation multipoint contrôlable par une électronique basse consommation, sécurisé et autonome qui permettra d'initier le leurre CASSIS et pourrait être déclinée pour des applications d'artifice de divertissement, d'artifice civil ou pyromécanismes.

Chapitre 2

Conception et développement du bloc fonction terminale

Sommaire

2.1 Introduction 32

2.2 Conception 32

2.2.1 État de l'art de la génération de signal infrarouge pour systèmes de leurrage 32

2.2.2 Recherche de solutions de contrôle de la combustion d'un pain infrarouge 34

2.2.3 Initiation 34

2.2.4 Propositions de solutions de bloc terminal contrôlable 36

2.3 Prédimensionnement 36

2.3.1 Description du modèle 38

2.3.2 Résultats 42

2.3.3 Discussion et conclusion 49

2.4 Validation expérimentale 50

2.4.1 Essais d'allumage de compositions d'initiation de pains IR à l'aide de micro-inflammateurs 51

2.4.2 Essais d'allumage de pains IR semi-inertes à l'aide de micro-initiateurs 55

2.4.3 Essais d'allumage de pains IR actifs à l'aide de micro-initiateurs 61

2.5 Conclusion 66

A picture may be worth a thousand words, a formula is worth a thousand pictures.

Edsger Dijkstra, A First Exploration of Effective Reasoning, 1996

2.1 Introduction

Dans le chapitre 1, nous avons établi un besoin d'intégration d'intelligence dans les systèmes pyrotechniques miniatures, et plus particulièrement les leurres. Sur la base de l'état de l'art et de notre analyse fonctionnelle, nous avons choisi de développer un démonstrateur de leurre intelligent, CASSIS, découpé en trois blocs fonctionnels.

Dans ce second chapitre, nous nous intéressons à la conception du bloc *fonction terminale* du leurre 1″1″8″ intelligent CASSIS, et donc à l'initiation multipoint de pains infrarouges après leur éjection. Nous commençons par revenir plus en détail sur l'état de l'art de la génération d'un signal infrarouge adapté, avant de proposer deux solutions de contrôle possibles, qui seront enfin validées expérimentalement.

2.2 Conception

2.2.1 État de l'art de la génération de signal infrarouge pour systèmes de leurrage

Nous l'avons vu dans le chapitre précédent, le leurrage IR existant consiste à séduire une menace à l'aide du signal infrarouge généré par la combustion d'un pain de compositions pyrotechniques. Ces compositions sont fortement gazogènes et créent, lors de leur combustion, un front de flamme principal et, dans son sillage, un nuage de gaz chauds et de particules réactives. Un missile perçoit donc les leurres 1″1″8″ existant comme un point chaud suivi d'un nuage un peu moins chaud et peine à les distinguer d'un moteur d'aéronef suivi de ses gaz d'échappement. Pour raisons de sécurité les pains infrarouges sont souvent peu sensibles, et il est nécessaire de les associer à des compositions d'initiation : elles génèrent très rapidement des gaz chauds qui, si confinés autour du pain, permettent de l'allumer de la manière la plus instantanée et la plus uniforme possible (voir figure 2.1).

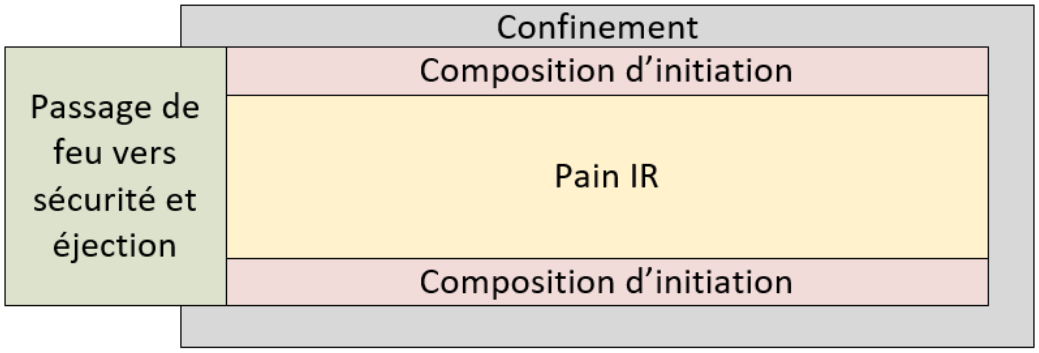


FIGURE 2.1 – Schéma de principe de la fonction terminale d'un leurre IR existant

Les pains peuvent être fabriqués par compression, extrusion ou moulage. Lacroix-défense a fait le choix de se concentrer sur le développement de pains comprimés, pour capitaliser sur son passé d'artificier de divertissement : les compositions d'artifice et les compositions IR du groupe Lacroix se présentent initialement sous forme pulvérulente (voir figure 2.2), et sont comprimées sous presses hydrauliques pour prendre et garder la forme désirée, typiquement sous des pressions de l'ordre de $100MPa$. Dans le cas des leurres IR $1''1''8''$, la poudre IR est comprimée en un parallélépipède rectangle d'environ $20\times20\times150mm$. Lors de la compression, les moules présentent des extrusions qui permettent de graver des rainures sur les pains, afin d'y couler, manuellement ou à la canule, les compositions d'initiation. Le confinement est en général réalisé à l'aide d'un papillotage - une couche de scotch aluminisé - ou d'un fourreau plastique. Il est enfin parfois d'usage de couvrir une partie du pain d'un mélange inerte de colle thixotrope bi-composant et d'alumine, pour modifier passivement le signal infrarouge d'un pain donné.

FIGURE 2.2 – Poudre pyrotechnique avant compression, ici inerte, le métal combustible ayant été remplacé par un oxyde métallique

Quelle que soit la méthode de fabrication, l'agencement des compositions pyrotechniques, le nombre ou la position des points d'initiation, les pains IR actuels n'admettent qu'un et qu'un seul seul mode de fonctionnement. Puisque conçus pour s'initier en masse, ils génèrent rapidement des gaz chauds qui se répandent dans le fourreau ou sous le scotch de confinement. Les gaz allument alors toutes les surfaces exposées en un temps très court (de l'ordre de la milliseconde) comparé au temps de combustion du pain (de l'ordre de la seconde). Une fois que le pain est initié, il

n'est plus possible de contrôler sa combustion ; il régresse selon sa loi de combustion. Pour contrôler le signal infrarouge, il nous faut avant tout éviter que les gaz générés lors de sa combustion ne se propagent sur toute sa surface.

2.2.2 Recherche de solutions de contrôle de la combustion d'un pain infrarouge

Nous souhaitons contrôler la combustion d'un pain infrarouge au format $1''1''8''$ à l'aide d'un système d'initiation intégrant 4 initiateurs adressables. Nous devons développer un bloc technologique permettant de contrôler la combustion du pain infrarouge et un bloc d'initiation multipoint, et sommes donc confrontés à deux verrous technologiques, le contrôle des gaz de combustion d'un pain infrarouge, et l'intégration d'initiateurs dans une cartouche 1"1"8". Nous proposons, dans cette partie, de chercher des solutions technologiques permettant les lever.

A priori, et au regard de l'état de l'art, deux solutions sont possibles :

1. Compartimentation. Créer plusieurs parties de pain étanches les unes par rapport aux autres. Chaque partie si initiée s'allume entièrement, mais n'allume pas les autres. Le nombre - voire le type - de parties initiées contrôle le signal IR du leurre.

2. Structuration. Créer un pain dont la surface extérieure est inerte. Le feu se propage sous l'inertage et le lève au fur et à mesure. Quelque soit la façon dont il est initié, le pain s'allume complètement. La séquence d'initiation, la position des initiateurs et la forme du pain contrôlent le signal IR du leurre.

Puisque rien ne nous permet, a priori, de choisir entre l'une ou l'autre de ces solutions, nous choisissons d'évaluer les deux dans la suite.

2.2.3 Initiation

Nos solutions technologiques pour le pain infrarouge - structuration et compartimentation - impliquent toutes deux d'utiliser un réseau d'initiateurs contrôlés électroniquement pour faire varier le signal IR. Nous nous proposons donc, avant d'aller plus loin, de commencer par revenir rapidement sur les exigences de notre munition (voir figure 1.10).

Rappelons que nous devons assurer une sécurité de bouche. Le pain infrarouge ne doit être initié qu'après éjection, lorsque le leurre n'est plus connecté à sa plate-forme de lancement. Comme il n'est plus possible de transférer de l'énergie à la munition une fois en vol, il faut y embarquer l'énergie nécessaire à l'initiation du pain infrarouge. Il faut également générer un signal infrarouge représentatif de la plate-forme, et pour des raisons de densité énergétique, laisser un maximum de place à la fonction terminale dans la munition.

Il faut donc que les inflammateurs de la fonction terminale et le stockage d'énergie qui permet de les initier après éjection soient le moins volumineux possibles.

Il est donc impossible d'envisager utiliser des inflammateurs sécurisés type $1A/1W/5min$. L'énergie nécessaire pour initier 4 inflammateurs $1A/1W/5min$ occuperait environ $4''^3$ si stockée dans des condensateurs électrolytiques, ou $0.5''^3$ si stockée dans des supercondensateurs, ce qui, dans les deux cas, est incompatible avec nos contraintes de miniaturisation.

Nous proposons, pour remplir nos contraintes de miniaturisation et de sécurité, d'intégrer des initiateurs basse énergie couplés à une sécurisation électronique. En particulier, nous proposons d'utiliser les micro-inflammateurs développés au LAAS-CNRS. Non seulement ils peuvent être développés pour une initiation en basse ou haute énergie, mais ils peuvent aussi facilement s'interfacer avec une électronique de contrôle, s'initient dans des temps très inférieurs aux temps de réponse des compositions pyrotechniques Lacroix-défense ($<< 1ms$ contre $>> 10ms$). Enfin, ils sont eux-même de très petite taille ($< 10mm^3$), comme présenté figure 2.3

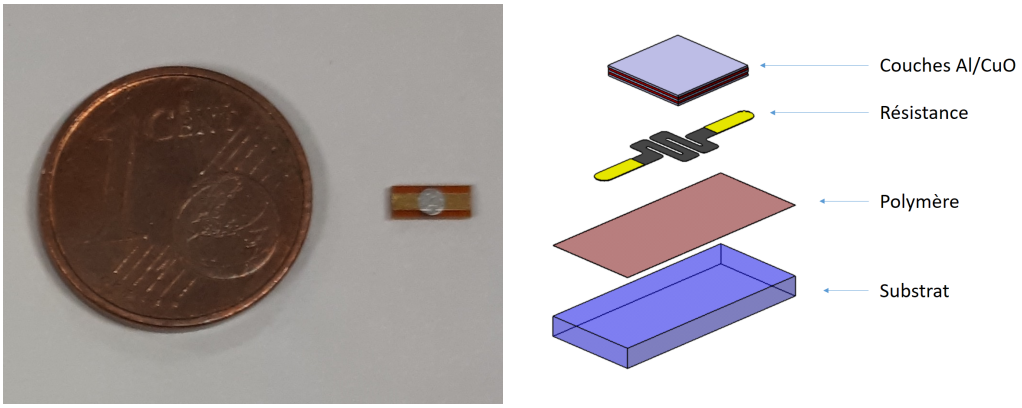


FIGURE 2.3 – Photo (gauche) et principe (droite) d'un micro-inflammateur - LAAS-CNRS

Puisqu'ils n'embarquent qu'une centaine de μg de matériau énergétique, nous anticipons qu'ils devront être utilisés conjointement à des compositions relativement sensibles. Nous proposons donc d'aligner les rainures d'initiation de pains infrarouges existants et nos micro-inflammateurs. Nous présentons dans la suite deux concepts de pains IR contrôlés par un étage de micro-inflammateurs sur puce, le premier basé sur une compartimentation du pain, et le second sur une structuration du pain. Puisque nos pains seront parallélépipédiques et que notre cahier des charges nous impose d'intégrer quatre points d'initiation, nous proposons d'intégrer 4 rainures qui courent le long des 4 faces, pour minimiser le risque de propagation de feu d'une rainure à l'autre. Bien entendu, nos concepts sont extensibles à d'autres géométries de pain, de rainures, et à plus de points d'initiation.

2.2.4 Propositions de solutions de bloc terminal contrôlable

Concept compartimentation

Notre premier concept intègre 4 pains dans une cartouche, séparés dans 4 chambres indépendantes et portant chacun une rainure. Les chambres sont séparées par un confinement plastique, pour limiter le poids total de la munition, comme représenté sur la figure 2.4.

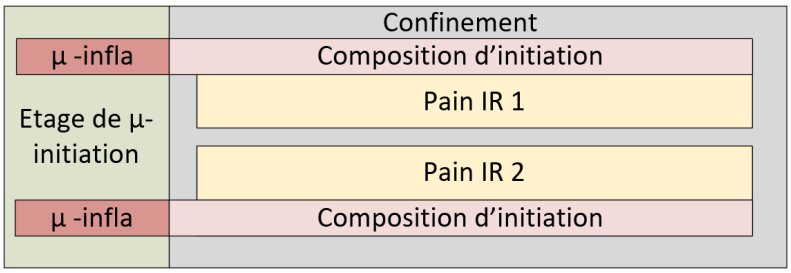


FIGURE 2.4 – Schéma de conception préliminaire d'un bloc terminal compartimenté

Concept structuration

Notre second concept intègre un pain inerté sur toutes ses faces, sauf sur le bout des rainures en face des micro-inflammateurs. L'inertage assure que le feu ne peut se propager d'une face à l'autre, comme représenté sur la figure 2.5.

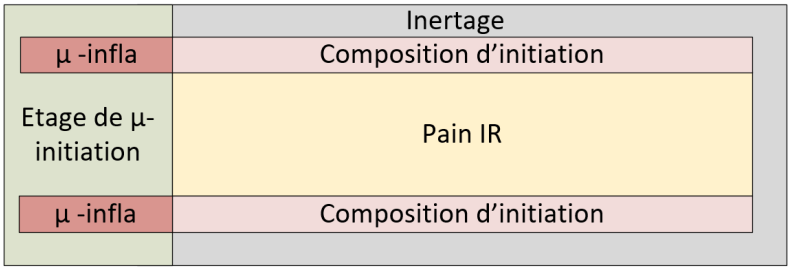


FIGURE 2.5 – Schéma de conception préliminaire d'un bloc terminal structuré

2.3 Prédimensionnement

Nous avons proposé deux concepts d'architectures de fonction terminales multi-point, sur base de contraintes mécaniques. Dans le cas de la solution compartimentée, il apparaît clairement qu'allumer 2, 3 ou 4 quarts de pain donnera un signal 2, 3 ou 4 fois plus important qu'allumer un seul quart de pain. Mais que penser du pain structuré, pour lequel il est nettement plus difficile de se représenter la combustion ? Et quid d'un allumage séquentiel ? Si nous voulons vérifier que nos solutions permettent effectivement de contrôler le signal infrarouge, et évaluer dans quelle mesure, il nous faut modéliser leur effet.

A la fin des années 1990, Lacroix-défense a développé un code de régression géométrique 2D - Vulcad - qui permet de calculer le débit volumique du pain. Lacroix-défense a démontré, par l'expérience, qu'il existe un coefficient de proportionnalité liant l'intensité du signal infrarouge émis lors de la combustion d'un pain infrarouge et le débit massique de matière brûlée, et qu'il est donc possible de modéliser l'effet d'un leurre en calculant simplement sa variation de volume au cours du temps. Pour se faire, Vulcad se base sur la méthode dite de *level-set* qui consiste à représenter la frontière d'un domaine par une hypersurface de dimension supérieure. Dit plus simplement, en 2D, il s'agit d'étudier une surface plutôt que la courbe qui la définit. Les méthodes de level-set sont simples à implémenter, modulaires, adaptables, et *à priori* aptes à résoudre tous types de problèmes de propagation [25] [26] [27] [28] [29], et notamment les problèmes de combustion solide [30] [31]. Malheureusement, les codes existants ont été développés pour des problématiques monocomposition, là où nous voulons évaluer la capacité de pains multicompositions à générer divers fronts 3D suivant l'allumage, pour contrôler le signal infrarouge.

La seule alternative viable aux méthodes de level-set, pour calculer la variation de volume d'un objet qui régresse par rapport à sa normale, aurait été d'utiliser des programmes de modélisation paramétrique commerciaux, aux rangs desquels CATIA, PTC Creo ou Inventor. Il suffit de paramétrer intelligemment un de ces modèles, par exemple en introduisant l'épaisseur de composition brûlée, pour calculer le volume d'un pain solide en fonction de l'épaisseur brûlée et, par dérivation temporelle, le débit volumique brûlé en fonction de l'épaisseur brûlée, de la vitesse de combustion et du temps. Cependant, cette méthode doit être entièrement paramétrée à la main, et ne permet pas de résoudre la propagation de multiples fronts de combustion sur un pain structuré. [32] [33]

Nous nous proposons donc de mettre à jour le code Vulcad, de l'adapter à un système 3D et aux problèmes multicomposition. En pratique, nous voulons résoudre le problème suivant :

Soit $\Omega = \bigcup_n \Omega_n \in \mathbb{R}^3$ un ensemble de $n \in \mathbb{N}$ solides combustibles et $\delta\Omega = \bigcup_n \delta\Omega_n \in \mathbb{R}^2$ leur frontière, leur front de combustion. Nous appellerons fonction de niveau (ou de level-set) toute fonction $\Psi : \mathbb{R}^4 \to \mathbb{R}$ qui s'annule sur et seulement sur $\delta\Omega$:

$$\Psi : \{x, y, z, t\} \in R^4 \to \begin{cases} 0 & \text{si } \{x, y, z\} \in \delta\Omega \\ f(x, y, z, t) & \text{sinon} \end{cases} \tag{2.1}$$

Avec f une fonction continue ou semi-continue de $\mathbb{R}^4 \to \mathbb{R}^*$

Par construction, $\Delta\Psi$ donne la normale à $\delta\Omega$. Sous l'hypothèse classique d'un pain qui régresse perpendiculairement à sa surface, sans considération de combustion érosive et avec une vitesse de combustion qui ne dépend ni de la température ni de la pression, l'équation de combustion de Ω s'écrit :

$$\begin{cases} \frac{\partial \Psi}{\partial t} + v.\Delta\Psi = 0 \\ \Psi(x, z, y, t = 0) = \psi^0(x, y, z) \end{cases} \tag{2.2}$$

Avec $v : \{x, y, z, t\} \in \mathbb{R}^4 \rightarrow \mathbb{R}^+$ la vitesse à laquelle notre frontière régresse.

Les méthodes de level-set regroupent toutes les méthodes numériques d'intégration des équations d'Hamilton-Jacobi, dont fait partie l'équation 2.2. Elles découlent des méthodes d'éléments finis, et doivent donc par conséquent respecter la condition de stabilité de CFL (Courant-Friedrich-Lewy) qui impose que plus la vitesse de propagation - ou dans ce cas de combustion - est élevée, plus le pas de temps doit être faible. Or, pour notre étude, il peut exister de grandes disparités de vitesses de combustion entre compositions d'initiation et composition infrarouge, jusqu'à des ratios 1 :1000, ce qui impliquerait un pas de temps 1000 fois plus petit que nécessaire, et un code qui tournerait 1000 fois plus longtemps que nécessaire.

Il nous faut donc soit un schéma de résolution implicite, soit un schéma de résolution qui ne met à jour que le front de combustion, et qui ne doit donc pas respecter le CFL sur l'ensemble du domaine. Nous avons conduit une étude 2D [34] pour comparer plusieurs solutions et choisissons d'étendre à la 3D le schéma explicite d'Ultra-BEE. Le schéma Ultra-BEE (UB) ne modélise que les points autour du front du combustion a été introduit par Duprés & Lagoutière en 2001 [35], pour des applications d'advection, et a depuis été élargi aux équations de Hamilton-Jacobi-Bellman par Bokanowski & Zidani [36]. Il n'a jamais été implémenté pour résoudre des problèmes de combustion. Dans la suite, nous détaillons le processus de modélisation dans son ensemble, à commencer par l'initiation, en continuant par le schéma de résolution et en finissant par le post traitement.

2.3.1 Description du modèle

Sur demande de Lacroix-défense, tous les scripts de prédimensionnement dont nous allons parler dans la suite ont été écrits en langage Matlab. Fort heureusement, les méthodes de level-set sont fortement matricielles, et donc tout à fait adaptées à une implémentation Matlab. Pour bien faire la différence avec les codes historiques Lacroix-défense dans les noms de fonctions, nous proposons de donner un nouveau nom à notre code de régression de surface, et l'appellerons *NINA*. NINA se décompose en trois grandes parties, initialisation, boucle principale et post-traitement. Nous donnons ci-dessous, figure 2.6, la structure générale de NINA et donnons dans la suite plus de détails quant au rôle de chacune de ces parties.

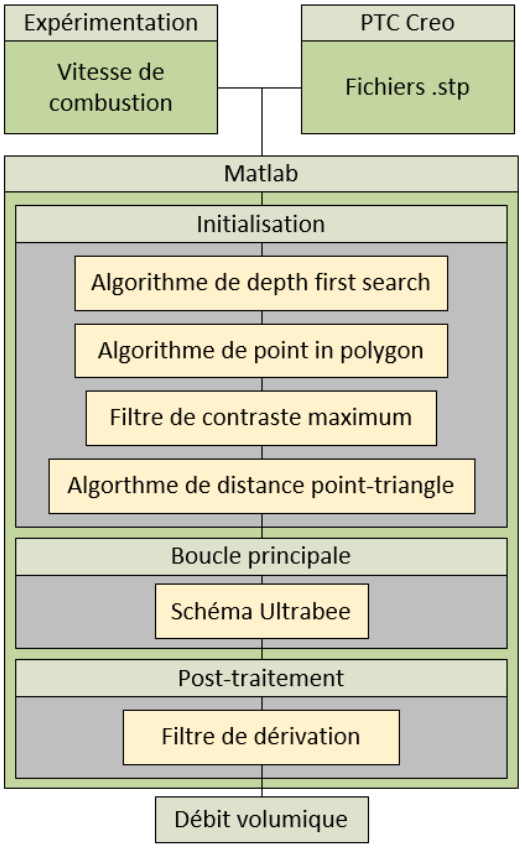


FIGURE 2.6 – Architecture NINA

Initialisation

Notre étape d'initialisation nous permet de passer d'un concept de pain, d'un croquis, à une structure de donnée résoluble par le schéma d'Ultra-BEE. Autrement dit, elle nous permet de construire Ψ et v. Jusqu'ici, Vulcad partait de géométries codées à la main. Sachant que nos géométries risquent d'être complexes, ne serait-ce que parce que 3D, et que nous voulons rendre NINA aussi facile d'utilisation que possible, nous nous proposons de commencer par dessiner nos pains sur un logiciel de dessin 3D dédié. Plus précisément, nous nous proposons de dessiner nos pains sous PTC Creo, et de les enregistrer au format *.slp*. Les fichiers *.slp* sont des fichiers textes décrivant un maillage triangulaire de la surface d'une pièce 3D, en associant une couleur à chaque maille de la surface. Ils peuvent donc être importés sous Matlab et permettent d'imposer facilement des conditions limites surfaciques, une couleur pour une condition. NINA permet ainsi d'importer un nombre arbitraire, n, de solides définis par leur surface et leur vitesse de combustion respective v_n. Une fois importé, les fichiers .slp nous permettent de définir $\mathbb{M}$, un maillage carré régulier qui contient notre système d'étude :

$$\mathbb{M} = \{x_i, y_j, z_k\}_{(\{i,j,k\}\in\mathbb{I})} = \{\{i.\Delta x + a_1, j.\Delta x + a_2, k.\Delta x + a_3\}, \{i,j,k\} \in \mathbb{I}\}$$
$$\mathbb{I} = [\![1, N_1]\!] * [\![1, N_2]\!] * [\![1, N_3]\!] \tag{2.3}$$

Avec $\{a_1, a_2, a_3\}$ les limites basses du maillage dans les trois dimensions cartésiennes et Δx le pas spatial
Définissons $N = \sqrt[3]{N_1.N_2.N_3}$, la densité de maillage

Une relation homothétique existe entre $\{x_i, y_j, z_k\}$ et $\{i, j, k\}$, ce qui permet de réécrire l'équation 2.2 sous forme matricielle :

$$\begin{cases} \frac{\partial \Psi}{\partial t}\big|_{i,j,k} + v_{i,j,k}.\Delta\Psi_{i,j,k} = 0 \\ \Psi_{(i,j,k,t=0)} = \psi^0_{i,j,k} \end{cases} \tag{2.4}$$

Nous pouvons maintenant chercher à construire $\psi^0_{i,j,k}$ et $v_{i,j,k}$, matrices définissant les conditions initiales de notre étude. Pour ce faire, nous utilisons l'algorithme de point-in-polyhedron de Jianfei Liu [37], et nous lui adjoignons un algorithme de *depth search first* [38] pour lui permettre de gérer les solides disjoints, en séparant les mailles par ensembles connectés. L'algorithme de DFS nous permet, par exemple, de modéliser dans un seul fichier .slp plusieurs rainures d'initiation. Combinés, ces deux algorithes nous permettent de vérifier quels points de $\mathbb{M}$ sont contenus dans quel solide n, et donc de construire les matrices suivantes :

$$v_{(i,j,k)} = \begin{cases} v_n & \text{si } \{x_i, y_j, z_k\} \in \Omega_n \\ 0 & \text{si } \{x_i, y_j, z_k\} \notin \Omega \end{cases} \tag{2.5}$$

$$\Psi^0_{(i,j,k)} = \begin{cases} 1 & \text{si } \{x_i, y_j, z_k\} \in \Omega \\ 0 & \text{si } \{x_i, y_j, z_k\} \notin \Omega \end{cases} \tag{2.6}$$

Enfin, il nous reste à imposer nos conditions limites. Nous commençons par déterminer les éléments de $\mathbb{M}$ sur la surface de notre pièce - nous ne considérons que des conditions limites surfaciques - en faisant passer $\Psi_{i,j,k}$ à travers un filtre de contraste maximum. Nous comparons ensuite la distance de chacun de ces éléments avec chacune des mailles triangulaires colorées de nos fichiers .slp. Si un point de la surface est à moins de $\frac{\sqrt{3}}{2}.\Delta x$ d'une surface colorée, nous lui imposons une condition limite en conséquence. Par exemple, inerter un point revient à passer sa vitesse à 0, et lever un inertage à un moment donné (pour simuler un allumage séquentiel) revient à passer sa vitesse à 0 jusqu'à ce que la simulation atteigne un point précis. Nous calculons la distance d'un élément à un triangle à l'aide de l'algorithme de David Eberly. [39]

Nous finissons d'initialiser les structures de données en moyennant $\Psi_{i,j,k}$:

$$\begin{array}{l} \nu^0_{(i,j,k),p} = \frac{1}{\Delta x^3} \int_{\mathbb{J}} \Psi^0_{i,j,k} \\ \mathbb{J} = [i - \frac{1}{2}, i + \frac{1}{2}] * [j - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}] * [k - \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}] \end{array} \tag{2.7}$$

Nous ne gardons enfin que les éléments advectés, pour transformer $\nu^0_{i,j,k,p}$ en matrice creuse $\nu^0_{i,j,k}$. Puisque Matlab ne gère pas nativement les matrices creuses en trois dimensions, nous utilisons à cet effet la bibliothèque *ndSparse* de Matt Jacobson. [40]

Boucle principale

La boucle principale utilise le schéma UB pour modéliser la régression du front de combustion. Elle se sert de $\nu^0_{(i,j,k)}$ et $v_{(i,j,k)}$ pour calculer le volume de chaque solide au cours du temps $V_n(t)$. Nous en donnons notre implémentation, limitée à la 3D, dans l'annexe A pour fluidifier la lecture. A noter que nous ne considérons que 15 directions d'advections, pour plus de rapidité d'exécution, définies par :

$$\begin{array}{l} A = \{\alpha\} = \{[\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z] \in \mathbb{R}^3\} \\ = \left\{ \begin{array}{ccccccccc} [1,0,0] & ; & [-1,0,0] & ; & [\sqrt{2},\sqrt{2},0] & ; & [-\sqrt{2},\sqrt{2},0] & ; & [0,\sqrt{2},-\sqrt{2}] \\ [0,1,0] & ; & [0,-1,0] & ; & [0,\sqrt{2},\sqrt{2}] & ; & [\sqrt{2},-\sqrt{2},0] & ; & [-\sqrt{2},0,\sqrt{2}] \\ [0,0,1] & ; & [0,0,-1] & ; & [\sqrt{2},0,\sqrt{2}] & ; & [0,-\sqrt{2},\sqrt{2}] & ; & [\sqrt{2},0,-\sqrt{2}] \end{array} \right\} \end{array} \tag{2.8}$$

Nous choisissons de faire toutes nos simulations avec ces 15 directions, puisqu'elles offrent une bonne précision pour un temps d'exécution faible quelque soit le modèle. A peut être adapté selon les besoins de précision ou de rapidité, en utilisant par exemple les 26 directions cartésiennes ou les 15 directions d'un réseau de Doehlert en 3D.

Post-processing

Grâce aux propriétés anti-diffusives d'UB, $\nu_{(i,j,k),p}$ garde un sens physique tout au long de la combustion, il est possible d'obtenir le volume v_n du solide n par simple somme :

$$v^m_n = \sum_{\{i,j,k\}} \nu^m_{(i,j,k),p} \tag{2.9}$$

Il nous suffit maintenant de faire une dérivée numérique de notre volume en fonction du temps pour obtenir le débit volumique, et donc l'effet de nos objets pyrotechniques. A noter que nous prendrons toujours dans la suite un CFL de 0.5 pour garantir la stabilité et pour lisser le volume en fonction du temps.

2.3.2 Résultats

Tous les calculs présentés dans cette partie ont été exécutés sur le dispositif suivant :

TABLE 2.1 – Dispositif de simulation

Processeur :	Intel Core i7-7700HQ @2.80GHz
Ram :	8 Go DDR4 @2400MHz
CG :	GeForce GTX 1050
SSD :	Tochiba 256Go M.2 2280
OS :	Windows 10 professionnel
Version Matlab :	R2015a

Validation analytique

Notre code a tout d'abord été validé sur des exemples résolubles analytiquement. D'une part, nous avons simulé la combustion d'une sphère homogène, de rayon $R = 1m$ et de vitesse de combustion $v_1 = 1m/s$, comme représenté figure 2.7 :

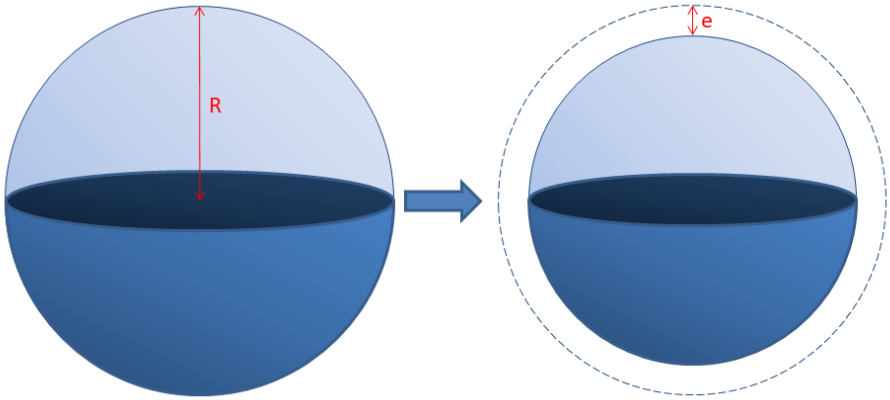


FIGURE 2.7 – Schéma du modèle d'une sphère homogène

Avec e l'épaisseur brûlée. Son débit volumique analytique s'écrit :

$$\left.\frac{dV}{dt}\right|_{an} = 4.\pi.v_1.(R - v_1.t) \tag{2.10}$$

Forts du débit analytique, nous pouvons calculer l'erreur L^2 relative de nos simulations. Avec u_{an} la solution analytique et u_{nu} la solution numérique, elle s'écrit :

$$\epsilon_{L^2} = \sqrt{\frac{\sum (u_{an} - u_{nu})^2}{\sum (u_{an})^2}} \tag{2.11}$$

Nous la représentons dans le graphe 2.8.

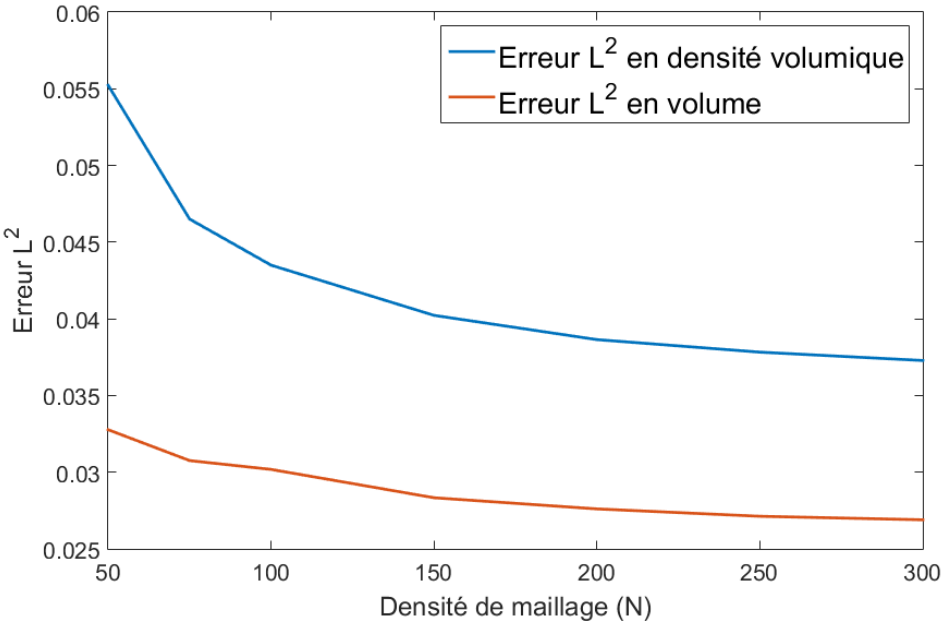


FIGURE 2.8 – Graphe de l'erreur en norme L^2 reliative entre NINA et la solution analytique dans le cas d'une sphère homogène

Nous donnons également, dans le tableau 2.2 les temps d'exécution du code :

TABLE 2.2 – Temps d'exécution en secondes en fonction de la densité de maillage pour la sphère homogène

N :	50	75	100	150	200	250	300
Initialisation :	0.4465	1.1826	2.4498	6.8392	14.525	27.874	50.272
Boucle :	14.838	34.113	69.940	436.45	972.48	1976.9	2618.1
Post-traitement :	0.1282	0.1774	0.3626	1.6986	3.5484	11.658	21.767

D'autre part, nous avons modélisé la combustion d'un cube multicomposition de côté $a = 1m$. Ce cube est constitué d'un empilement de trois couches de compositions pyrotechniques de vitesses de combustions respectives $v_1 = 100m.s^{-1}$, $v_2 = 10m.s^{-1}$ et $v_3 = 1m.s^{-1}$. Il est inerté sur toutes ses faces sauf une, de manière à régresser composition après composition.

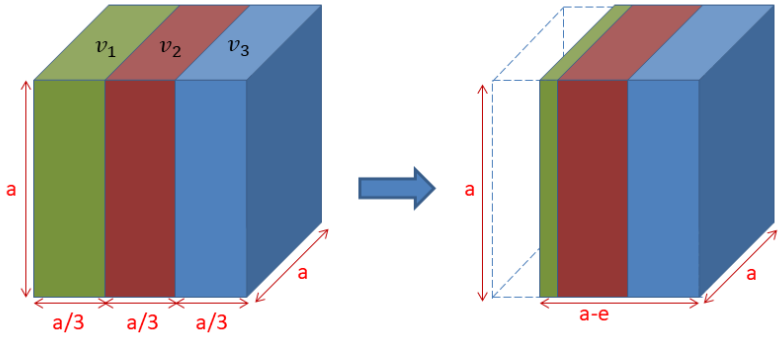


FIGURE 2.9 – Schéma du modèle d'un cube inhomogène partiellement inerté

La solution analytique s'écrit :

$$\left.\frac{dV}{dt}\right|_{an} = a^2.\begin{cases} v_1 & \text{si } t \in [0, \frac{a}{3.v_1}] \\ v_2 & \text{si } t \in [\frac{a}{3.v_1}, \frac{a}{3.v_1} + \frac{a}{3.v_2}] \\ v_3 & \text{si } t \in [\frac{a}{3.v_1} + \frac{a}{3.v_2}, \frac{a}{3.v_1} + \frac{a}{3.v_2} + \frac{a}{3.v_3}] \end{cases} \tag{2.12}$$

Elle nous permet de calculer l'erreur en norme L^2 relative, entre $N = 50$ et $N = 300$, que nous représentons dans le graphe 2.8.

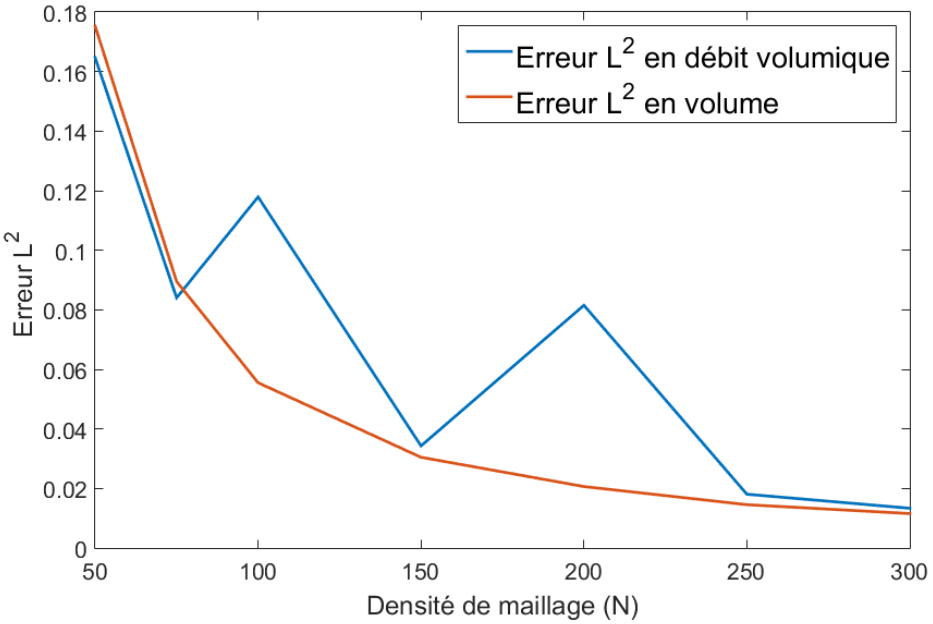


FIGURE 2.10 – Graphe de l'erreur en norme L^2 relative entre NINA et la solution analytique dans le cas d'un cube inhomogène

Nous donnons enfin, dans le tableau 2.3 les temps d'exécution du code.

TABLE 2.3 – Temps d'exécution en secondes en fonction de la densité de maillage pour le cube inhomogène

N :	50	75	100	150	200	250	300
Initialisation :	2.9785	4.4009	6.9304	16.234	29.973	53.823	90.104
Boucle :	32.679	73.508	153.21	542.63	1492.4	3222.1	5888.4
Post-traitement :	0.1265	0.1910	0.3204	0.8078	1.9917	4.1443	10.656

Nous pouvons voir que nos deux simulations convergent en maillage vers les solutions analytiques, et ce même dans un cas multi-composition impliquant de l'inertage. Les deux codes sont assez précis, et il nous semble qu'après $N = 150$, le gain de précision ne justifie plus l'augmentation du temps d'exécution. Le second modèle met deux fois plus de temps à être résolu que le premier, puisqu'il implique le double de steps algorithmiques. Dans le premier modèle, le front de combustion régresse des deux côtés et traverse $N/2$ mailles, là où dans le second il ne régresse que d'un côté et traverse N mailles.

A noter également, l'erreur ne converge pas en maillage vers 0, mais vers une asymptote : le schéma d'Ultra-BEE propage l'information de manière préférentielle selon ses directions d'advection. Il induit donc un biais numérique, qu'il est possible de réduire en augmentant le nombre de directions considérées, au coût de la performance algorithmique

Allumage partiel

De manière à évaluer l'impact d'un allumage partiel sur une solution de structuration, nous considérons les 5 séquences suivantes :

1. un inflammateur allumé
2. deux inflammateurs adjacents allumés simultanément
3. deux inflammateurs opposés allumés simultanément
4. trois inflammateurs allumés simultanément
5. quatre inflammateurs allumés simultanément

Sur un pain parallélépipédique avec quatre rainures centrées sur chacune des quatre faces.

Nous donnons dans le tableau 2.4 et le graphe 2.11 les résultats pour un pain de composition CERISE et des rainures COLIBRI, qui ont un rapport 1000 de vitesse de combustion ; et dans le tableau 2.5 et le graphe 2.12, les résultats pour un pain et des rainures MTV, qui ont un rapport 300 de vitesses de combustion.

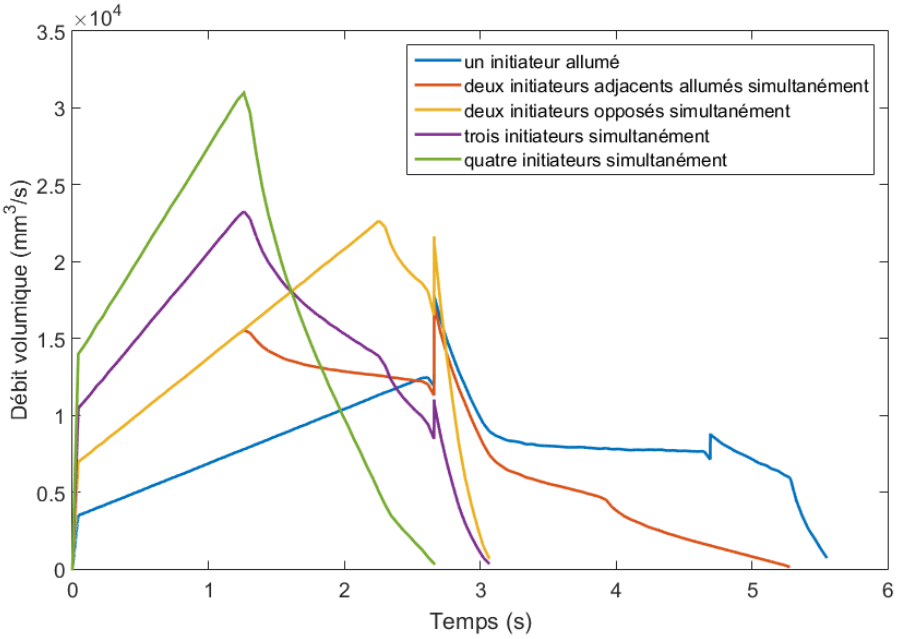


FIGURE 2.11 – Débit volumique en fonction du temps pour des pains CERISE/COLIBRI

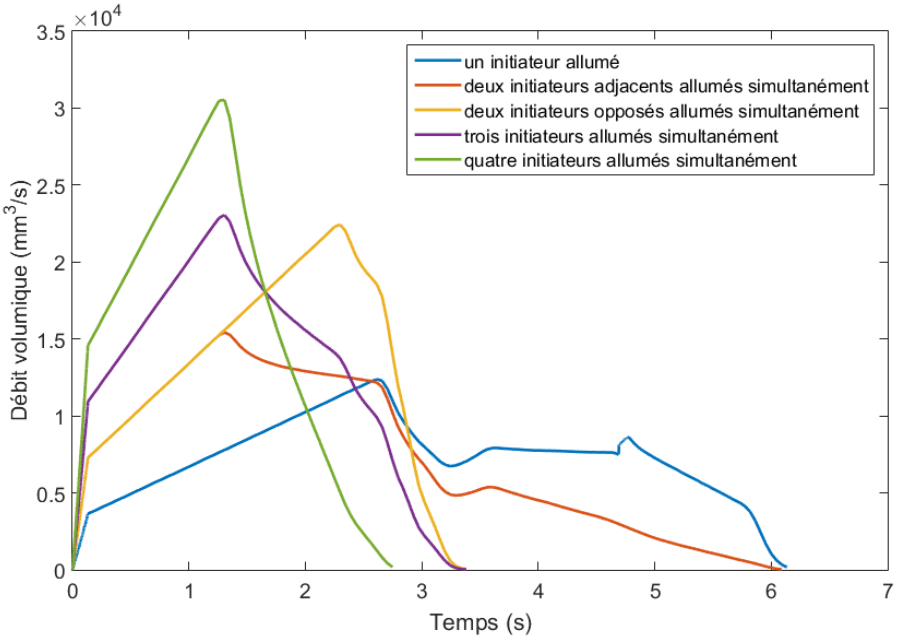


FIGURE 2.12 – Débit volumique en fonction du temps pour des pains MTV

Nombre d'initiateurs allumés	Niveau à 250ms ($mm^3.s^{-1}$)	Niveau à 500ms ($mm^3.s^{-1}$)	Niveau max ($mm^3.s^{-1}$)	Durée combustion (s)
1	4207	5086	17825	5.55
2 adjacents	8413	10172	17202	5.28
2 opposés	8413	10172	22662	3.07
3	12619	15258	23272	3.07
4	16829	20346	30974	2.66

TABLE 2.4 – Résultats allumage partiel CERISE/COLIBRI

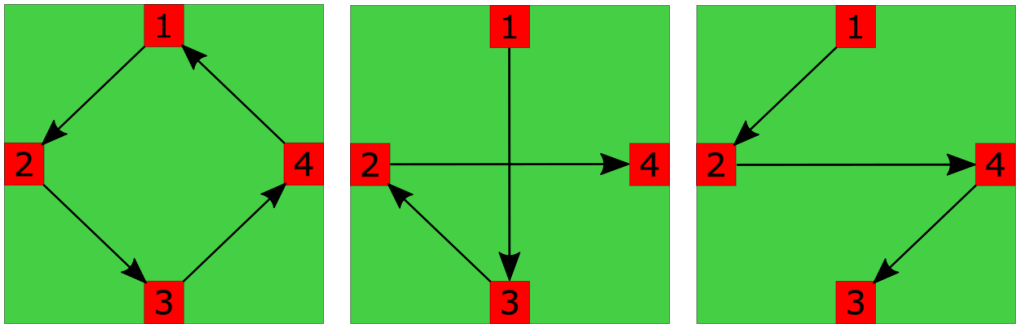
Nombre d'initiateurs allumés	Niveau à 250ms ($mm^3.s^{-1}$)	Niveau à 500ms ($mm^3.s^{-1}$)	Niveau max ($mm^3.s^{-1}$)	Durée combustion (s)
1	4053	4930	12381	6.14
2 adjacents	8106	9860	15421	6.09
2 opposés	8106	9860	22429	3.38
3	12159	14790	23053	3.38
4	16212	19720	30530	2.75

TABLE 2.5 – Résultats allumage partiel MTV

Nous voyons que l'allumage séquentiel permet de contrôler massivement le signal infrarouge émis par le pain. Il est possible de faire varier d'un facteur 4 le front de montée du pain et un facteur 1 à 2 la durée et le niveau max du signal infrarouge.

Allumage séquentiel

De manière à évaluer l'impact d'un allumage séquentiel sur une solution de structuration, nous considérons les trois séquences représentées en figure 2.13 :



Séquence 1 Séquence 2 Séquence 3

FIGURE 2.13 – Représentation schématique des séquences d'initiation des micro-inflammateurs

Et les 3 délais d'allumage suivants :

1. 4 inflammateurs allumés simultanément
2. 4 inflammateurs allumés à 10ms d'intervalle
3. 4 inflammateurs allumés à 250ms d'intervalle

Nous donnons dans le tableau 2.6 et le graphe 2.14 les résultats pour un pain de composition CERISE et des rainures COLIBRI.

Configuration	Niveau à 250ms ($mm^3.s^{-1}$)	Niveau à 500ms ($mm^3.s^{-1}$)	Niveau max ($mm^3.s^{-1}$)	Durée combustion (s)
Allumage simultané	16829	20346	30974	2.66
Seq. 1 - 10ms	16619	20152	30874	2.69
Seq. 2 - 10ms	16619	20152	30874	2.69
Seq. 3 - 10ms	16619	20152	30874	2.69
Seq. 1 - 250ms	4568	10160	27840	3.17
Seq. 2 - 250ms	4568	10160	29573	2.94
Seq. 3 - 250ms	4568	10160	27840	3.17

TABLE 2.6 – Résultats allumage séquentiel CERISE/COLIBRI

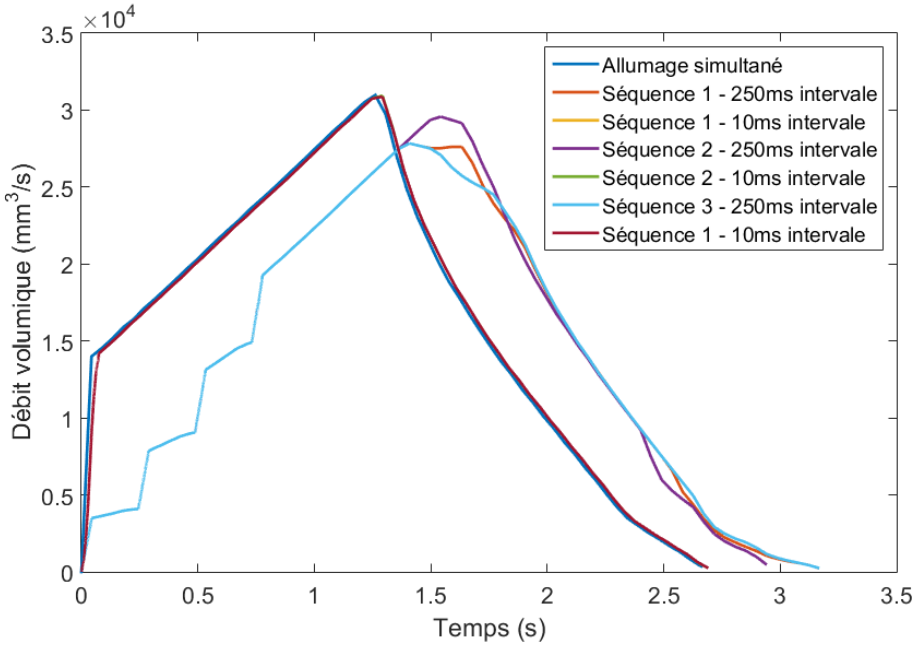


FIGURE 2.14 – Débit volumique en fonction du temps pour des pains CERISE/COLIBRI

Et dans le tableau 2.7 et le graphe 2.15, les résultats pour un pain et des rainures MTV :

Configuration	Niveau à 250ms ($mm^3.s^{-1}$)	Niveau à 500ms ($mm^3.s^{-1}$)	Niveau max ($mm^3.s^{-1}$)	Durée combustion (s)
Simultané	16212	19720	30530	2.75
Seq. 1 - 10ms	16027	19535	30563	2.78
Seq. 2 - 10ms	16027	19535	30581	2.78
Seq. 3 - 10ms	16027	19535	30563	2.78
Seq. 1 - 250ms	4238	9486	27803	3.24
Seq. 2 - 250ms	4238	9486	29532	3.02
Seq. 3 - 250ms	4238	9486	27802	3.24

TABLE 2.7 – Résultats allumage séquentiel MTV

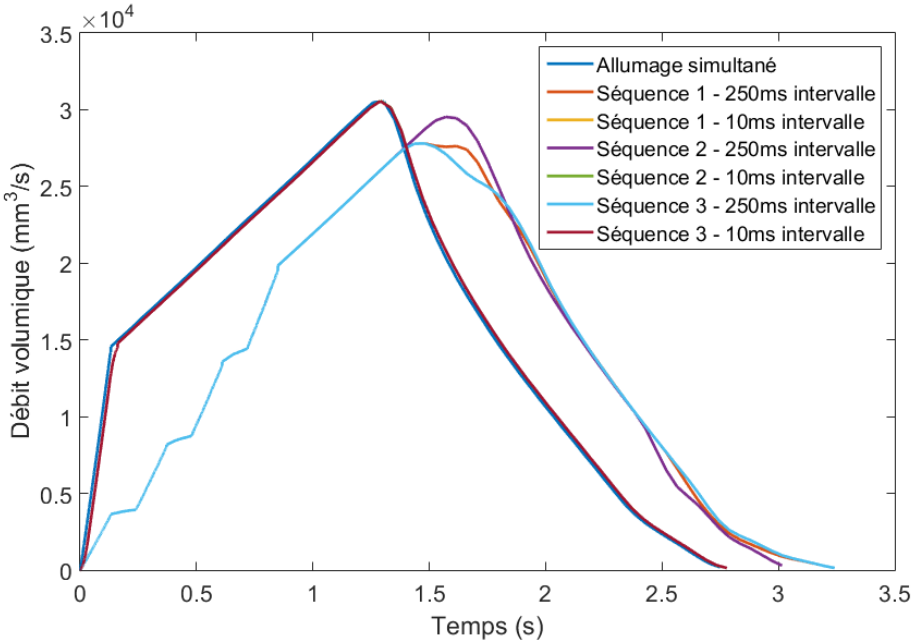


FIGURE 2.15 – Débit volumique en fonction du temps pour des pains MTV

2.3.3 Discussion et conclusion

Nous remarquons que, dans cette configuration, les résultats sont sensiblement les mêmes avec deux couples de composition différents. Les conclusions valent autant pour l'un que pour l'autre. Remarquons ensuite que la séquence importe peu. Dans les graphes 2.14 et 2.15, les séquences à 10ms d'intervale sont presque parfaitement superposées et les séquences à 250ms, si elles présentent quelques écarts, offrent globalement les mêmes profils de débit volumique.

En revanche, nous démontrons ici que l'allumage partiel, et à moindre niveau l'intervalle d'initiation lors d'un allumage total, permettent de piloter le signal infrarouge émis par le pain. En allumage partiel, il est possible de faire varier d'un

facteur 4 l'intensité du front de montée, et d'un facteur 2 le niveau max et la durée de la combustion. En allumage séquentiel avec 250 ms, il est possible de faire varier d'un facteur 4 l'intensité du front de montée, en conservant le profil de combustion d'un allumage en masse. Un allumage à 10ms d'intervalle quant à lui, donnera sensiblement les mêmes résultats qu'un allumage en masse. En particulier, cela implique que nous n'avons pas besoin d'allumer parfaitement simultanément nos micro-inflammateurs pour avoir un comportement d'allumage en masse.

Nous n'avons pas d'informations précises quant aux profils à reproduire par les leurres, ils sont en général classifiés. Nous anticipons cependant que l'objectif va être de faire varier sensiblement le niveau et la vitesse de montée en régime. Nous proposons donc de ne valider expérimentalement que les configurations suivantes :

1. 4 inflammateurs allumés simultanément, a titre de référence
2. 1 inflammateur allumé
3. 4 inflammateurs allumés à 250ms d'intervalle selon séquence 1

Le code que nous avons développé nous a permis de donner une validation préliminaire de nos concepts, et de planifier nos essais futurs. Il est capable de modéliser n'importe quelle combustion solide, pour des applications de leurrage, propulsion ou en phase de prédimensionnement, pour peu que le pain ait été modélisé en 3D sous PTC Creo. Puisqu'il donne en sortie le débit volumique, il est aussi capable de résoudre n'importe quel problème de propulsion, ou plus généralement de combustion solide.

Il est possible, à l'avenir, de l'améliorer en modifiant le modèle de combustion pour prendre en compte les effets de la pression, de la température, ou en prenant en compte la combustion érosive. Il est possible de prendre en compte d'autres conditions aux limites, comme une vitesse de propagation de flamme différente à la surface ou une inertie chimique de passage de feu d'un domaine combustible à un autre. Il est également possible, a plus long terme, de le coupler à un code de CFD pour étudier le comportement des gaz de combustion.

Il est enfin souhaitable, si ce code est à terme utilisé dans des campagnes de modélisation de plus grande ampleur, de passer au minimum la boucle principale sous un langage admettant plus d'optimisation mémoire et d'options de parallélisation, comme le CUDA.

2.4 Validation expérimentale

La simulation conforte notre choix de design, mais ne valide pas pour autant notre concept. Nous devons maintenant vérifier que nous sommes capables, à l'aide de micro-inflammateurs, de piloter la combustion d'un pain infrarouge et, par extension, un signal infrarouge. La validation se déroule en trois étapes :

1. Dans un premier temps, nous validerons la capacité de micro-inflammateurs LAAS-CNRS à allumer des compositions d'initiation existantes de pains infrarouges.
2. Dans un second temps, nous validerons nos solutions de structuration et confinement.
3. Dans un troisième temps, nous validerons la capacité de contrôle, et vérifierons les résultats extraits de NINA.

Trois essais seront réalisés, un essai d'allumage, un essai de tir statique semi-inerte et un essai de tir statique actif.

2.4.1 Essais d'allumage de compositions d'initiation de pains IR à l'aide de micro-inflammateurs

Objectifs

Nos concepts de contrôle impliquent de mettre en face des micro-inflammateurs et des compositions d'initiation pour pain infrarouge. Il peut donc exister un décalage géométrique entre les deux, à cause des tolérances mécaniques entre le bloc de micro-initiation et le pain, ou de la rugosité de surface des rainures. Nous proposons donc de vérifier si nous sommes capables d'allumer et d'estimer jusqu'à quelle distance.

Plan d'expérience

Deux compositions d'initiation standard sur les leurres Lacroix-défense seront testés, une COLIBRI (90AME04A) et une MTV (30IRA23A). La première est connue pour être sensible mais pour brûler lentement, et la seconde pour être peu sensible mais pour brûler rapidement. Des micro-inflammateurs seront initiés au contact de COLIBRI et de MTV puis la distance sera augmentée par pas de 0.5mm jusqu'à échec d'allumage. Nous anticipions la distance d'allumage autour de 1mm.

Dispositif de test

Pour interfacer nos micro-inflammateurs à une source de courant, nous avons choisi de les reporter sur une carte imprimée (PCB) à l'aide d'un pont de colle conductrice, pour réduire les coûts et les délais. Le plan du tracé et un schéma du concept sont présentés en figure 2.16.

Nous fixons l'inflammateur à une potence et déplaçons la composition selon z à l'aide d'un table élévatrice de précision. Dans son ensemble, notre dispositif de test se présente comme présenté en figure 2.17 :

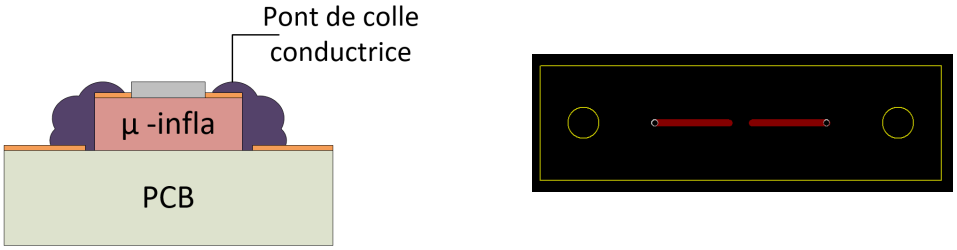


FIGURE 2.16 – Principe de montage micro-inflammateurs (gauche) et traces PCB (droite) pour l'essai d'allumage

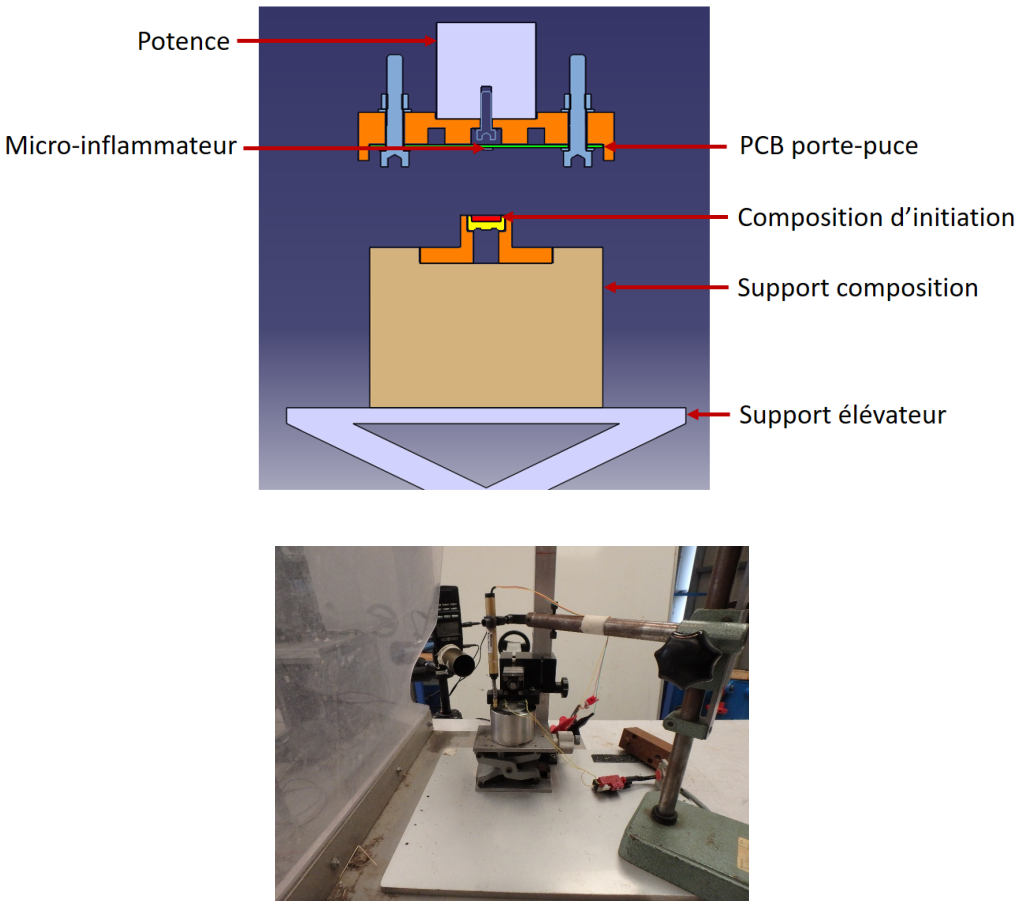


FIGURE 2.17 – Schéma de principe (haut) et photo (bas) du dispositif d'essai d'allumage

N'ayant pas de table élévatrice graduée à disposition, nous avons utilisé un potentiomètre à ressort pour mesurer la distance entre la puce et la composition d'initiation. Nous mesurons également :

- l'intensité lumineuse émise par la réaction des compositions d'initiation à

l'aide d'un photomètre Minolta T10

- l'intensité parcourant les micro-inflammateurs à l'aide d'une pince ampérométrique Chauvin Arnoux E6N
- et la tension aux bornes des micro-inflammateurs

Sur une centrale d'acquisition 6 voies GRAPHTEC GL900. Le décalage entre la mise à feu des initiateurs (rupture de continuité de ligne électrique) et la prise en feu de la composition d'initiation donne le délai d'initiation de la composition. L'initiation est effectuée à l'aide d'un boîtier de tir Lacroix-défense à intensité régulée qui génère un créneau de 2A pendant 50ms.

Résultats

Les résultats du premier essai pour le bloc terminal sont synthétisées dans le tableau 2.8 :

TABLE 2.8 – Résultats essais d'allumage par micro-inflammateurs

n° tir	Composition	Distance d'allumage (mm)	Délai init puce (ms)	Délai init compo (ms)	Observations
1	MTV	0	NO	11.6	Allumage
2	MTV	0	NO	7.8	Allumage
3	MTV	0	NO	9.5	Allumage
4	MTV	1	0.7	24.3	Allumage
5	MTV	1.5	1	24.0	Allumage
6	MTV	1.5	0.8	39.4	Allumage
7	MTV	2	0.7	-	Non allumage
8	MTV	2	0.6	-	Non allumage
9	Colibri	0	NO	99	Allumage
10	Colibri	0	NO	156	Allumage
11	Colibri	0	NO	NO	Allumage
12	Colibri	1	0.9	165	Allumage
13	Colibri	2	0.9	190	Allumage
14	Colibri	2	1	184	Allumage
15	Colibri	2	1	214	Allumage
16	MTV	2.5	1.1	301	Allumage
17	MTV	3	1.3	360	Allumage
18	MTV	3.5	0.9	239	Allumage

A noter que seuls deux tirs ont conduit à une défaillance, le pont de colle conductrice, trop fin, a lâché avant que la résistance de la puce ne monte suffisamment en température.

Un exemple de courbe d'intensité lumineuse et électrique en fonction du temps est donné figure 2.18, pour le tir 12. Le temps d'initiation est pris comme la différence entre le temps de claquage de la puce et le temps auquel est atteint le pic maximal d'intensité lumineuse de la composition. Le premier pic d'intensité lumineuse correspond au flash émis lors de la combustion du micro-inflammateur. Il n'est visible que si micro-inflammateur et composition ne sont pas au contact.

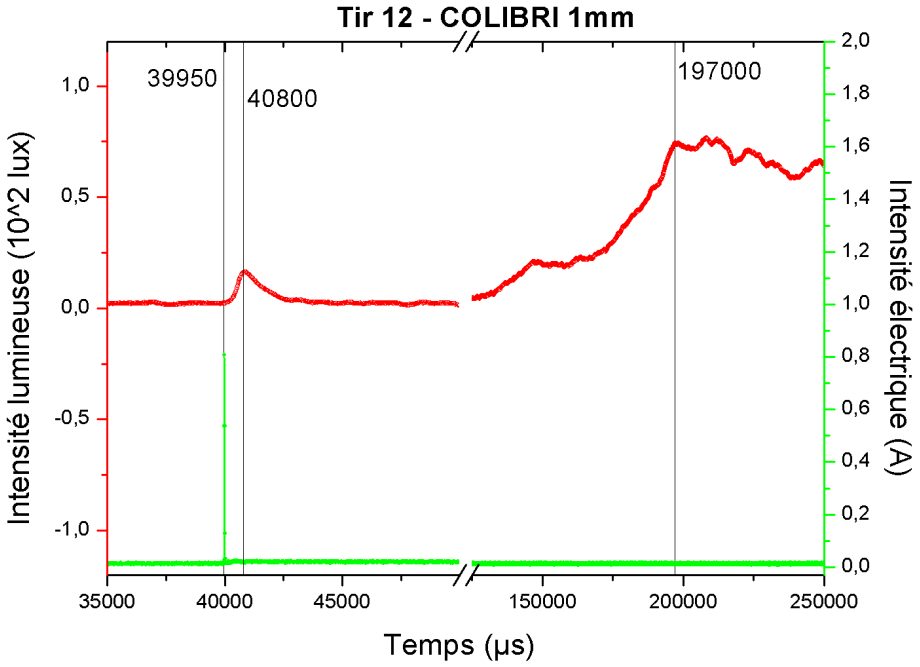


FIGURE 2.18 – Intensités lumineuses et électriques en fonction du temps pour un tir de micro-inflammateur à 1mm de $10mm^3$ de COLIBRI

Discussion

Tout d'abord, nous pouvons remarquer que les micro-inflammateurs permettent bel et bien d'allumer des compositions d'initiation pour leurres infrarouges, qu'elles soient très sensibles ou moyennement sensibles.

Les temps d'initiation semblent s'allonger et devenir moins reproductibles à mesure que nous écartons l'initiateur de la composition. Cela étant dit, ces effets ne se manifestent qu'à plus d'$1mm$ pour la MTV et plus de $2.5mm$ pour la Colibri. Il est donc parfaitement possible d'imaginer une tolérance géométrique millimétrique entre les rainures et les micro-inflammateurs, sans que cela vienne rendre le dispositif inutilisable. En mode dégradé, il serait même possible d'allumer de la MTV jusqu'à $1.5mm$ et de la Colibri jusqu'à plus de $3.5mm$.

Puisque la différence principale entre les deux compositions tient à la température d'auto-initiation (faible pour la COLIBRI et élevée pour la MTV), il est raisonnable de penser que le mécanisme d'initiation est piloté en température. Les micro-inflammateurs forment un nuage de gaz et de particules chaudes (voir figure 2.19) qui se refroidit au fur et à mesure. Plus la composition à allumer s'initie à faible température, plus il sera possible d'éloigner les micro-inflammateurs, et inversement, plus la composition s'initie à forte température, plus il sera nécessaire de les rapprocher.

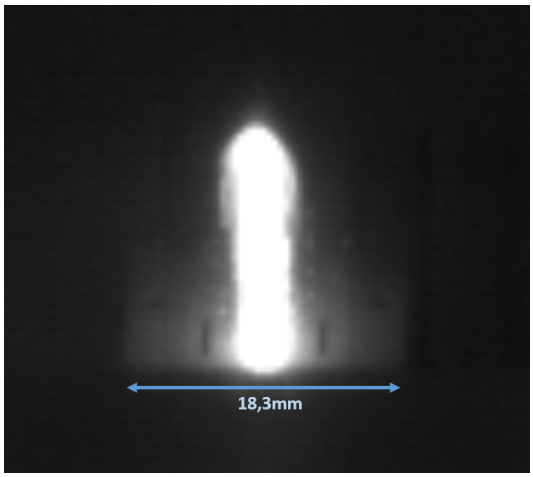


FIGURE 2.19 – Photo d'une flamme générée par micro-inflammateur

Au contact, les temps d'initiation sont inférieurs à l'existant ($20ms$ pour la MTV et $200ms$ pour la Colibri), probablement à cause du fait que nous n'avons pas à attendre que les gaz du relai ne se propagent autour de la composition d'initiation.

A noter qu'un deuxième essai de caractérisation de ce type était prévu, pour obtenir des résultats plus statistiquement significatifs, en imposant la distance entre initiateur et composition à l'aide d'une cale fixe. Même si la composition pour ces essais était, au regard de courbes DSC (Differential Scanning Calorimetry ou calorimétrie différentielle à balayage), aussi sensible que la précédente à une auto-initiation en température, elle ne s'allumait pas, même au contact. Il s'agissait d'un surplus de solvant lors du dépôt de Colibri, qui a conduit à la formation d'une couche purement polymère à la surface de la composition, et qui la protégeait d'une attaque en température.

2.4.2 Essais d'allumage de pains IR semi-inertes à l'aide de micro-initiateurs

Objectifs

Nous avons proposé dans la partie 2.2.2 deux solutions de contrôle de la combustion. La solution de compartimentation ne nous parait pas présenter de vrai

verrou technologique, à l'inverse de la solution de structuration qui implique un contrôle de la flamme. Nous proposons donc, avant de monter vers des vrais essais de contrôle, de faire un essai intermédiaire pour évaluer des solutions de structuration. Il permettra en outre de valider l'usage des micro-inflammateurs en situation, et d'anticiper de futurs problèmes sur des essais plus complexes.

Dispositif de test

Deux solutions de structuration ont été choisies, au plus proche de ce qu'il se fait actuellement. Nous proposons d'observer l'allumage de pains PVC (polychlorure de vinyle) inertes parcourus de rainures de COLIBRI (voir figure 2.20) lorsqu'initiés individuellement par des micro-inflammateurs LAAS-CNRS. Ces cartouches semi-inertes subiront des essais d'allumage pour observer le délai, la vitesse et le mode de d'allumage par caméra rapide. Pour chaque solution, 4 cartouches seront tirées avec des délais de 250ms entre initiateurs, et 4 autres avec des délais de 10ms entre initiateurs.

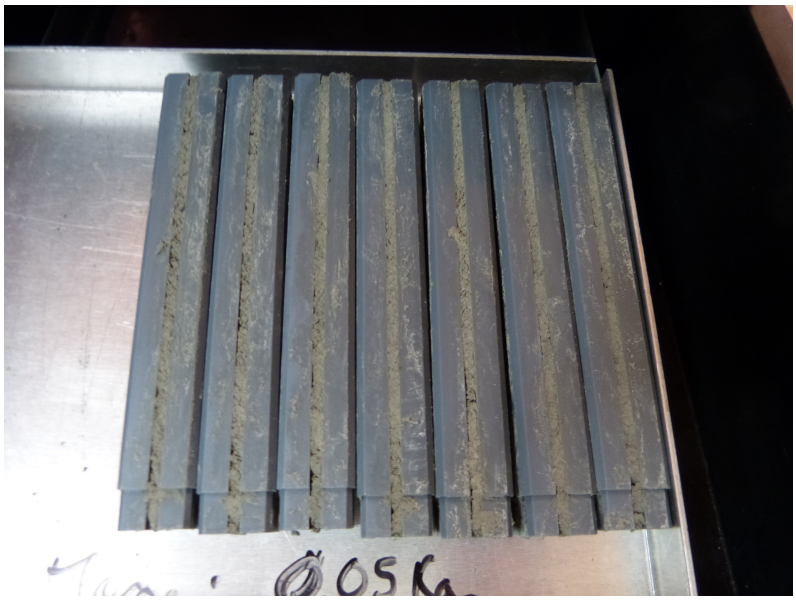


FIGURE 2.20 – Pains PVC parcourus de rainures COLIBRI

Avant toute chose, il nous faut monter les micro-inflammateurs dans des conditions et des dimensions représentatives d'une munition existante. Les deux solutions utilisées jusqu'alors - colle conductrice et wire bonding - sont connues pour être fragiles et peu fiables, comme nous l'avons aussi observé lors de notre essai d'allumage. Une nouvelle solution, qui consiste à reporter nos micro-inflammateurs sur un PCB (Printed Circuit Board, circuit imprimé) troué a été évaluée. Le concept est représenté figure 2.21).

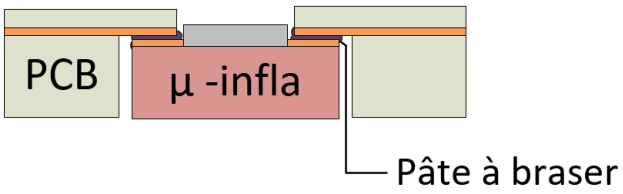


FIGURE 2.21 – Principe de report de micro-inflammateurs par brasure

L'utilisation de la crème à braser basse température ECOREL FREE LT 140-18 d'Inventel a été évaluée pour limiter l'impact de la température de refusion sur les micro-inflammateurs. Les micro-inflammateurs ont été reportés à l'aide d'une machine de report Tresky 3000. Le PCB de report est constitué des deux PCBs laminés, de manière à avoir une couche conductrice entre deux couches isolantes. Le PCB le plus épais n'est pas en toute rigueur nécessaire, il nous permet seulement d'augmenter la résistance mécanique de l'ensemble, tout en proposant des pads de soudure plus larges et mieux placés.

Pour coïncider avec les trous ronds de nos PCBs, nous proposons de faire des surfaces de thermites rondes, et en anticipation du dépôt manuel de pâte à braser, nous proposons des micro-inflammateurs avec des pads étendus (voir figure 2.22).

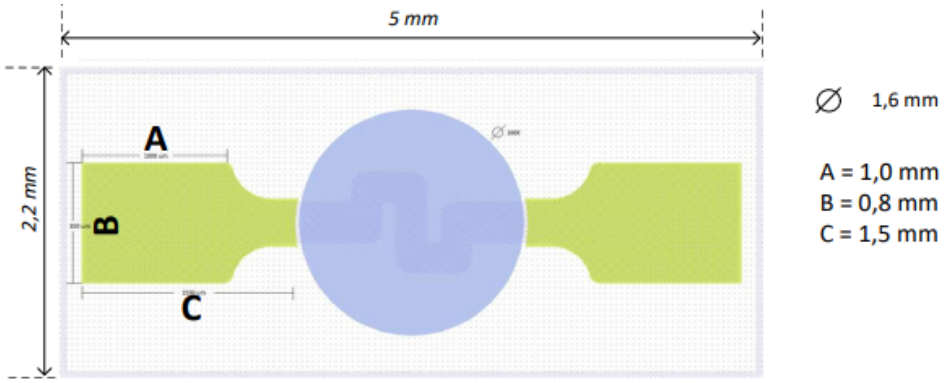


FIGURE 2.22 – Schéma côté des micro-inflammateurs CASSIS

Comme les pads sont en couches minces, d'une épaisseur de $300nm$, ils sont *cannibalisés* lors de la fonte de la brasure et ne permettent pas d'assurer la tenue mécanique des micro-inflammateurs. Nous proposons donc de les encapsuler dans une résine thermodurcissable, déposée manuellement avant passage en four de refusion (voir figure 2.23). Pour ce faire, Une résine Epotek 353 NDT d'epoxy technology est déposée puis polymérise sur un cycle de refusion de l'ECOREL LT140-18.

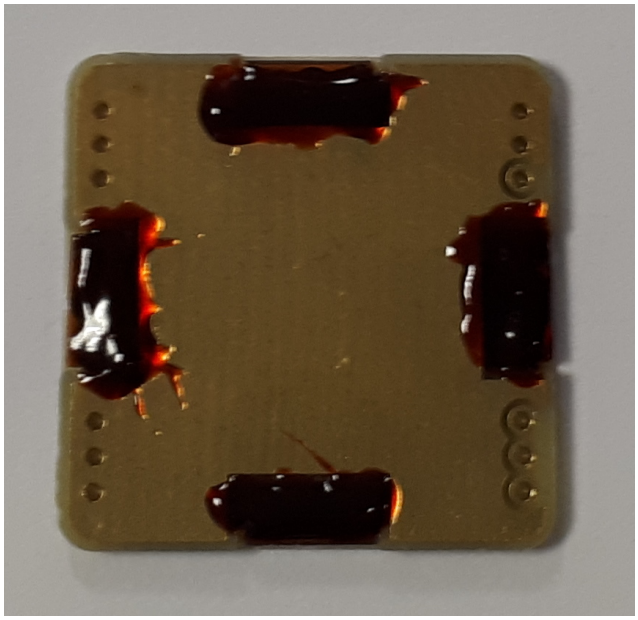


FIGURE 2.23 – Photo des micro-inflamateurs encapsulées après passage en four de refusion

Les PCB porte-puces et les pains semi-inertes sont assemblés sur une pièce imprimée 3D au format 1"1"8". Deux solutions potentielles d'inertage de surface sont possibles. Dans une première solution, le pain semi-inerte est entouré de scotch. Nous anticipons que le scotch se lève au fur et à mesure de la combustion des rainures. La résistance naturelle du scotch devrait assurer une montée en pression reproductible. Un schéma de principe en est donné en figure 2.24.

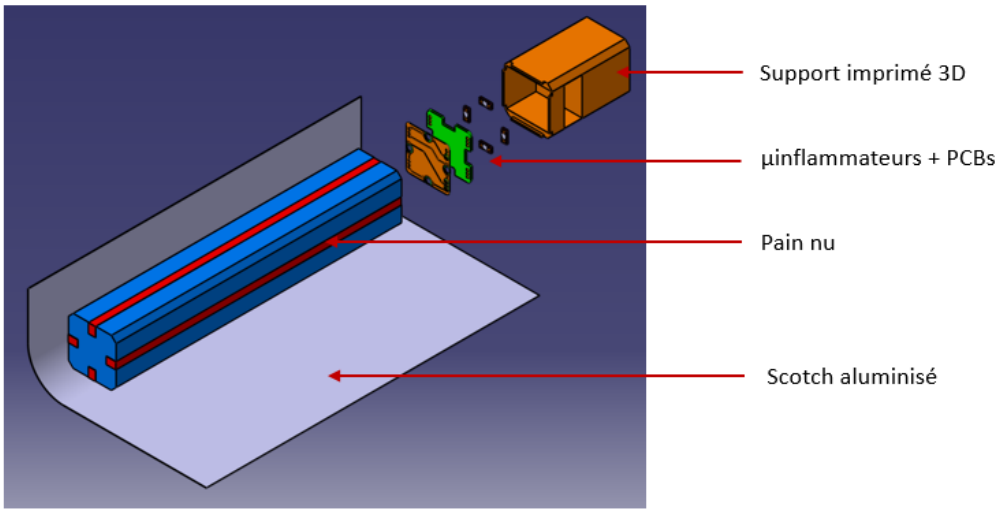


FIGURE 2.24 – Schéma technologique - Démonstrateur de structuration par papillotage

Les micro-inflammateurs sont montés sur un PCB, lui-même collé à la DP190 de 3M - une colle bi-composant - sur une pièce imprimée 3D. Le papillotage couvre le pain et s'étend jusqu'à la surface du support, il maintient donc le pain en contact avec le PCB porte-puces.

Dans une seconde solution, le pain semi-inerte est protégé par un mélange résine/alumine. Nous anticipons que l'inertage se lève au fur et à mesure de la combustion des rainures, mais lâche trop rapidement pour assurer une montée en pression reproductible. Nous proposons donc de mettre ce pain dans un fourreau plastique. Un schéma de principe en est donné en figure 2.25.

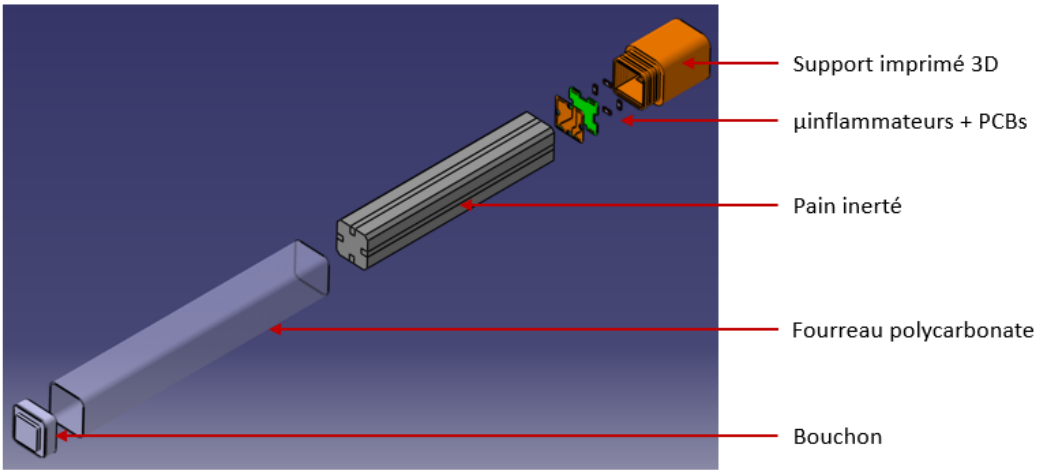


FIGURE 2.25 – Schéma technologique - Démonstrateur de structuration par inertage

Ici aussi, les micro-inflammateurs sont montés sur un PCB, lui-même collé à la DP190 sur une pièce imprimée 3D. Un fourreau, collé à la DP190 sur le support met le pain en position, et un bouchon plastique, collé à la DP190 le maintient en position.

Nous mesurons :

- l'intensité lumineuse émise par la combustion des compositions d'initiation à l'aide d'un photomètre Minolta T10
- l'intensité parcourant les micro-inflammateurs à l'aide d'une pince ampérométrique Chauvin Arnoux E6N
- et la tension aux bornes des micro-inflammateurs

Sur une centrale d'acquisition six voies GRAPHTEC GL900. L'initiation est effectuée à l'aide d'un boîtier de tir multipoint à intensité régulée qui génère un créneau de 2A pendant 10ms. La combustion est observée à l'aide de deux caméras rapides, de part et d'autre des pains, tournant à 1000 images par secondes.

Plan d'expérience

Pour chaque concept, deux séquences seront testées :

1. 4 inflammateurs allumés simultanéments.
2. 4 inflammateurs allumés à 250ms d'intervalle.

Chaque essai est répété trois fois pour chaque concept, pour un total de 12 tirs.

Résultats

Les pains se sont allumés à chaque fois, aucune défaillance n'a été mise en évidence, liée à une distance trop grande entre micro-inflammateurs et rainures ou à la présence d'une couche protectrice sur les compositions. Malheureusement, quel que soit la séquence imposée, les gaz se sont propagés et ont allumé les quatre rainures de manière incontrôlée.

La vidéo rapide nous a permis de nous rendre compte que, dans le cas des pains couvert de papillotage, le scotch est suffisamment résistant pour ne pas se faire blaster lors de la combustion des rainures. Les gaz le décollent et se propagent sur la surface du pain, allumant les autres rainures. Dans le cas des pains couverts de résine, le fourreau, même transparent, occulte ce qu'il se passe. Une analyse des pains après tir nous a appris que le confinement est trop important, les gaz montent suffisamment en pression pour arracher la couche de résine, et allumer les rainures qui se trouvent en dessous avant rupture du fourreau. Des images de la combustion des deux concepts sont donnés en figure 2.26.

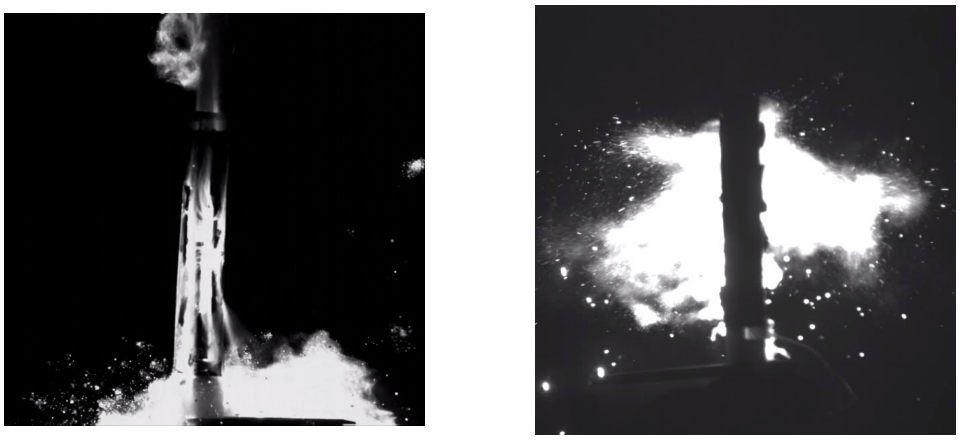


FIGURE 2.26 – Images extraites des videos rapides de la combustion du concept fourreau (gauche) et du concept papillotage (droite)

Les résultats du photomètre étaient trop bruités pour être exploitables. Le scotch et le fourreau se brisent de manière aléatoire, les gaz sont donc libérés de manière aléatoire et le signal photométrique n'est pas représentatif de la combustion, et ce pour tous les essais que nous avons effectués.

Discussion

Les deux concepts de structuration ne sont donc pas viables en l'état. Les rainures génèrent à la fois trop de gaz pour qu'une simple couche de résine suffise à protéger le pain, et trop peu pour blaster un papillotage instantanément, avant que les gaz ne se propagent en dessous. Les seuls gaz générés par les rainures sont difficiles à contrôler.

Nous proposons donc dans la suite, pour les deux concepts de contrôle de pain infrarouge, de raisonner en terme de cloison sacrificielle. Plutôt que de compter sur la rupture ou la tenue en pression d'une trame de scotch ou d'une couche de résine, il s'agit de donner aux gaz une zone de fragilité dans laquelle s'engouffrer. L'objectif sera de la rendre suffisamment fragile pour être certain que ce soit elle qui lâchera en premier, et suffisamment solide pour être certain que les rainures auront eu le temps de monter en pression.

2.4.3 Essais d'allumage de pains IR actifs à l'aide de micro-initiateurs

Objectifs

Nous avons vu au travers de l'essai précédent que, si nous sommes capables d'allumer le pain, les gaz générés sont libérés trop violemment pour être contrôlés directement. Un troisième et dernier essai de validation a été conçu. Des solutions technologiques complètes de structuration et de confinement sont proposées, et validées, sur des pains actifs dans le cadre des séquences définies à la fin de la section 2.3.3.

Dispositif de test

Nous choisissons d'étudier une solution de structuration et une solution de compartimentation, dans lesquelles des pains de CERISE parcourus de rainures de COLIBRI sont intégrés puis initiés par des micro-inflammateurs LAAS-CNRS.

Ce nouveau concept de compartimentation intègre 4 pains dans une cartouche, séparés dans 4 chambres indépendantes et portant chacune une rainure. Les chambres sont formées d'une cloison plastique et d'une surface de scotch sacrificielle. La cloison plastique assure que les gaz ne peuvent pas se transmettre d'une chambre à l'autre. La surface de scotch sacrificielle se brise pour laisser sortir les gaz et former le nuage de gaz chauds derrière le leurre. Elle se brise suffisamment tard pour assurer une montée en pression et un allumage reproductible du pain, et suffisamment tôt pour éviter d'endommager la cloison sous l'effet de la pression. Pour plus de simplicité dans le collage du scotch et le découpage des pains, nous avons choisi d'intégrer 4 pains triangulaires, comme représenté en figure 2.27

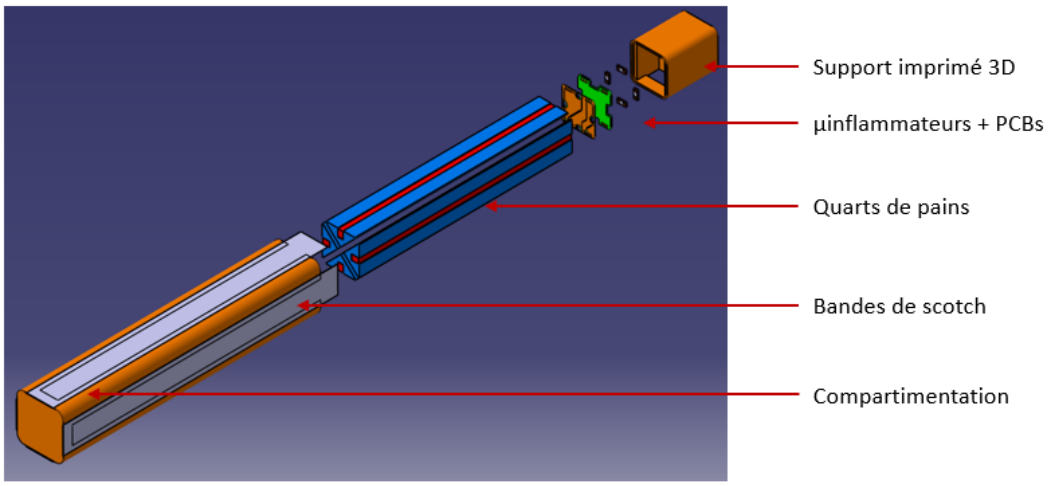


FIGURE 2.27 – Schéma technologique - solution de compartimentation

Notre concept de structuration intègre un pain inerté sur toutes ses surfaces à l'aide d'un mélange {résine + alumine}. Quatre morceaux de scotch aluminisé couvrent les rainures pour leur assurer une protection thermique supplémentaire, et pour assurer une petite montée en pression et une bonne prise en feu du pain derrière les rainures. Le tout est représenté en figure 2.28.

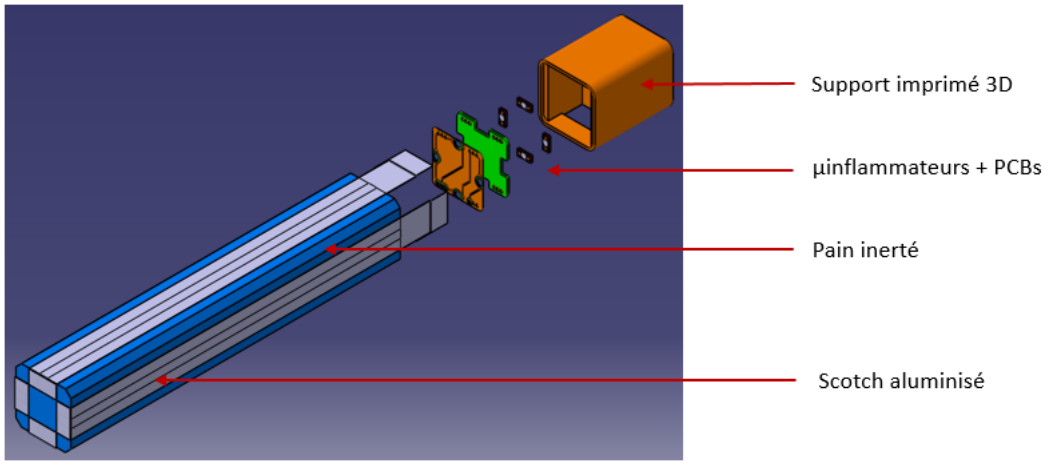


FIGURE 2.28 – Schéma technologique - solution de structuration

Nous mesurons :

- l'intensité infrarouge émise par la combustion des compositions d'initiation à l'aide d'un radiomètre de conception Lacroix
- l'intensité parcourant les micro-inflammateurs à l'aide de pinces ampérométrique Chauvin Arnoux E6N
- et la tension aux bornes des micro-inflammateurs

Sur une centrale d'acquisition six voies GRAPHTEC GL900. L'initiation est effectuée à l'aide d'une Arduino Uno, d'un shield relais DFR0144 et d'une alimentation stabilisée en courant. L'ensemble génère des créneaux de 2A pendant 10ms. La combustion est observée à l'aide de deux caméras rapides, l'une noir et blanc l'autre couleur, tournant à 1000 images par secondes. les tirs sont effectués en tunnel. L'ensemble du dispositif est représenté figure 2.29.

FIGURE 2.29 – Dispositif d'essai pour allumage pains IR actifs

Plan d'expérience

Deux nouvelles solutions de fonctions terminales sont proposées, l'une basée sur de la structuration et l'autre sur du confinement. Les deux font usage de cloisons sacrificielles en scotch aluminisé pour assurer que les gaz n'endommagent pas les inertages ou les cloisonnements. Pour chaque solution d'inertage, nous effectuerons trois tirs d'un seul initiateur, trois tirs de quatre initiateurs séparés de 10ms et trois tirs de quatre initiateurs séparés par 250ms.

Résultats

Si les essais sur la solution structurée se sont bien passés, les essais sur la solution compartimentée ont été plus erratiques : la colle a parfois coulé, parfois laissé un interstice par lequel les gaz se sont engouffrés. Durant les tirs partiels toutes les chambres se sont initiées, et durant les tirs séquentiels, seules certaines des chambres se sont initiées. Nous présentons tout de même les mesures en bande 1 du radiomètre, pour des tirs sur des pains structurés et compartimentés. Ils sont respectivement représentés en figure 2.30 et 2.31.

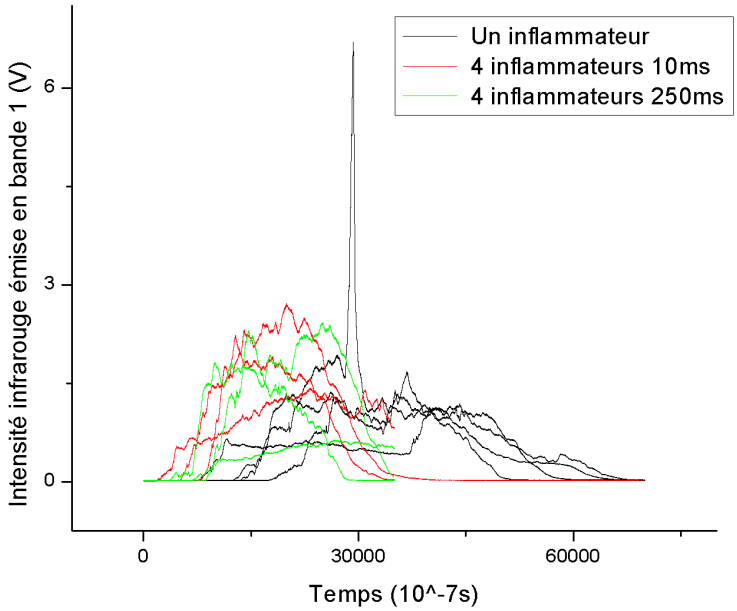


FIGURE 2.30 – Signal infrarouge en bande 1 - Solution structurée

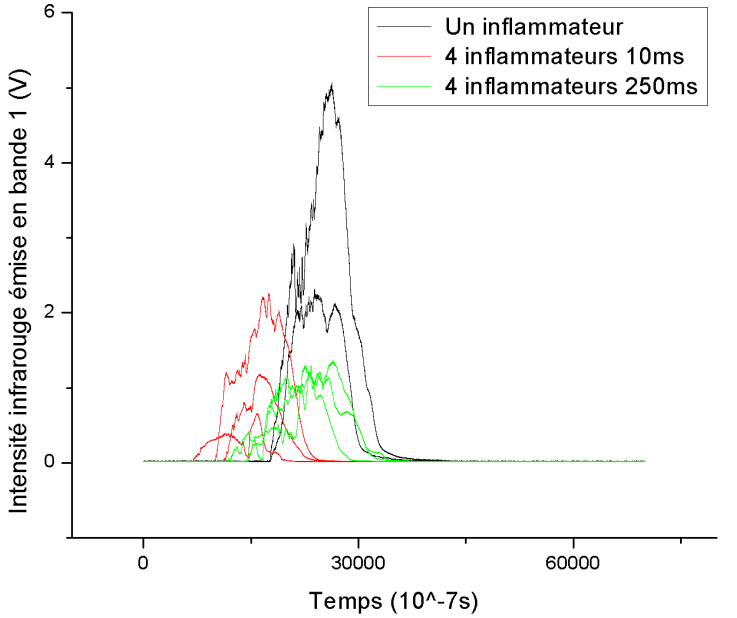


FIGURE 2.31 – Signal infrarouge en bande 1 - Solution compartimentée

Les résultats en bande 2 sont sensiblement les mêmes, à ceci près que le signal est plus bruité, et donc plus difficile à interpréter.

Discussion

Commentons tout d'abord la figure 2.30. Nous pouvons y voir que les profils mesurés correspondent, à un coefficient de proportionnalité près au profils simulés dans NINA. Passer de 1 à 4 micro-inflammateurs initiés divise par deux la durée de combustion, et multiplie par deux le niveau maximal, comme attendu. En revanche, faire passer le délai d'initiation de 10 à 250ms ne semble pas changer significativement le front de montée du signal. Le problème vient d'une dispersion trop importante sur les délai d'initiation des rainures. Pour les réduire, il faudrait aujourd'hui améliorer la précision géométrique du pain (par fabrication additive, compression des compositions d'initiation, ...), la précision géométrique dans l'assemblage (en simplifiant le montage ...) et la fiabilité du report des micro-inflammateurs (micro-inflammateurs avec contacts épais en face arrière ...).

Pour ce qui est des essais structurés, ils sont plus difficiles à exploiter, compte tenu des problèmes rencontrés lors des tirs. Tenons-en nous à remarquer que nous avons des différences de niveau, probablement dû au nombre de compartiments initiés, et qu'il semble être ici possible d'observer un effet de l'allumage séquentiel. Puisqu'ici le pain a été retaillé et est tenu en force contre les puces par un séparateur plastique, il est raisonnable de se conforter dans l'idée qu'un manque de fiabilité dans l'assemblage entraîne une perte de contrôle par allumage séquentiel.

Dans les deux cas, il nous a été possible d'observer pour la première fois un problème que nous avons consciemment occulté jusqu'ici, les effets directionnels. Le signal infrarouge provient du front de combustion et du nuage de gaz qui suit la munition. Or :

- toute la surface de la munition n'est pas en combustion
- le séparateur de compartimentation canalise les gaz de combustion d'un compartiment dans un secteur de 90°, comme observé figure 2.32
- l'inertage polymère se lève par blocs qui sont projetés dans une direction donnée, ce qui peut donner lieu a des effets 'boule de feu', qui induisent des pics d'intensité infrarouge, comme observé sur la figure 2.30

Le signal infrarouge dépend donc de l'angle selon lequel la munition est observée. Il est difficile de prévoir aujourd'hui quelle sera l'influence sur la capacité de ces leurres à être efficaces. Il semblerait approprié de donner suite à ces travaux en commençant par observer si ces effets ne sont pas lissés lors de tirs dynamiques, en comparant la variabilité du signal des leurres CASSIS à celle de leurres existants.

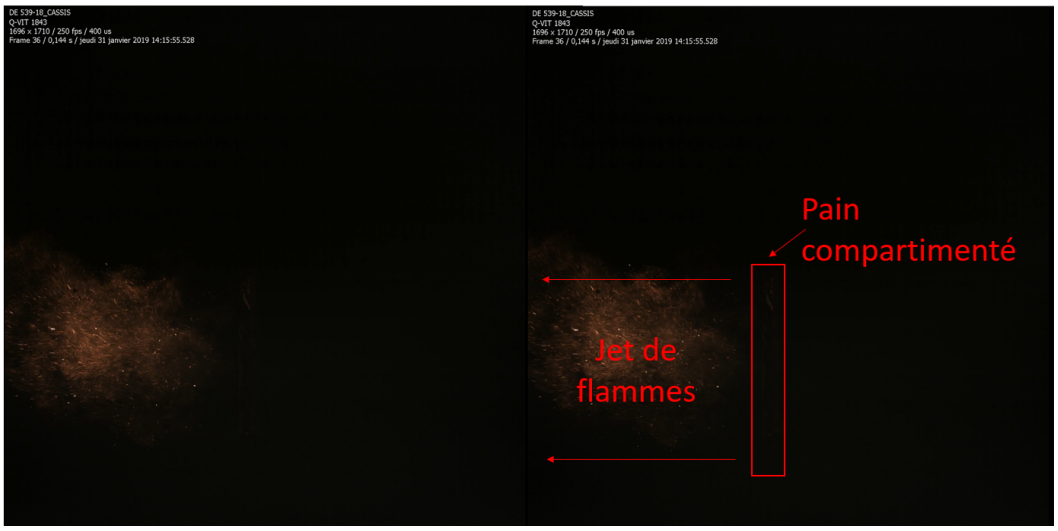


FIGURE 2.32 – Vidéo infrarouge - Solution compartimentée, un seul compartiment allumé

2.5 Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons détaillé la conception et la validation du sous-ensemble fonction terminale. Nous avons complété notre état de l'art avant de détailler plus avant les exigences ayant trait à la génération contrôlée de signal infrarouge. Nous avons proposé d'utiliser des micro-inflammateurs, pour permettre de contrôler l'initiation d'un pain infrarouge après éjection. Nous avons ensuite proposé deux solutions fonctionnelles de contrôle, la structuration et la compartimentation.

Nous avons développé un code de simulation permettant de prédimensionner nos solutions. Nous avons montré que, dans le cas d'un pain structuré, le délai d'initiation permettait de contrôler d'un facteur 1 à 4 le front de montée du signal, et que le nombre d'inflammateurs initiés permettait de contrôler d'un facteur 1 à 4 le front de montée, et 1 à 2 le niveau max et la durée du signal.

Nous avons ensuite validé expérimentalement chacune des solutions. Nous avons commencé par vérifier que nous étions capables d'allumer des compositions IR à l'aide de micro-inflammateurs. Nous avons pu allumer du COLIBRI jusqu'à 3.5mm et de la MTV jusqu'à 1.5mm. La distance d'allumage réduit la reproductibilité, mais rester parfaitement compatible avec les écarts pouvant exister dans un assemblage mécanique.

Nous avons ensuite étudié l'initiation plus représentative d'un pain semi inerte, et la pertinence de deux solutions de structuration. En reportant les micro-inflammateurs par brasure avant de les encapsuler, nous avons vu que nous ne

pouvions compter sur la rupture ou la tenue de l'inertage d'un pain complet. Une bande de scotch se lève avant de se rompre, et un inertage à base de résine n'assure pas une protection thermique suffisante.

Nous avons en conséquence proposé deux autres solutions basées sur la fragilisation volontaire d'une partie de l'inertage, pour que s'y engouffrent les gaz chauds après le début de l'initiation, et assurer qu'ils ne se propagent pas d'une partie du pain à l'autre. Il nous reste à valider notre capacité à contrôler un signal infrarouge, dans les ordres de grandeur prédits par notre code de prédimensionnement, validant ainsi, dans son ensemble notre solution de fonction terminale contrôlable.

Nous avons validé notre capacité à contrôler un signal infrarouge, dans les ordres de grandeur prédits par notre code de prédimensionnement, validant ainsi, dans son ensemble notre solution de fonction terminale contrôlable.

Nous nous proposons, maintenant que nous pouvons générer un signal infrarouge adaptable, de nous intéresser à comment projeter notre fonction terminale à distance de la plate-forme à protéger. Le prochain chapitre portera donc sur le bloc éjection.

Chapitre 3

Conception et développement du bloc éjection

Sommaire

3.1 Introduction 70

3.2 Conception 70

3.2.1 État de l'art de l'éjection pyrotechnique pour leurres infrarouges 70

3.2.2 Recherche de solutions de contrôle d'un bloc d'éjection pyrotechnique à effet mortier 72

3.3 Prédimensionnement 79

3.3.1 Description du modèle 80

3.3.2 Détermination paramètres expérimentaux 83

3.3.3 Étude d'optimisation 84

3.3.4 Résultats 88

3.3.5 Discussion et conclusion 90

3.4 Validation expérimentale 92

3.4.1 Essai de tir de micro-inflammateurs en bombe manométrique 92

3.4.2 Essais de tir à l'air libres de filaments plastroniques 96

3.4.3 Essais de tirs d'impulseurs plastroniques triples en bombe manométrique 102

3.4.4 Essais de tir semi-dynamiques de cartouches intégrant un impulseur plastronique triple 106

3.5 Conclusion 110

Essentially, all models are wrong, but some are useful.

George Box & Norman Draper, Empirical Model Building and Response Surfaces, 1987

3.1 Introduction

Ce troisième chapitre s'intéresse à la conception du bloc d'éjection du leurre 1″1″8″ intelligent CASSIS. Il s'agit de lancer le leurre à distance de la plate-forme à protéger, pour que la menace s'en détourne. Comme pour le chapitre précédent, nous proposons de revenir plus en détail sur les solutions d'éjection existantes, avant de proposer des solutions de contrôle possible, qu'enfin nous validerons expérimentalement.

3.2 Conception

3.2.1 État de l'art de l'éjection pyrotechnique pour leurres infrarouges

La fonction d'éjection se résume à éloigner le leurre du véhicule à protéger, pour que la menace, en suivant le leurre, s'en écarte elle aussi. Compte tenu de la simplicité de la fonction, de très nombreuses solutions technologiques ont été envisagées par le passé : les premiers leurres étaient lâchés et tombaient par gravité, ou étaient tractés derrière le véhicule. Pour se protéger contre des menaces venant de face, ou de côté, il a été proposé en 1958 de projeter des leurres dans plusieurs directions [7]. Puisque plus fiables et plus efficaces, les leurres projetés sont devenus et sont restés la norme.

Il n'existe, à notre connaissance, que deux solutions d'éjection active a avoir été implémentées sur des systèmes de contre-mesures OTAN, l'éjection par effet mortier et l'autopropulsion. Les leurres autopropulsés, comme les roquettes, embarquent une composition pyrotechnique propulsive qui brûle tout au cours de leur mouvement, ce qui leur permet de suivre un avion sur sa trajectoire, ou d'être envoyés à grande distance d'un bateau. Les leurres éjectés par effet mortier utilisent la détente d'un gaz, généré lors de la combustion d'une composition gazogène ou libéré lors de la perforation d'une cartouche de gaz comprimé, pour prendre de la vitesse. Les systèmes d'éjection pneumatiques ont presque entièrement disparu au profit des systèmes pyrotechniques, moins volumineux et plus fiables.

Dans l'objectif de rendre les leurres plus efficaces contre de nouvelles menaces, nous proposons, dans la suite de ce chapitre de chercher à rendre les systèmes pyrotechniques d'éjection de leurres contrôlables. Étant donné que le contrôle de la trajectoire d'un autopropulsé implique d'utiliser des éléments mécaniques en mouvement [41], une tuyère orientable, des ailettes de contrôle, nous supposons qu'un système autopropulsé contrôlable est incompatible avec nos contraintes de miniaturisation. Nous nous proposons donc plus précisément de chercher à rendre les systèmes d'éjection de leurres par effet mortier contrôlables.

Par nature de l'effet mortier, la charge de poudre doit se trouver entre la munition

a éjecter et la base du logement de la munition. L'architecture de la munition se précise donc comme présenté sur la figure 3.1.

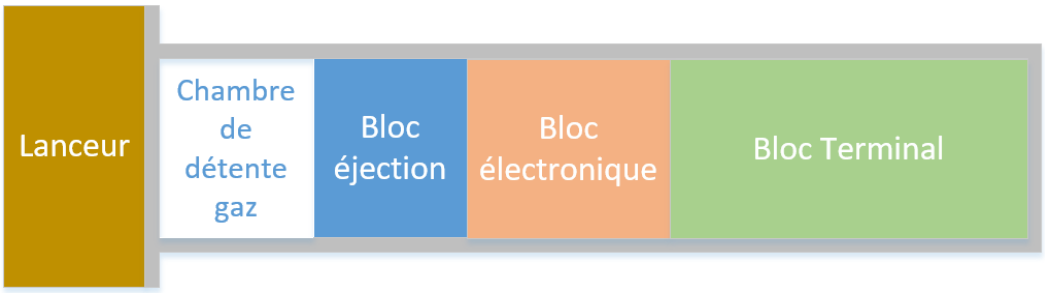


FIGURE 3.1 – Schéma de conception préliminaire d'une munition CASSIS

Le bloc d'éjection et la chambre de détente des gaz pouvant être inversés selon que le bloc d'éjection est embarqué ou reste fixé à la douille.

L'immense majorité des leurres existant OTAN sont éjectés par effet mortier à l'aide de squibs, une cartouche de cuivre et de verre, de l'ordre du centimètre, sur lequel un fil résistif de nichrome a été soudé (voir figure 3.2 et 3.3).

FIGURE 3.2 – Squib

Le passage d'un courant entre les deux parties métalliques du squib fait chauffer le filament par effet joule ce qui initie une perle de ZPP (Zirconium-Perchlorate de Potassium). La perle de ZPP génère des gaz chauds qui initient des grains millimétriques de BNP (Bore-Nitrate de Potassium), fortement gazogène et peu sensible.

La pression monte jusqu'à *pétalliser*, briser, un *paillet*, un disque d'aluminium prédécoupé. Une fois le paillet pétallisé, les gaz s'échappent entre la munition et sa douille. Une *jupe* polymère assure que les gaz ne remontent pas le long de la munition. Les squibs sont montés en force sur les douilles, un joint assurant l'étanchéité aux gaz chauds. Le filament assure que le squib respecte précisément la condition de sécurité 1A/1W/5min. Le couple ZPP/BNP limite les risques de déclenchement intempestif, en réduisant la charge pyrotechnique sensible à son strict minimum. Le paillet assure une initiation reproductible, en confinant temporairement les gaz, et assure le maintient des grains de poudre dans la cartouche. Le cycle de vie du squib est représenté figure 3.3.

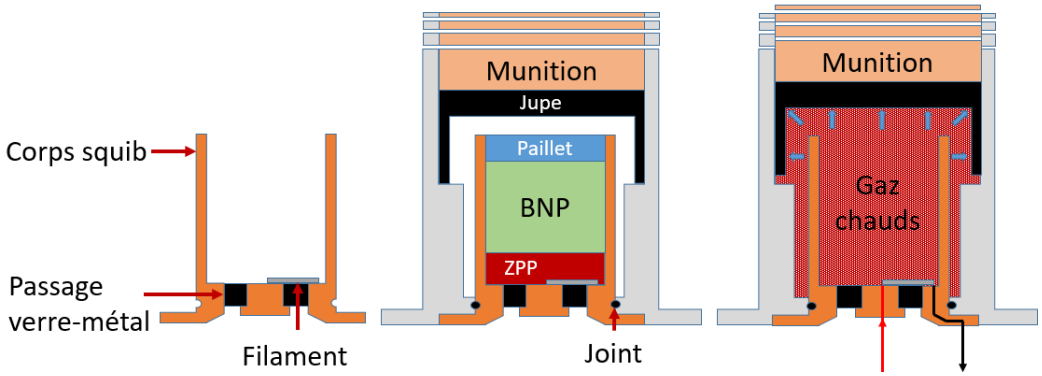


FIGURE 3.3 – Schémas de principe du squib nu (gauche), monté (milieu), et tiré (droite)

La pression ainsi générée met en mouvement la munition sans (trop) déformer la douille. C'est l'effet mortier. Une fois sortie de sa douille, la munition fait un vol balistique. Les cartouches 1″1″8″ sont parallélépipédiques, et donc loin d'être aérodynamiques. Leur trajectoire générale est déterminée par leur vitesse de sortie de douille.

La problématique est identique au chapitre précédent. Les solutions de contrôle de la pression ou de la température de combustion sont trop volumineuses pour être compatibles avec nos contraintes de miniaturisation. Et dès que les gaz chauds de combustion se répandent, tous les grains de BNP s'initient, rendant tout contrôle sur la combustion impossible.

3.2.2 Recherche de solutions de contrôle d'un bloc d'éjection pyrotechnique à effet mortier

Nous voulons contrôler l'éjection d'une munition intelligente au format 1"1"8" par effet mortier à l'aide d'un système d'initiation intégrant 3 initiateurs adressables. Nous devons développer un bloc technologique permettant de contrôler la

combustion de compositions d'éjection et un bloc d'initiation multipoint, et sommes donc confrontés aux mêmes verrous technologiques que dans la partie 2, le contrôle des gaz de combustion de compositions d'éjection, et l'intégration d'initiateurs dans une cartouche 1"1"8". Nous proposons, dans cette partie, de voir si les solutions envisagées dans la partie précédentes sont toujours viables. A noter que dans la suite nous nous référerons aux blocs d'éjection pyrotechnique à effet mortier sous le terme d'*impulseurs*, sanctionné par l'usage dans le monde de l'autoprotection.

Contrôle des gaz de combustion de compositions d'éjection

Identiquement au chapitre précédent, deux solutions de contrôle s'offrent à nous :

1. Compartimentation. Créer plusieurs chambres d'éjection étanches les unes par rapport aux autres.

2. Structuration. Créer un pain d'éjection dont la surface extérieure est inerte.

Commençons par nous intéresser à la solution de structuration. Imaginons dans un premier temps que nous voulions structurer les compositions d'éjection existantes. Il serait possible de séparer des charges de BNP par des compositions relai ou retard (voir figure 3.4). L'allumage simultané d'un certain nombre de charges de BNP piloterait l'éjection. Le reste s'initierait une fois que la munition serait sortie de sa douille et n'influerait pas sur la trajectoire de la munition. Malheureusement, les compositions retard sont très onéreuses, même pour des retards produits en très grande série, et difficilement mises en forme. Nous nous proposons donc de trouver une autre solution.

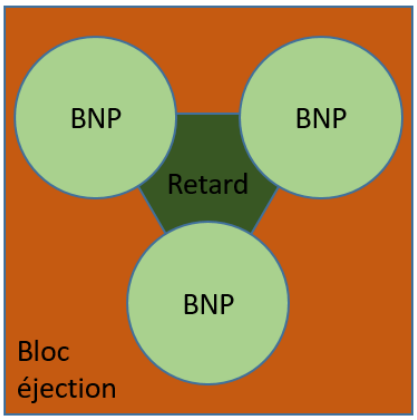


FIGURE 3.4 – Schéma de conception préliminaire d'un bloc d'éjection structuré BNP/Retard

Imaginons maintenant que nous voulions réutiliser les compositions du pain infrarouge. Elles sont fortement gazogènes, suffisamment pour nous permettre d'envisager un bloc d'éjection à base de COLIBRI et CERISE (voir figure 3.5), et peuvent

être mises en forme par coulée ou compression. Malheureusement, compte tenu de notre cahier des charges, notre bloc d'éjection doit être environ 25 fois moins volumineux que notre pain infrarouge. Nos problèmes d'étanchéité s'en trouveraient démultipliés.

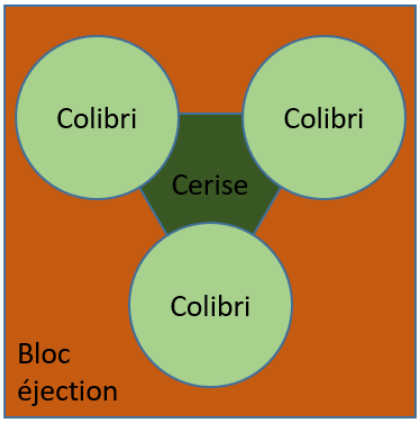


FIGURE 3.5 – Schéma de conception préliminaire d'un bloc d'éjection structuré COLIBRI/CERISE

Nous nous focaliserons sur une solution de compartimentation. Sachant que nous voulons concevoir des impulseurs intégrant 3 compartiments indépendants, nous parlerons dans la suite d'*impulseurs triples*.

Les squibs existants nous offrent une chambre de combustion monobloc. Il serait donc parfaitement possible d'imaginer intégrer trois squibs dans une cartouche 1"1"8" pour former trois compartiments d'éjection indépendants. Malheureusement, le paillet des squibs existants n'est pas fait pour être intégré dans une solution multipoint. Il pétallise qu'il soit soumis à une pression extérieure ou intérieure. L'allumage d'un squib génére des gaz d'éjection qui briserait les paillets des autres squibs et qui entraînerait leur allumage, sans possibilité de contrôle. En outre, trois squibs 6190, les plus petits squibs, prennent trop de place pour être intégrés côte à côte dans une section de cartouche 1"1"8". Il faudrait faire fabriquer des squibs sur mesure.

Nous proposons donc de trouver une solution innovante d'impulseur multipoint compartimenté pouvant permettre de remplacer les squibs, de les rendre plus adaptables et plus aptes à être interfacés avec une électronique de contrôle. Contrairement à la partie précédente, dans laquelle les gaz générés lors de la combustion d'une partie du pain étaient évacués après montée en régime et rupture d'une cloison sacrificielle, nous devons ici monter en pression pour propulser la munition. Le paillet - l'équivalent fonctionnel de la cloison sacrificielle dans un bloc d'éjection - doit tenir 5 bars (pression typique de pétallisation) ou moins si la pression vient

de l'intérieur de la chambre de combustion, et au moins 20 bars (pression typique dans la douille) si la pression vient de l'extérieur. Nous proposons d'utiliser un disque de métal posé sur un épaulement plastique, comme représenté sur la figure 3.6. Le disque en métal ne se déforme pas sous l'effet de la pression, mais déforme légèrement la pièce plastique et assure l'étanchéité en cas de pression trop élevée.

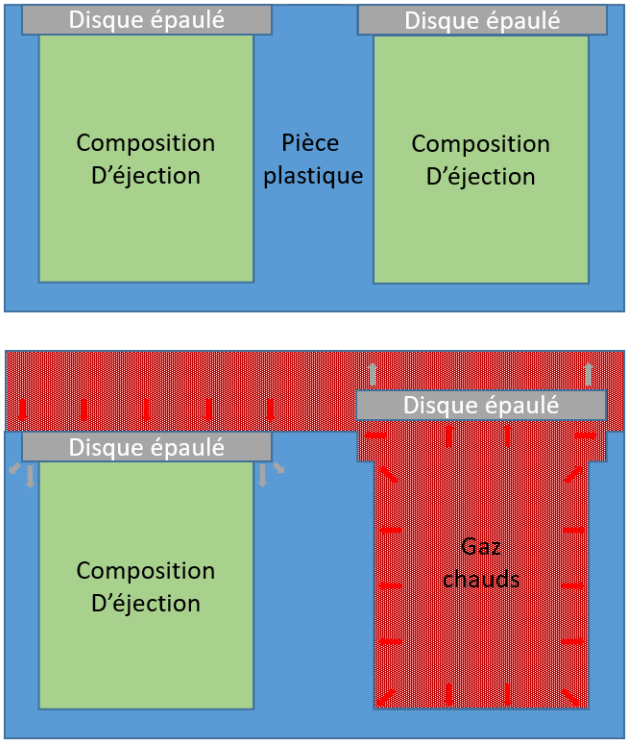


FIGURE 3.6 – Schéma de conception préliminaire d'un bloc d'éjection compartimenté

Pour s'assurer que les gaz chauds ne passent pas d'une chambre à l'autre, et pour maintenir le disque en position, nous collons par dessus un opercule plastique. Les paillets pétallisables existants peuvent présenter jusqu'à un facteur 3 sur leur pression de rupture. Lacroix-défense a observé en conséquence des dispersions sur les vitesses d'éjections. Nous proposons donc de choisir un opercule dont la pression de désoperculage sera la plus reproductible possible.

Un opercule collé induira un delai de séchage incompatible avec une chaine de montage industrielle, une tenue mécanique qui pourra varier au cours du vieillissement de la colle, et de possibles incompatibilités chimiques avec les compositions d'éjection.

Un opercule soudé par ultrason ne présenterait pas de problèmes chimiques, mais la reproductibilité de la tenue mécanique de la soudure, ainsi que son étanchéité aux

gaz chauds resteraient à démontrer. Valider la faisabilité d'un opercule soudé par ultrasons nécessiterait de refaire fabriquer une sonotrode dédiée à chaque évolution de la définition. Ce procédé reste donc envisageable mais nécessiterait une campagne de validation d'envergure.

Nous préférerons donc ici utiliser des opercules thermoscellés. Le thermoscellage est un procédé de collage par fusion qui utilise un plaque chaude pour mettre en pression et chauffer un opercule et une pièce plastique. Il s'agit d'un procédé adapté à la fabrication en chaîne, très reproductible et qui tient à l'épreuve du temps. La température de la plaque chaude est élevée (entre 200 et 250°C) mais très inférieure à la température des compositions d'auto-initiation des compositions d'éjection type BNP (supérieure à 500°C). A noter que ce choix néessiterait d'être réévalué si nous venions à utiliser de la COLIBRI - ou tout autre composition plus sensible que la BNP - comme composition d'éjection.

Initiateurs

Il nous faut maintenant initier la composition contenue dans nos chambres. Contrairement à la partie précédente, nous n'avons pas de contrainte d'énergie embarquée. Les initiateurs du bloc d'éjection sont initiés avant éjection, quand la munition est encore reliée au lanceur. Nous avons donc deux choix, embarquer des inflammateurs basse énergie, ou des inflammateurs haute énergie. Nous nous proposons d'évaluer les deux, un concept de bloc d'éjection intégrant des micro-inflammateurs basse énergie type LAAS-CNRS, et un concept d'éjection haute énergie.

Concernant les initiateurs haute énergie, compte tenu de notre contrainte de miniaturisation et de l'état de l'art chapitre 1 et 2, nous choisissons d'intégrer des initiateurs à fil chauds. Il existe alors plusieurs façons de fabriquer le filament résistif :

Une pièce résistive rapportée, comme le filament du squib, permet d'avoir des caractéristiques de filaments parfaitement maîtrisées, mais est complexe à souder, surtout lorsque le bloc d'éjection est miniaturisé.

Une puce avec un fil chaud en couche mince stratifiées sur PCB, comme les EPIC et MEPIC Vishay représentés en figure 3.7, permet d'intégrer un filament plus simplement, en brasant une puce, mais ne permet pas - a priori - de répondre aux critères de sécurité 1A/1W, et n'est donc pas adaptée à notre problématique. A noter que puisque ces initiateurs sont basés sur une technologie de métallisation de PCB (cf [42]), il serait possible d'imaginer un grand PCB avec les filaments déjà intégrés, sans besoin de brasure ou de soudure du fil chaud, ce qui rendrait cette solution très intéressante pour des applications fortement multipoint et sécurisées par ailleurs.

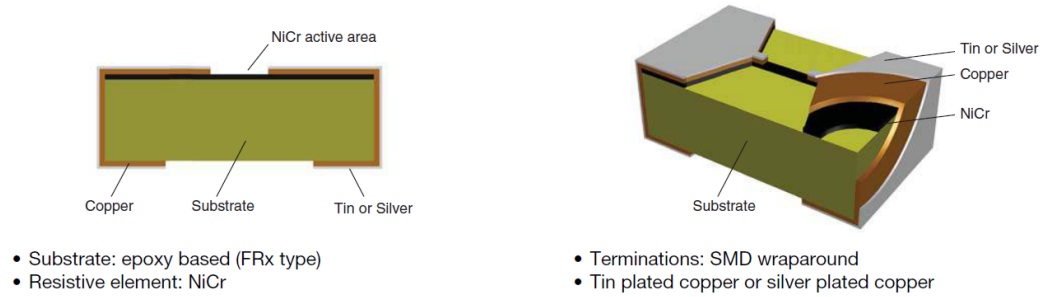


FIGURE 3.7 – Principe de construction d'inflammateurs à fil chaud sur puce - Vishay

Reste enfin la solution de la métallisation chimique d'un filament, un dépôt non-électrolytique de cuivre sur un substrat. Cette technique s'est fortement industrialisée dans les dernières années avec l'apparition d'une nouvelle branche de la plasturgie, la *plastronique*, qui se spécialise dans le dépôt de pistes conductrices sur des pièces injectées plastiques. Le principe général de la plastronique est de concevoir des pièces dont certaines surfaces contiennent un catalyseur (palladium ...). Lorsque plongées dans une solution d'oxyde de cuivre, ces surfaces se couvrent d'une couche de cuivre pur. Il existe plusieurs techniques pour sélectionner ces surfaces, comme par exemple la bi-injection, d'un plastique chargé d'un catalyseur et d'un plastique standard, ou l'utilisation d'un plastique contenant un complexe organométallique centré autour d'un catalyseur, qui sera révélé par l'action d'un laser. La plastronique permet de faire des filaments épais, jusqu'à $10\mu m$ d'épaisseur, sur une pièce 3D complexe, et permet d'intégrer sur une même pièce des fonctions électroniques, mécaniques et de packaging.

Nous nous proposons ici de réaliser nos filaments résistifs en utilisant la plastronique. Non seulement il n'y aura aucune étape de montage associée à l'intégration des filaments, mais nous pouvons nous permettre par ce biais beaucoup plus de libertés sur l'interface électrique de nos initiateurs.

Le travail autour de la plastronique sera conduit en partenariat avec S2P (Smart Plastic Products), une PME basée à Oyonnax, qui propose aux industriels un ensemble de services dédiés à la plastronique. En particulier, nous avons choisi de travailler avec la technologie de laser direct structuring (LDS), aussi adaptée au prototypage rapide qu'à la grande série.

Le procédé de structuration LDS commence par l'injection - suivi parfois de l'usinage - d'une pièce plastique contenant un additif organométallique. Le passage d'un faisceau laser sur certaines surfaces de la pièce vient l'*activer*, briser les molécules organométaliques et révéler des atomes d'un catalyseur métallique, en général du palladium. La pièce est alors plongée dans un bain d'oxyde de cuivre qui vient se réduire sans besoin de courant électrique autour du catalyseur. La rugosité de

surface de la pièce, ajouté à la rugosité additionnelle créée lors du passage du laser assure l'adhésion d'une couche de cuivre reproductible. Un flash or/nickel finit le procédé et garantit la résistance de la pièce aux sollicitations environnementales.

Proposition de solutions d'impulseurs contrôlables

Sur les squibs existants, la BNP est structurée en grains. Elle est libre de se déplacer dans la chambre de combustion. Une perle de ZPP, fortement gazogène, est coulée sur le filament. La ZPP adhère sur le filament, ce qui garantit le transfert thermique par conduction et donc la reproductibilité de l'allumage. Les gaz générés par la ZPP se répandent dans la chambre et allument tous les grains simultanément.

Nous avons vu que les micro-inflammateurs LAAS-CNRS génèrent une petite flamme, et donc un peu de gaz. Il est donc raisonnable de penser qu'ils peuvent allumer de la BNP de manière reproductible sans ZPP. En revanche, les filaments plastroniques ne font que chauffer, et nécessitent d'être en contact intime avec un matériau énergétique pour l'allumer.

Nous proposons donc dans cette partie d'évaluer deux concepts d'impulseurs contrôlables, un impulseur plastronique embarquant de la ZPP et de la BNP d'une part, et un impulseur intégrant des micro-inflammateurs et n'embarquant que de la BNP d'autre part, tous deux représentés en figure 3.8. Tous deux intégreront plusieurs chambres de combustion, fermées chacune par un disque métallique épaulé et un opercule thermoscellé.

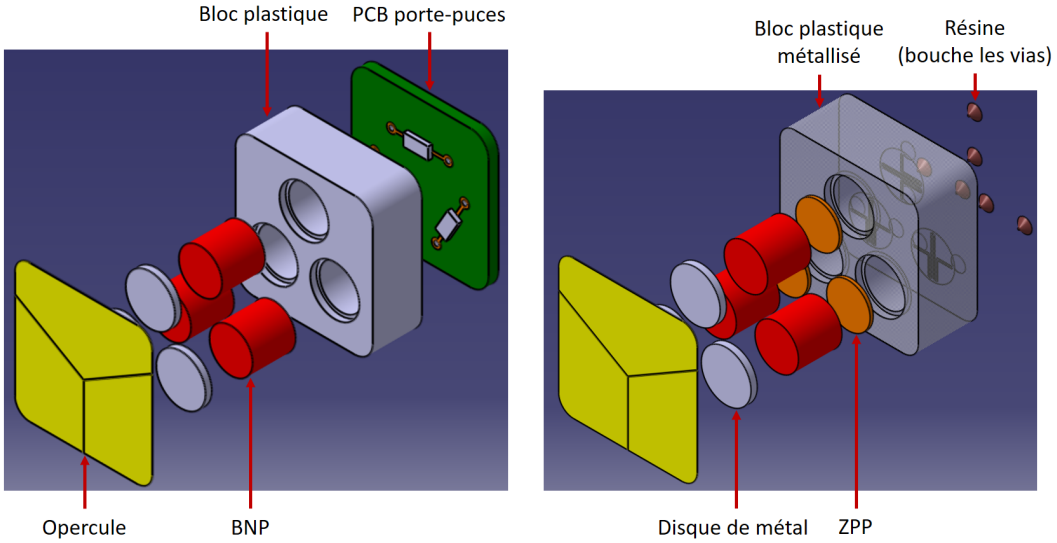


FIGURE 3.8 – Schémas des concepts d'impulseurs contrôlables

Nous proposons de tailler nos blocs d'éjection dans un bloc de plastique, convenant à la fois à l'adhérence de pistes plastroniques et d'un opercule thermoscellé.

Nous choisissons dans toute la suite de cette étude de nous restreindre au polycarbonate, pour sa très bonne adéquation avec les deux technologies, pour son coût très faible, et son usage courant dans les leurres existants, qui garantit sa tenue mécanique tout au cours de la vie de la munition. Seul bémol, le polycarbonate a un assez fort taux de dilatation thermique, ce qui pourrait conduire les pistes à se briser suite à un trop grand nombre de cyclages thermiques.

3.3 Prédimensionnement

Nous avons proposé deux concepts d'architectures d'impulseur d'éjection multipoint, sans considération de dimensions. Si nous voulons préciser la dimension de nos impulseurs pour faire fabriquer des véhicules de tests représentatifs de nos impulseurs plastroniques, il faut déterminer des dimensions chiffrées. Jusqu'ici, compte tenu de la très grande dispersion entre deux lots de poudre d'éjection, le dimensionnement des impulseurs était fait par un homme de l'art, sur base de son expérience, puis corrigé lors de campagnes d'essais. Nous proposons ici une approche différente : un modèle simple de balistique intérieure est implémenté afin de conduire une étude d'influence. Nous voulons étudier la capacité des différents paramètres de définition de nos impulseurs sur la vitesse d'éjection, et ainsi déterminer sur quel paramètres jouer pour diminuer la taille globale du bloc d'éjection.

Avant de continuer, prenons le temps de poser quelques définitions.

Les études d'influence paramétrique sont dites *d'optimisation* en ce qu'elles découlent de la théorie mathématique de l'optimisation, elles consistent à maximiser ou minimiser une fonction. Il ne s'agit pas ici d'essayer de trouver un optimum de fonctionnement, qui sera à réserver à des études de dimensionnement fines, mais de prédimensionner notre impulseur en s'abstrayant de l'incertitude sur les données d'entrée.

Nous appellerons *fonction objectif* la grandeur à minimiser ou maximiser par une étude d'optimisation.

Nous appellerons *paramètres* les grandeurs pouvant influer sur la valeur de la fonction objectif.

Nous appellerons *facteurs* les paramètres que nous ferons varier au cours d'une étude d'optimisation.

Nous appellerons *domaine d'expérience* l'espace des variations autorisées aux facteurs.

Nous appellerons *modèle* le système d'équations qui, en fonction des paramètres et des facteurs, permet de calculer la valeur de la fonction objectif.

Nous appellerons *superviseur d'optimisation* le code qui générera les facteurs en connaissant le domaine d'expérience et le type d'étude à conduire, les fournira au modèle et récupérera puis exploitera la fonction objectif.

Graphiquement, une code d'optimisation se présente donc comme suit, figure 3.9 :

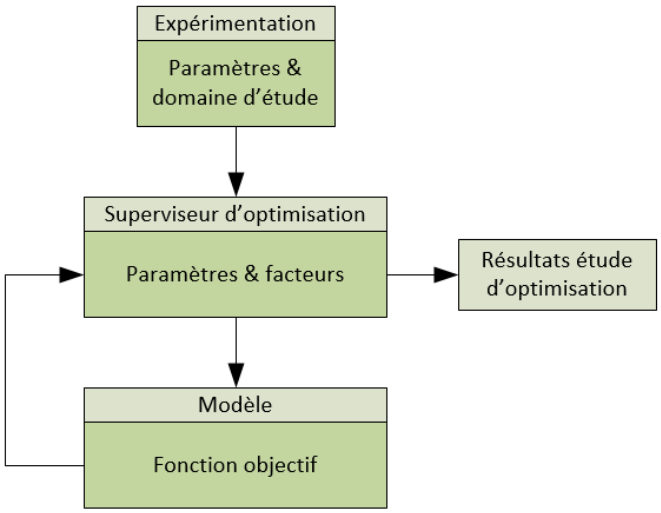


FIGURE 3.9 – Architecture du code d'optimisation

Dans la suite de la partie 3.3 nous allons, dans l'ordre, décrire le modèle utilisé, chercher à obtenir les paramètres le domaine d'étude, décrire l'étude d'optimisation choisie, en donner les résultats et enfin les discuter.

3.3.1 Description du modèle

Nous avons choisi d'implémenter un modèle global (Lumped Parameters Model) de balistique, dont les paramètres ne dépendent pas explicitement de leur position dans le canon, et qui ne permet pas de modéliser les phénomènes locaux, notamment les effets d'ondes de pression ou d'emballement local de la combustion. Ce modèle est simple à implémenter, rapide et est donc adapté à une étude d'optimisation. Nous nous basons sur le modèle décrit dans le STANAG 4367, connu et reconnu dans le monde de la balistique intérieure. Il modélise un mortier par de la poudre libre dans une chambre de combustion, et pouvant directement pousser un projectile non retenu. Il s'appuie sur les hypothèses suivantes :

1. Tous les grains de poudre sont allumés simultanément.
2. Tous les grains sont identiques, les épaisseurs à brûler partout égales et les surfaces en combustion régressent symétriquement.
3. La combustion de la poudre est stationnaire et peut être décrite par l'équation de Vieille.
4. L'intégralité de la poudre est transformée en gaz après combustion.
5. L'écoulement des gaz de combustion est monodimensionnel, monophasique, compressible, non-pesant et non-visqueux.
6. Les gaz de combustion peuvent être caractérisés par l'équation d'état de Noble-Abel, ils sont supposés calorifiquement parfaits.
7. Les effets de la gravité sont négligés, les effets diphasiques, les pertes par conduction, convection, déformation du canon, recul du canon, rotation du projectile et résistance de l'air.
8. Les gaz et la poudre se comportent comme un fluide de masse volumique constante le long du tube.

Nous modifions légèrement ce modèle :

Premièrement, pour prendre en compte le confinement généré par l'opercule, nous supposons qu'initialement la poudre est dans une *chambre de combustion*. Elle peut y brûler et y monter en pression, mais ne peut pas mettre en mouvement le projectile. Lorsque la pression atteint la *pression de désoperculage*, de rupture de l'opercule, les gaz se répartissent entre la chambre de combustion et la *chambre de détente*. Nous faisons l'hypothèse supplémentaire que la pression et la température s'équilibrent instantanément entre les deux chambres au moment de la rupture. Les gaz sont alors libre de pousser le projectile, alors que la poudre brûle à la nouvelle pression qui règne dans les deux chambres.

Deuxièmement, pour prendre en compte la présence d'un bouchon qui ferme les douilles Lacroix-défense, nous supposons que le projectile ne peut pas se mettre en mouvement à moins que la pression qui règne dans la chambre de détente ne soit supérieure à une pression de forcement, à partir de laquelle le bouchon se brise et permet le déplacement de la munition.

Pour arriver au système d'équations suivant :

$$V = \begin{cases} V_1 - (1-Z).\frac{C}{\rho_p} & \text{avant rupture de l'opercule} \\ V_1 - (1-Z).\frac{C}{\rho_p} + V_2 + \pi.x_p.S & \text{après rupture de l'opercule} \end{cases} \tag{3.1}$$

Avec : V le volume disponible aux gaz
V_1 le volume des chambres de combustion
Z la fraction massique brûlée
C la charge de poudre initiale
ρ_p la masse volumique de la poudre
V_2 le volume initial de la chambre de détente
x_p la distance parcourue par le projectile
S la section du tube du projectile.

$$T = \frac{E}{m.c_v} - \frac{1}{6}.\frac{v_P^2}{c_v} \tag{3.2}$$

Avec : T la température des gaz
E l'énergie interne des gaz
m la masse de gaz
c_v la capacité thermique massique des gaz
v_P la vitesse du projectile

$$P = \frac{r.T}{\frac{V}{m} - b} \tag{3.3}$$

Avec : P la pression des gaz
r la constante spécifique des gaz
b le covolume des gaz

$$\frac{de}{dt} = B.(P + P_atm)^n \tag{3.4}$$

Avec : e l'épaisseur brûlée
P_atm la pression atmosphérique
A,B et n les coefficients de la loi de Vieille de la poudre

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = \frac{\partial \phi}{\partial t}.\frac{\partial e}{\partial t} \tag{3.5}$$

Avec : ϕ la fonction de forme de la poudre

$$\frac{\partial m}{\partial t} = C.\frac{\partial Z}{\partial t} \tag{3.6}$$

$$P_c = \frac{3.m_p.P}{3.m_p + 3.C} \tag{3.7}$$

Avec : m_p la masse de la munition
P_c la pression au culot de la munition

$$\frac{\partial v_p}{\partial t} = \begin{cases} 0 & \text{avant rupture du bouchon} \\ \frac{S.P_c}{m_p} & \text{après rupture du bouchon} \end{cases} \tag{3.8}$$

Avec : P_c la pression au culot de la munition
P_f la pression de forcement, à laquelle se brise le bouchon de la douille

$$\frac{\partial E}{\partial t} = c_v.T_e.C.\frac{\partial Z}{\partial t} - m_p.v_p.\frac{\partial v_p}{\partial t} \tag{3.9}$$

Avec : T_e la température d'explosion de la poudre

Le système est alors décrit par les six variables d'intégration x_p, v_p, m, Z, e, E et leurs dérivées, par les trois inconnues P,P_c et T et par les 14 paramètres suivants $\underbrace{m_p, C, \phi, S, V_1, V_2, P_{atm}}_{\text{paramètres de définition}}, \underbrace{b, r, c_v, B, n, T_e, \rho_p}_{\text{paramètres des poudres}}$.

Ce système d'équation est implémenté sous Matlab, et intégré temporellement à l'aide d'un schéma d'Euler sur les 10.000 premiers pas - pour éviter que la simulation ne diverge -, puis à l'aide d'un schéma de Runge-Kutta d'ordre quatre par la suite. Nous appellerons notre modèle de balistique intérieure, système d'équation et boucle d'intégration, URUK dans la suite.

3.3.2 Détermination paramètres expérimentaux

Avant de simuler le bloc d'éjection de CASSIS, les paramètres d'entrée d'URUK doivent être déterminés. Certains paramètres sont fixés par le cahier des charges, ou peuvent être obtenus précisément par l'expérience. La section du tube de lancement et sa longueur sont tous deux imposés par les dimensions de la douille 1"1"8" OTAN. La masse volumique de la poudre, ρ_p, peut être obtenue en mesurant le poids et le volume réel de la poudre. La fonction de forme ϕ de la poudre, pour des poudres vrac, peut être obtenue par tamisage. ϕ et ρ_p ont été obtenus expérimentalement par Adrien Lamothe dans le cadre de son stage de deuxième année d'école d'ingénieur réalisé à Lacroix-défense. La température d'explosion T_e de la poudre, la capacité thermique c_v et l'indice adiabatique des gaz de combustion peuvent être déterminées à l'aide du code de calcul thermochimique Lacroix-défense COPPELIA.

Restent $r, b, B, n, V_1, V_2, C, m_p$, la pression de désoperculage P_d et la pression de forcement P_f. V_1, V_2, C, m_p, P_d et P_f sont des paramètres de définition que nous pouvons faire varier à l'envie. r, b, B et n sont des paramètres de la poudre, que

nous ne pouvons pas faire varier - nous supposons que nous travaillons sur des poudres existantes données - mais sur lesquels existe une forte incertitude. Nous nous proposons donc de conduire une étude d'influence sur ces 10 paramètres, pour trouver des règles de conception d'une part, et pour s'affranchir de l'incertitude expérimentale d'autre part.

Nous choisissons d'imposer le domaine d'étude des paramètres de conception en fonction de ce que nous considérons réaliste, et compatible avec nos contraintes dimensionnelles. Pour les paramètres de la poudre, nous proposons d'utiliser RAMA, un code d'exploitation en bombe manométrique, développé à Lacroix-défense au cours de mon stage de fin d'études (équivalent Master 2), pour déterminer les caractéristiques d'un lot de poudre donné. RAMA est basé sur la norme NF T-70-714, et permet d'extraire r, b, B et n d'un ensemble de tirs en bombe manométrique. Nous choisissons de centrer notre domaine d'étude sur les résultats extraits de RAMA. Le domaine d'étude que nous avons choisi est donné dans le tableau 3.1.

Table 3.1 – Domaine d'étude

Facteur	Minimum	Maximum
V_1	$1cm^3$	$10cm^3$
V_2	$1cm^3$	$10cm^3$
P_d	$1Bar$	$20Bar$
P_f	$1Bar$	$20Bar$
C	$0.1g$	$0.5g$
m_p	$0.1kg$	$0.2kg$
b	$6.667.10^{-4}m^3.kg^{-1}$	$1.333.10^{-3}m^3.kg^{-1}$
r	$81J.kg^{-1}.K^{-1}$	$161J.kg^{-1}.K^{-1}$
B	$2.509.10^{-4}m.s^{-1}.Pa^{-n}$	$5.019.10^{-4}m.s^{-1}.Pa^{-n}$
n	0.2219	0.4439

3.3.3 Étude d'optimisation

Pour conduire l'étude d'influence, nous proposons d'utiliser la méthode des surfaces de réponse, la Response Surface Methodology ou RSM. La RSM est un ensemble de techniques statistiques permettant de construire et d'exploiter des modèles. Elle permet d'étudier l'influence de facteurs sur une réponse. Elle a notamment été développée pour étendre la portée des études d'influence graphiques, dont l'exploitation devient difficile avec un grand nombre de facteurs. La RSM consiste à *fitter*, au sens des moindres carrés, une fonction image de la fonction objectif. Nous choisissons ici de fitter un polynôme de degré 2, qui suffit la plupart du temps à représenter avec précision la vraie fonction [43]. Dis autrement, notre RSM aura pour but de tirer un modèle polynomial de notre modèle aux dérivées partielles décrit dans la partie 3.3.1. En notant $\{x_i\}$ l'ensemble de nos facteurs (paramètres de définition et paramètres de la poudre), conduire une RSM revient à chercher l'ensemble des coefficients $\{a_j\}$ qui fittent l'expression suivante :

$$\begin{aligned} y = a_0 \quad &+ \quad a_1.x_1 + a_2.x_2 + \ldots + a_k.x_k \\ &+ \quad a_{k+1}.x_1^2 + a_{k+2}.x_2^2 + \ldots + a_{2.k}.x_k^2 \\ &+ \quad a_{2.k+1}.x_1.x_2 + a_{2.k+2}.x_1.x_3 + \ldots + a_{(3.k+k^2)/2}.x_{k-1}.x_k) \end{aligned} \tag{3.10}$$

Avec k le nombre de facteurs.

Les (a_j) donnent une image de comment et à quel point un facteur peut influencer la fonction objectif y. A noter que dans la suite nous supposerons que les (x_i) sont normalisés, de manière à ce que le domaine d'étude devienne un hypercube de côté 2 et centré sur 0. Faire ce choix implique que les (a_j) dépendent du domaine d'étude, que l'influence des paramètres est rapportée à leur possibilité à varier.

Pour fitter l'expression 3.10, il nous faut des valeurs de v_p en fonction de ses paramètres extraites du modèle, qui assurent d'estimer les (x_i) séparément. En résumé, il faut un plan d'expérience adapté. Il en existe un très grand nombre, a commencer par le très connu plan d'expérience factoriel complet 3^k, qui consiste à évaluer toutes les permutations possibles de niveaux de facteurs, avec trois niveaux possible pour chaque facteur, $x_i \in \{-1; 0; 1\}$. En pratique, pour 10 facteurs, un plan 3^k nécessiterait 59039 résolutions du modèle, ce qui est inenvisageable, même si notre implémentation du modèle ne s'exécute qu'en quelques secondes. Nous nous proposons donc d'utiliser un plan de Doehlert. Les plans de Doehlert génèrent un peu plus d'erreur de fit qu'un plan factoriel complet, mais ne nécessitent que $1 + k + k^2$ résolutions du modèle, soit 111 résolutions pour 10 facteurs !

Les plans de Doehlert, aussi appelés réseaux de Doehlert correspondent à un maillage hexaédrique de l'espace, et peuvent donc être construits à partir d'un simplexe. Les coordonnées de tous les points du plan sont alors obtenus en soustrayant les coordonnées des points du simplexe, deux à deux, par toutes les combinaisons possibles. En 2D, cela veut dire qu'un plan de Doehlert peut être construit à partir d'un triangle que l'on fait tourner autour de l'un de ses points, et pour une dimension arbitraire cela implique que les réseaux de Doehlert peuvent être générés algorithmiquement. Le code que nous avons utilisé pour générer nos plans de Doehlert est donné en annexe C.

Notons maintenant $\{Y_l, l \in \mathbb{N}\}$ les résultats du modèle sur ces expériences. Les coefficients (a_j) sont obtenus par le calcul matriciel suivant :

$$[\{a_j\}] = (Mxy'.Mxy)^{-1}.Mxy'.[\{Y_l\}] \tag{3.11}$$

Nous pouvons dès lors commencer, en fonction du signe et de l'amplitude des (a_j), à tirer des conclusions sur l'influence des différents facteurs. Malheureusement, s'il est facile de se représenter les effets linéaires de nos facteurs, matérialisés par nos 10 premiers coefficients (sans compter a_0, la moyenne), il est beaucoup plus difficile de se représenter les effets quadratiques et les effets d'interaction, matérialisés par les 100 suivants. Pour se représenter l'influence de chacun de nos facteurs, nous proposons d'exploiter la modélisation polynomiale en conduisant une analyse canonique récursive. Une analyse canonique récursive permet de trouver x_{op}, l'optimum du polynome 3.10.

Si x_{op} est contenu dans le domaine d'étude, il existe un optimum local et l'influence des facteurs varie au travers du domaine d'étude.

Si x_{op} se trouve sur une face de notre domaine, y semble varier de façon monotone pour une certain nombre de ses facteurs au travers du domaine d'étude.

Si x_{op} s'identifie à l'un des sommets de notre domaine d'étude, y semble varier de façon monotone pour tous ses facteurs.

Sous forme matricielle, 3.10 se réécrit :

$$y = b_0 + x.b + {}^t x.B.x \tag{3.12}$$

Avec : ^{t}, l'opérateur de transposition
$x = [\{x_i\}]$, le vecteur des facteurs
$b_0 = a_0$, la moyenne arithmétique des (Y_l)
$b = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ ... \\ a_k \end{bmatrix}$, le vecteur des coefficients linéaires
$B = \begin{bmatrix} a_{k+1} & \frac{1}{2}.a_{2.k+1} & \frac{1}{2}.a_{2.k+2} & ... & \frac{1}{2}.a_{3.k} \\ \frac{1}{2}.a_{2.k+1} & a_{k+2} & ... & ... & \frac{1}{2}.a_{4.k-1} \\ \frac{1}{2}.a_{2.k+2} & ... & ... & ... & ... \\ ... & ... & ... & ... & \frac{1}{2}.a_{\frac{k^2+3.k}{2}} \\ \frac{1}{2}.a_{3.k} & \frac{1}{2}.a_{4.k-1} & ... & \frac{1}{2}.a_{\frac{k^2+3.k}{2}} & a_{2.k} \end{bmatrix}$
la matrice des coefficients quadratiques

A l'optimum, nous avons :

$$\left.\frac{\partial y}{\partial x}\right|_{op} = 0 \tag{3.13}$$

D'où le vecteur des facteurs à l'optimum :

$$x_{op} = -\frac{1}{2}.B^{-1}.b \tag{3.14}$$

Et la fonction objectif à l'optimum :

$$y_{op} = b_0 - \frac{1}{4}.{}^t b.B^{-1}.b \tag{3.15}$$

Si x_{op} est contenu dans le domaine d'étude, notre système modèle admet un point de fonctionnement optimal. Si x_{op} n'est pas contenu dans le domaine d'étude, le fait que notre modèle soit polynomial assure qu'il existe un optimum sur l'une de ses frontières, de ses faces. Problème, les faces d'un hypercube sont des hypercubes de dimension inférieure. S'il n'y a pas d'optimum dans l'hypercube de dimension inférieure, il faut chercher sur l'ensemble de ses frontières, elles-mêmes des hypercubes et ainsi de suite jusqu'à trouver un optimum ou être arrivés aux sommets de notre domaine d'étude. Le maximum, ou le minimum général est le maximum, ou le minimum de l'ensemble des optimums ainsi obtenus. Cet optimum peut être obtenu par analyse récursive des dimensions et sous-dimensions de notre domaine d'étude, par ce que l'on appelle une analyse canonique récursive. L'algorithme d'analyse canonique récursive pour chercher un maximum est présenté ci-dessous :

```
/* Cet algorithme étudie un sous-ensemble de dimension δ        */
x_op ← −½.B_δ^{-1}.b_δ
if x_op est dans le domaine d'étude et est un maximum then
    y_op ← b_{0,δ} − ¼.b'_δ.B_δ^{-1}.b_δ
    l'algorithme renvoie x_op puis se termine
else
    for chacun des 2.δ sous-ensembles do
        if δ > 1 then
            Réduire b_{0,δ}, b_δ et B_δ
            Appel récursif de l'algorithme
        else
            y_op ← b_{0,δ} − ¼.b'_δ.B_δ^{-1}.b_δ
            L'algorithme renvoie le x_op correspondant au maximum des deux
             valeurs possibles puis se termine
        end
    end
end
```

Se placer sur la face d'un cube centré de côté 2 dans un espace $\{x_1, x_2, x_3\}$ revient à fixer x_1, x_2 ou x_3 à -1 ou 1. Idem, se placer sur une face de notre hypercube

revient à fixer l'un ou l'autre des x_i à -1 ou 1. Passer notre étude d'un hypercube de dimension δ à un hypercube de dimension $\delta - 1$ revient donc à corriger b_0, b et B comme suit :

$b'_0 \leftarrow b_0 + \alpha * b(i) + B(i,i)$
$b' \leftarrow b + 2.\alpha.B(:,i)$
$b(i) \leftarrow []$
$B(i,:) \leftarrow []$
$B(:,i) \leftarrow []$

Nous avons développé et implémenté SEER, un script de RSM de degré 2 et d'analyse canonique sous Matlab. SEER présente un problème inhérent aux études canonique récursives, il nécessite d'explorer un très grand nombre de possibilités : $1 + 2^(k-1).(k!)$, soit 1.857.945.601 études canoniques pour 10 facteurs ! Nous nous proposons donc de procéder en quatre étapes :

1. Conduire une première étude de RSM à 10 facteurs
2. En déduire des facteurs négligeables et réduire le nombre de facteurs étudiés
3. Conduire une seconde étude de RSM à moins de 10 facteurs
4. Conduire une étude canonique sur les résultats de la seconde étude de RSM

Une fois l'influence de nos facteurs modélisée puis confirmée, nous pouvons définir des règles générales de conception d'un bloc d'éjection miniature. Nous nous en serviront pour prédimensionner un démonstrateur et valider expérimentalement notre concept.

3.3.4 Résultats

Les modèles et codes ont été implémentés sous Matlab et ont été exécutés sur le même ordinateur que précédemment.

Validation expérimentale

Les codes URUK et RAMA ont été validés et corrigés successivement lors de mon stage de fin d'études, le stage de fin d'études de Quentin Raimbaud et le stage de 2ème année d'école d'ingénieur de Clémence Roulet. Partant de poudres dont les caractéristiques avaient été obtenues par ailleurs, nous avons validé que RAMA donnait les bons paramètres de poudres. Nous avons ensuite validé que, partant de ces paramètres, URUK donnait bien les courbes de pression mesurées en bombe manométrique. Nous avons enfin validé qualitativement URUK et SEER dans le cadre du développement du bloc d'éjection d'un leurre pour applications mer et de la préétude d'un artifice d'entraînement des forces.

Prédimensionneemnt CASSIS

Les résultats sont synthétisés dans le tableau 3.2. A noter que l'ensemble des coefficients pour les deux études de RSM sont disponibles dans l'annexe B.

TABLE 3.2 – Coefficients linéaires issus d'une RSM à 10 facteurs

indice	facteur	$\{a_j\}(m.s^{-1})$
a_1	V_1	-1.0039
a_2	V_2	-1.1128
a_3	P_f	0.03184
a_4	P_d	0.92671
a_5	C	12.9448
a_6	m_p	-5.9157
a_7	b	-0.0147
a_8	c_v	5.2643
a_9	B	2.9742
a_10	n	11.9962

Nous voyons donc que b et P_f ont une influence négligeable sur la vitesse d'éjection et nous proposons de refaire une RSM sur les huit facteurs restants. Nous en déduisons les $\{a_j\}$ et l'optimum présentés dans le tableau 3.3.

TABLE 3.3 – Résultats issus d'une RSM à huit facteurs puis d'une analyse canonique récursive

indice	facteur	$\{a_j\}(m.s^{-1})$	$\{x_{op,i}\}$
a_1	V_1	-1.0515	-1
a_2	V_2	1.4632	-1
a_3	P_d	0.3699	1
a_4	m_p	13.266	1
a_5	C	-5.7693	-1
a_6	c_v	5.3982	1
a_7	B	3.1483	1
a_8	n	12.816	1

Le fait que l'optimum soit placé sur un sommet du domaine d'étude tend à indiquer que y varie de façon façon monotone en fonction de chacun de ses facteurs, qui auraient donc tous une influence linéaire. Pour s'en assurer, et puisque notre domaine d'étude est assez large et pourrait masquer des effets locaux, nous avons conduit la même étude sur 20 plans d'expérience de Doehlert, de rayon $r\ in[n/20, n \in [[1, 20]]]$. Nous avons trouvé que l'optimum est toujours le même, quelque soit le domaine d'étude.

3.3.5 Discussion et conclusion

Nous pouvons donc sans trop de risque affirmer qu'il n'existe pas d'optimum local sur le domaine d'étude, et que les facteurs ont tous une influence monotone sur la vitesse d'éjection. Puisque nous avons conduit notre étude avec les caractéristiques des poudres en facteurs, les conclusions et règles de conception que nous allons tirer maintenant sont valables indépendamment de l'incertitude sur les caractéristiques des poudres. Facteur par facteur, nous concluons que :

- La charge de poudre et le coefficient exponentiel de la loi de Vieille pilotent l'éjection. A poudre donnée, nous pourrons piloter nos vitesses d'éjection en choisissant la charge de poudre à embarquer.
- Minimiser les volumes de combustion et de détente maximise la vitesse d'éjection. Réduire les volumes non utiles nous permettra de laisser plus de place à la charge utile, tout en limitant la charge de poudre à embarquer à vitesse d'éjection donnée ! Nous proposons de choisir la taille des chambres de combustion comme la taille minimum requise pour contenir la charge de poudre + 20%, et la taille de la chambre de détente comme le volume laissé libre par la plus petite jupe existante. Imposer un volume non nul pour la chambre de détente permettra également à notre disque de métal épaulé d'avoir de la place pour se déplacer et laisser sortir les gaz.
- Augmenter la pression de désoperculage nous permet, à moindre niveau, d'augmenter la vitesse de sortie. Or le retour d'expérience nous dit que plus la pression de désoperculage est élevée, plus la dispersion sur la vitesse d'éjection est grande. Nous avons, pour le confirmer, fait d'autres études de RSM en changeant le domaine d'étude de la pression de désoperculage. Sans rentrer dans le détail de cette campagne d'étude ici, nous nous sommes aperçus qu'il existe un minimum d'influence de la pression de désoperculage. Autour de $2.5Bar$, l'influence de la pression de désoperculage est minimale. Puisque la pression de désoperculage a une faible influence sur la vitesse de sortie, nous choisissons ici de privilégier la reproductibilité.
- Limiter le poids du projectile augmente la vitesse d'éjection. Il faudra donc limiter le poids de l'électronique et du bloc éjection s'il est embarqué, le poids de la fonction terminale étant imposé par l'application.
- L'influence de la pression de forcement est négligeable. Nous garderons donc le système de bouchon existant, qui permet de garantir l'étanchéité des munitions 1"1"8" en opération et en stockage.

A noter que nous aurions pu, dès le départ, conduire une étude d'influence facteur par facteur. Elle aurait été sensiblement plus simple à réaliser, mais aurait encouru le risque d'être fallacieuse puisque qu'elle négligeait les interactions.

Enfin, nous avons utilisé URUK pour conduire une étude dichotomique et déterminer les charges de poudre correspondantes à trois vitesses d'éjection standard, 20, 30 et $40 m.s^{-1}$. Nous retiendrons donc, pour notre démonstrateur, les paramètres décrits dans le tableau 3.4. Il contiendra trois chambres de combustion indépendantes de $0.33 cm^3$ et chargées de $0.15 g$ de BNP chacune.

TABLE 3.4 – Paramètres de définition retenus

Facteur	Valeur	Justification
V_2	$1 cm^3$	Taille des plus petites jupes existantes, nécessaire pour laisser passer le disque de métal
P_d	$2.5 Bar$	Pression à laquelle la dispersion sur la pression de désoperculage a le moins d'influence
P_f	$5 Bar$	Existant
m_p	$0.16 kg$	Existant, nous supposons que la masse du bloc électronique est négligeable devant la masse du pain IR

Nous extrayons les courbes de pression en fonction du temps pour chacune de ces simulations, et la pression maximale atteinte. Les résultats sont synthétisés dans le tableau 3.5 et le graphe 3.10.

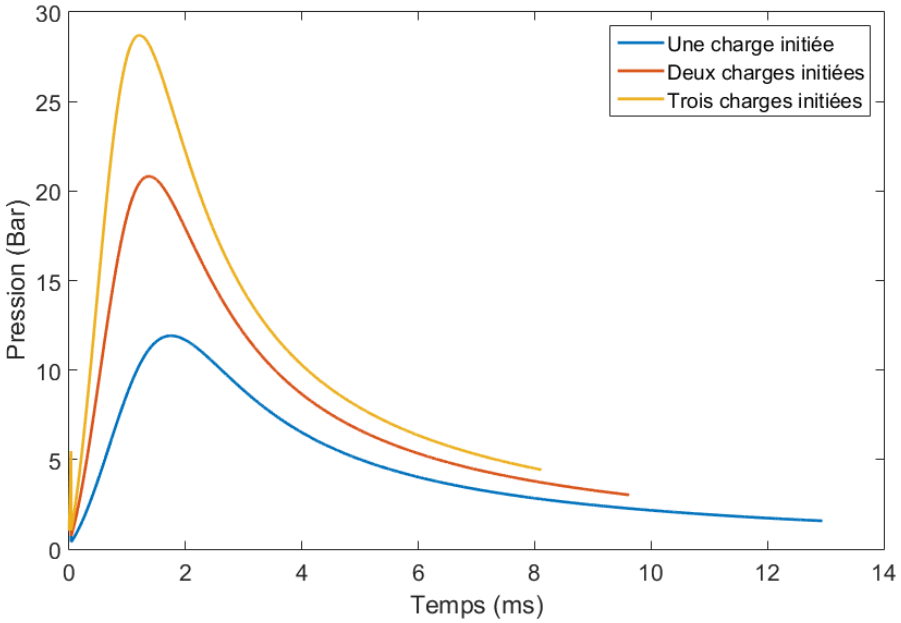


FIGURE 3.10 – Pression générée par la combustion d'une, deux ou trois charges de $0.15 g$ de BNP dans une munition CASSIS

Table 3.5 – Pressions maximales générées par la combustion d'une, deux ou trois charges de $0.15g$ de BNP dans une munition CASSIS

Nbr charges initiées	Pression max (Bar)
1	11.91
2	20.82
3	28.70

3.4 Validation expérimentale

Nous avons, dans la partie 3.3, déterminé les dimensions de notre démonstrateur d'impulseur contrôlable. Nous devons maintenant valider notre concept, et vérifier que nous sommes capables d'allumer indépendamment, une deux ou trois charges de BNP et, par extension que nous sommes capables de contrôler un effet mortier. Nous proposons de procéder en 4 étapes :

1. Dans un premier temps, nous vérifierons si nous sommes capables, à l'aide de micro-inflammateurs LAAS-CNRS, d'allumer de la BNP. Nous proposons de faire cet essai en bombe manométrique pour permettre au passage d'extraire les données des poudres plus précisément à l'aide de RAMA.
2. Dans un second temps, nous validerons que nous sommes capables d'allumer des compositions d'initiation à l'aide de filaments plastroniques.
3. Dans un troisième temps, nous validerons notre capacité de contrôle en bombe manométrique.
4. Dans un quatrième temps, nous validerons notre capacité de contrôle sur des tirs représentatifs.

Nous nous proposons donc d'effectuer quatre essais, un essai de tir de micro-inflammateurs en bombe manométrique, un essai de tir de filaments plastroniques à l'air libre, un essai de tir d'impulseurs triples en bombe manométrique, et un essai de tir semi-dynamique d'impulseurs triples.

3.4.1 Essai de tir de micro-inflammateurs en bombe manométrique

Objectifs

Les bombes manométriques sont des enceintes en métal dotées d'un capteur de pression, qui permettent d'étudier l'évolution de la pression lors d'une combustion à volume constant. Jusqu'ici à Lacroix-défense, les bombes manométriques accueillait un logement pour squib, qui assurait l'initiation. Par design, les squibs doivent nécessairement embarquer une charge de ZPP pour initier une charge secondaire. La caractérisation était donc toujours celle de la ZPP et d'une poudre secondaire.

Nous proposons donc pour cet essai de développer une bombe manométrique qui utilise des micro-inflammateurs comme initiateurs.

Plan d'expérience

Nous nous proposons de tester trois densités de chargement de BNP, 200, 400 et 600 $kg.m^{-}3$ trois fois chacune, conformément à la norme NF T-70-714.

Dispositif de test

Nous proposons donc la bombe manométrique décrite dans l'image 3.11. Elle a été conçue avec un objectif de rapidité de mise en oeuvre en tête, pour faciliter une utilisation sur des campagnes de caractérisation de grande ampleur. Elle se compose de 5 grandes parties, un support capteur, une chambre de combustion, un PCB porte-puce, un support PCB et une base.

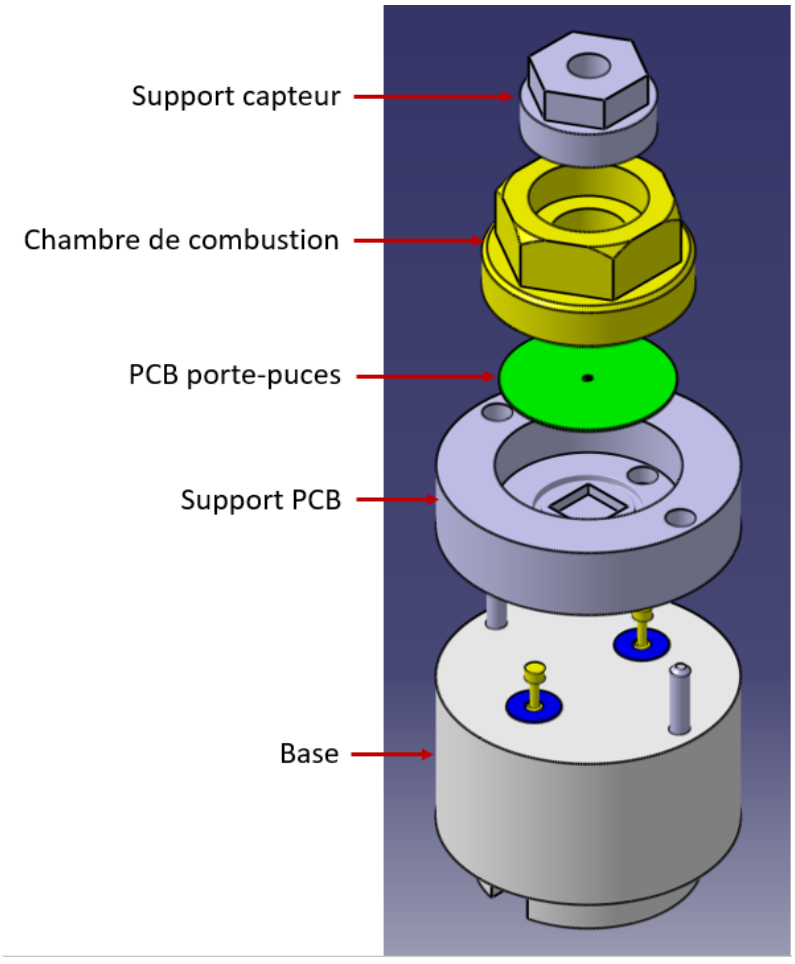


FIGURE 3.11 – Schéma éclaté de la bombe manométrique pour tirs micro-inflamamteurs

Les PCBs porte-puces sont fabriqués à l'avance des essais, en brasant une un micro-inflammateur sur un PCB dédié, puis en encapsulant la puce. Nous nous

sommes ici proposés d'encapsuler la puce avec $2cm^3$ de DP 190, contenue lors de sa polymérisation par un petit cadre imprimé 3D pour éviter tout problème d'étanchéité au niveau de la puce. Le montage de la puce est représenté en figure 3.12.

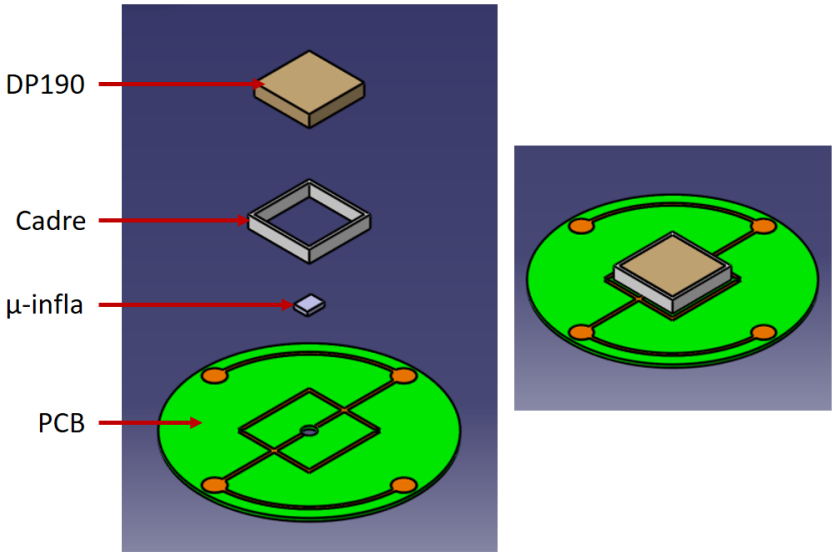


FIGURE 3.12 – Schéma du PCB porte-puce pour tir en bombe manométrique de micro-inflammateurs, éclaté (gauche) et monté (droite)

Le dispositif est monté en suivant la procédure suivante :

1. Le PCB est monté sur son support (support PCB sur figure 3.11).
2. La chambre de combustion est vissée sur le support PCB. Elle maintient en position le PCB, et permet de transporter facilement le bloc {support PCB + PCB + chambre de combustion} jusqu'à une zone de pesée.
3. La poudre à tester est chargée dans la chambre de combustion.
4. Le support capteur est vissé sur la chambre de combustion.
5. L'ensemble est posé sur sa base.

A noter que la base porte deux contacts à ressort qui viennent connecter le PCB par gravité. Une photo du dispositif, avant montage du capteur et connexion au système d'alimentation est de mesure, est donnée en figure 3.13.

FIGURE 3.13 – Photo de la bombe manométrique initée par micro-inflammateurs

Les micro-inflammateurs sont initiés à l'aide d'une alimentation stabilisée Isotech IPS606D. Nous mesurons, sur un osciloscope Tektronix DPO4034 :

- la pression à l'aide d'un capteur piezo-électrique kistler 601h
- l'intensité parcourant les micro-initiateurs à l'aide d'une pince ampérométrique Chauvin Arnoux E6N
- et la tension aux bornes des micro-inflammateurs

Résultats et discussion

Malheureusement, les micro-inflammateurs seuls n'ont pas été en mesure d'allumer la BNP, sur aucun des tirs. Ainsi, nous avons choisi de couler 10mg de nanothermites AL/CuO sur la puce après brasure, déposés avec l'aide d'Andrea Nicollet, doctorante LAAS-CNRS. Les nanothermites Al/CuO générant peu de gaz, nettement moins que la ZPP, les utiliser permet d'extraire des données de meilleures qualité. A noter qu'il aurait également été possible d'utiliser des puces plus grandes, embarquant plus de matériau énergétique, et de compacter la ZPP sur la puce pour assurer la transmission de feu [16].

La BNP s'est allumée à chaque essai et nous avons pu déterminer les paramètres de la poudre avec RAMA. Il s'est avéré qu'entre le lot de poudre à partir duquel nous avions réalisé notre prédimensionennement et le lot de poudre utilisé pour cet essai, la force de la poudre avait presque doublé ! Cet effet n'est pas dû aux nanothermites et a été observé, dans le même ordre de grandeur, lors d'essais Lacroix-défense. Les courbes des tirs sont données ci-après, figure 3.14.

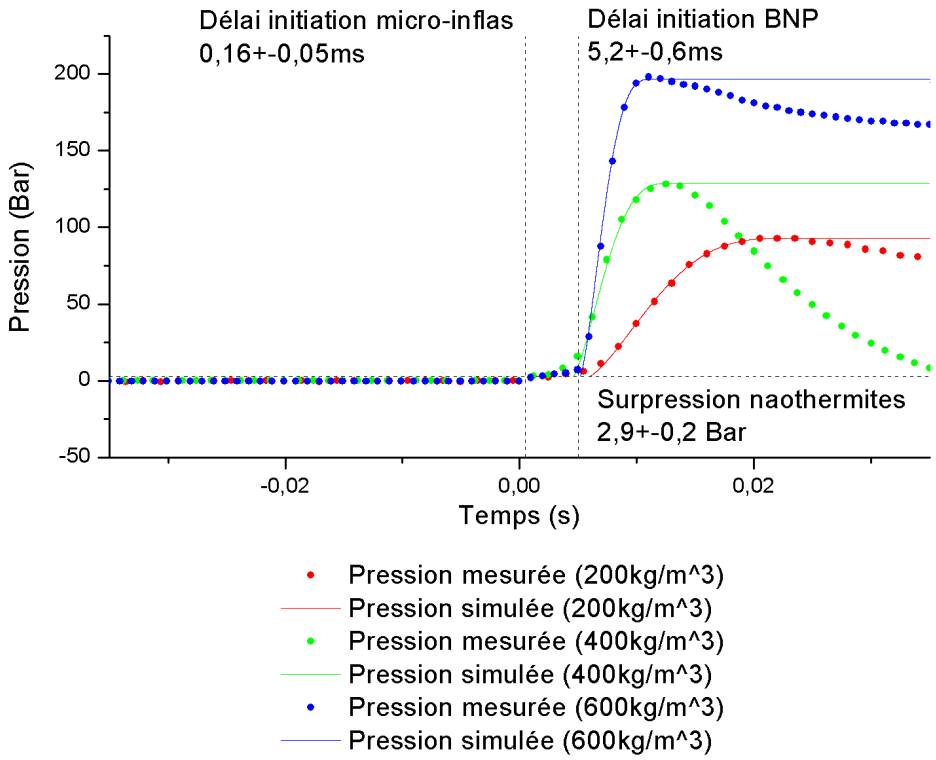


FIGURE 3.14 – Courbes de pressions en bombe manométrique initiés par micro-initiateurs

3.4.2 Essais de tir à l'air libres de filaments plastroniques

Objectifs

La plastronique se démocratise, notamment dans l'électronique personnelle, pour diminuer la taille et les coûts de fabrication, et mieux intégrer les fonctions électroniques, mécaniques ou de packaging. Il n'a en revanche à notre connaissance jamais été envisagé d'utiliser la plastronique pour fabriquer des filaments d'initiation pour applications pyrotechniques. Nous proposons pour ce deuxième essai de commencer à caractériser les filaments plastroniques, pour s'assurer de la viabilité du concept avant d'aller plus loin, et pour commencer à accumuler des données sur l'initiation à l'aide de filaments plastroniques. Pour limiter les coûts et le temps de réalisation de cet essai, nous proposons de métalliser une plaque plastique plutôt qu'un inflammateur 3D.

Plan d'expérience

Jusqu'ici, tous les squibs avaient un filament qui faisait 1Ω de résistance, pour tenir la norme $1A/1W/5min$, et pour s'adapter à tous les systèmes lanceurs. Puisque nous avons la possibilité de modifier le système de mise à feu des leurres, nous nous

proposons de réévaluer la pertinence de filaments à 1Ω en testant des filaments plastroniques à 1, 3 et 5Ω. Nous testerons chaque design 4 fois. Nous nous proposons d'utiliser le premier des 4 essais pour déterminer l'intensité de feu / non feu, en augmentant progressivement la puissance, à partir de $1W$, et en augmentant par incréments de $0.5W$. Les trois autres essais seront réalisés au double de la puissance de feu / non feu présumée, pour évaluer la reproductibilité de l'allumage.

Dispositif de test

Sachant que le cuivre déposé chimiquement est très conducteur (résistivité de $2.9.10^{-8}\Omega.m$), nous avons dû réduire sa section au maximum. Le laser le plus performant disponible chez S2P au moment de l'étude ne nous permettait pas de réduire la largeur du filament en dessous de $150\mu m$. Qui plus est, sachant que la rugosité de surface du plastique doit être de l'ordre de $1\mu m$, il n'est pas possible de descendre en dessous d'une épaisseur de métallisation de $4\mu m$ sans risquer une rupture de ligne, ou des fragilités dans le filament. Nous avons ainsi défini les longueurs de filament données ici dans le tableau 3.6.

Table 3.6 – Coefficients linéaires issus d'une RSM à 10 facteurs

Resistance (Ω)	Longueur du filament (mm)
1	24
2	63
3	105

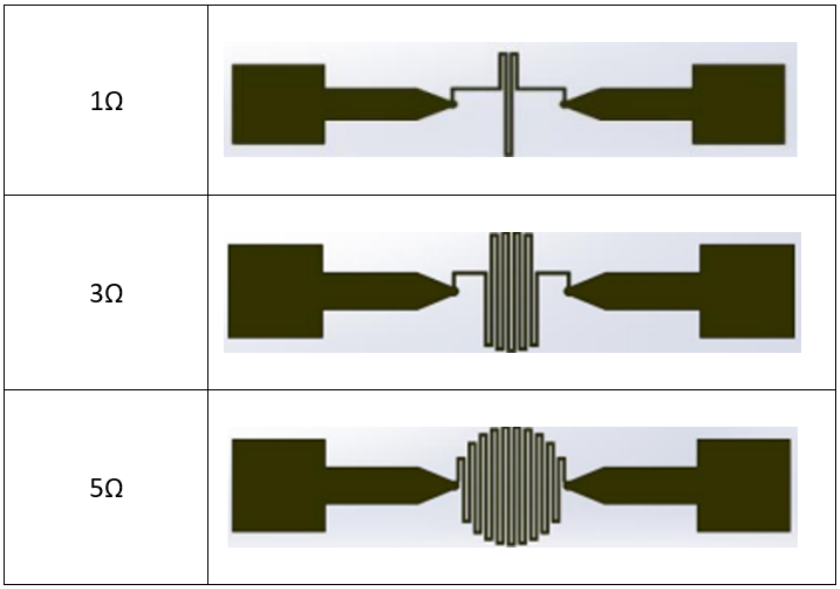


Figure 3.15 – Schémas des différents filaments plastroniques

Nous avons proposé dans la section 3.2.2 de faire des chambres cylindriques,

faciles à injecter/usiner et très adaptées à recevoir une pièce de métal épaulée. Nous nous sommes basés sur cette définition préliminaire pour prédimensionner les filaments. Nous avons défini trois designs de filaments, capables de tenir dans un cercle de $6mm$. Les designs sont présentés en figure 3.15.

Les plaques ont été métallisées dans des bains manuels, à agitation magnétique, compte tenu du bas niveau de TRL de l'étude. Nous avons ensuite successivement collé des rondelles téflon $\phi 7mm$ à la colle cyanoacrylate autour des filaments, pour simuler la chambre de combustion, et y avons coulé de la ZPP (voir figure 3.16. La conductivité thermique du nylon est analogue à celle du polycarbonate ($0.2W.m^{-2}$).

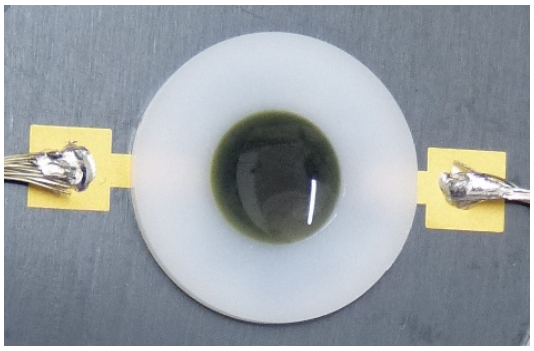


FIGURE 3.16 – Dépose ZPP sur filaments plastroniques - Avant séchage

La dépose a été effectuée avec un dispositif fluidique de précision Lacroix-défense pour applications espace. Nous avons déposé à chaque fois $80 \pm 10\mu l$ de ZPP, puis avons laissé l'ensemble sécher pendant 24h.

Les tirs ont été effectués à l'aide d'une alimentation variable de laboratoire CPX400S de TTI. Nous mesurons :

- le délai de déclenchement à l'aide d'un photomètre Minolta T10
- l'intensité parcourant les filaments plastroniques à l'aide d'une pince ampéro-métrique Chauvin Arnoux E6N
- et la tension aux bornes des filaments plastroniques

Sur une centrale d'acquisition GRAPHTEC GL900.

Résultats et discussion

Les résultats de l'ensemble des tirs sont synthétisés dans le tableau 3.7.

Essai n°	Résistance théorique (Ω)	Conditions de tir	Délai d'initiation (ms)	Énergie d'initiation (J)
1	1	$7.5W$	64.0	0.785
2	1	$15W$	27.0	0.570
3	1	$15W$, filament partiellement exposé à l'air	14.0	0.285
4	1	$15W$	27.7	0.500
5	3	Rupture filament, dû aux sollicitations répétées	–	–
6	3	$15W$	76.5	1.73
7	3	$30W$	28.5	1.23
8	3	$30W$	23.5	1.33
9	5	$25W$	49.9	2.48
10	5	$50W$	25.6	2.04
11	5	$50W$, filament partiellement exposé à l'air	13.5	0.905
12	5	$50W$	30.4	2.29

TABLE 3.7 – Résultats essais de tir filaments plastroniques à l'air libre

Les tirs dits partiellement exposés à l'air correspondent à des tirs où la goutte de ZPP, en séchant a laissé apparaître une partie du filament (voir figure 3.17). La ZPP étant déposée en solution aqueuse, et la surface de polycarbonate étant relativement hydrophobe, la ZPP s'est par endroit retirée lors du séchage. Les deux instances où ce phénomène a eu lieu se sont allumées bien plus vite que pour les autres essais.

FIGURE 3.17 – Filament non totalement recouvert par la ZPP

Nous pouvons donc en conclure que la conductivité thermique de la ZPP est importante, et qu'elle influence grandement le délai d'initiation. Lorsqu'une partie

du filament est exposé à l'air, cette partie chauffe plus vite et claque préférentiellement, ce qui risquerait d'entraîner des problèmes d'allumage. Nous n'exploitons dans la suite que les essais parfaitement réussis.

Ensuite, nous pouvons remarquer que, à haute énergie, les délais d'allumage semblent équivalents, contrairement aux énergies d'allumages. Cet effet est dû au fait que l'initiation est pilotée, non pas par la puissance injectée dans le filament, mais par l'intensité. Le filament chauffe localement, pas en masse. Augmenter la longueur du filament aura donc pour seul effet d'augmenter la puissance d'initiation, sans réduire le délai. La puissance de feu non / feu, et a fortiori la puissance à délivrer pour atteindre un délai d'initiation donnée est directement proportionnelle à la longueur du filament. Il est intéressant de noter que la condition de feu / non feu semble se trouver autour de $2.4A$, ce qui laisse présager du fait que les filaments plastroniques peuvent répondre au critère $1A/1W/5min$, chose qu'il resterait à démontrer dans le cadre d'essais de plus grande ampleur, plus significatifs statistiquement.

Enfin, toutes les courbes d'intensité traversant le filament présentent le même profil en trois parties, bien visible par exemple sur le tir 12 représenté figure 3.18.

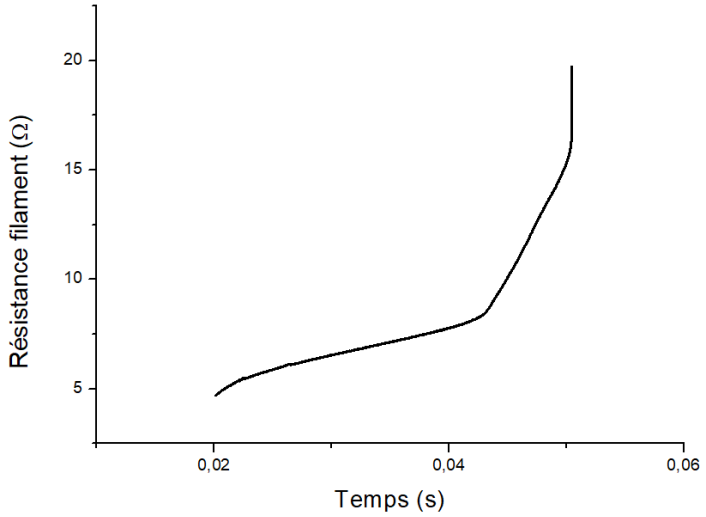


FIGURE 3.18 – Résistance du filament plastronique lors du tir 12

Il semble que la première partie correspondent à la chauffe du filament par effet Joule, la seconde à la chauffe du filament par effet joule et par combustion de la ZPP, et la troisième à la fonte et donc à la rupture du filament. Pour s'en convaincre, nous avons effectué une campagne de simulation du filament sous COMSOL 5.2. Une première simulation, du filament et de son substrat polycarbonate, sans la ZPP, donne les résultats présentés en figure 3.19. Les conditions initiales et limites sont données en annexe D.

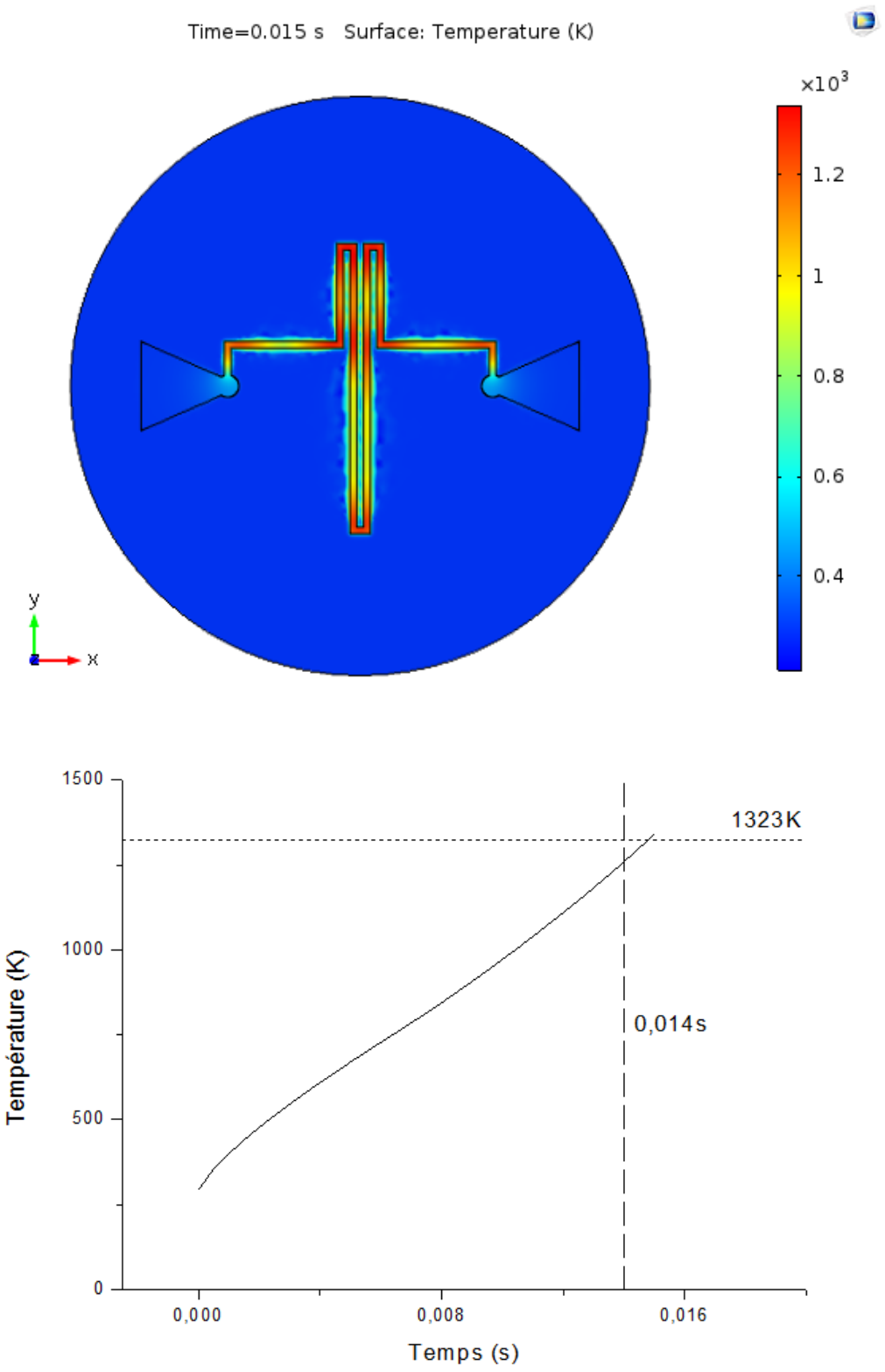


FIGURE 3.19 – Température du filament à 15ms (haut) et température maximum du filament en fonction du temps (bas) tels que simulés par COMSOL

Nous pouvons voir que la température à laquelle le filament atteint la température de fusion du cuivre ($1323K$) est atteinte au bout de $15ms$, soit quasiment les $13.75 \pm 0.35ms$ mesurées expérimentalement, ce qui nous rassure sur la pertinence de la simulation et qui confirme notre analyse du faible délai d'initiation des filaments exposés à l'air.

Nous pouvons également voir que le substrat diffuse très peu la chaleur, ce qui confirme la thèse d'un allumage local, initié par la ZPP en contact intime avec le filament, plutôt qu'une montée en température en masse.

Une deuxième simulation, du filament, de son substrat et de la ZPP donne les mêmes résultats de diffusion, et montre que le temps d'initiation est fortement dépendant de la conductivité thermique de la ZPP. Comme nous ne la connaissons pas précisément, nous nous proposons de retrouver nos résultats expérimentaux à l'aide d'une rapide dichotomie. Nous trouvons une conductivité thermique de la ZPP de l'ordre de $1W.m^{-1}.K^{-1}$, qui correspondrait à une ZPP assez poreuse, et qui est cohérent avec son mode de déposition.

Nous avons démontré que, compte tenu des conductivités thermiques de nos matériaux, et de nos ordres de grandeurs spatiaux et temporels il n'est d'aucune utilité d'augmenter la longueur du filament. Nous ne fabriquerons que des démonstrateurs 3D portant le filament de 1Ω.

3.4.3 Essais de tirs d'impulseurs plastroniques triples en bombe manométrique

Objectifs

Encore une fois, avant de se précipiter et de conduire des essais trop intégrés, où nous ne saurions isoler et comprendre un effet ou un défaut, nous conduisons un essai de validation réduit, où nous étudierons la capacité du thermoscellage et du disque épaulé à empêcher les gaz d'éjection de se transmettre d'une chambre à l'autre.

Plan d'expérience

La plastronique, à grande échelle peut s'avérer très économique. Malheureusement, pour de petites séries, usinées et métallisées à la main, les prix peuvent s'envoler. Pour limiter le coût de cette étude, nous n'avons fait usiner et métalliser que 15 pièces. 5 pour un premier essai de tir en bombe manométrique, et 10 pour un essai de tirs réels. Nous proposons pour ces 5 démonstrateurs d'effectuer le plan d'expérience suivant :

- Démonstrateurs 1 & 2 : tir d'une chambre, puis tir des deux chambres restantes
- Démonstrateurs 3 & 4 : tir de deux chambres, puis tir de la chambre qui reste
- Démonstrateur 5 : tir de trois chambres

Dispositif de test

Nous concevons une nouvelle bombe manométrique, adaptée cette fois-ci à tirer des blocs d'éjection hétéroclites. L'idée est d'utiliser un étage imprimé 3D sur lequel sera collé le bloc d'éjection, pour assurer l'étanchéité de l'ensemble. Elle se compose de 4 grandes parties, un support capteur, une chambre de combustion, un support imprimé 3D de bloc d'éjection et une base. Uns schéma éclaté en est donné figure 3.20

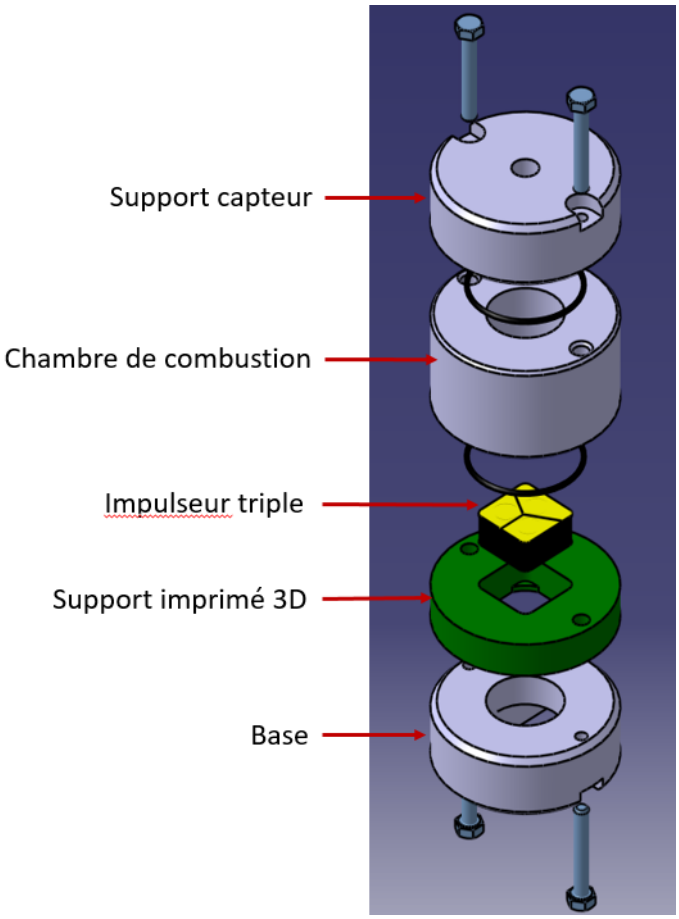


FIGURE 3.20 – Schéma éclaté de la bombe manométrique pour tirs d'impulseurs triples

Les impulseurs triples sont préparés au préalable en, dans l'ordre :

1. soudant des fils sur l'impulseur
2. résinant, à la DP190, les vias métallisés. Puisque les vias ont été usinés avec une fraise de $1mm$, ils sont trop gros pour être comblés par le seul cuivre chimique.

3. déposant $80 \pm 10\mu l$ de ZPP dans chacune des chambres à l'aide du dispositif fluidique de précision Lacroix-défense
4. chargeant $0.15g$ de BNP dans chacune des chambres
5. fermant chacune des chambres à l'aide d'un disque de métal
6. scellant chacune des chambres à l'aide d'un opercule thermoscellé
7. prédécoupant l'opercule pour qu'il puisse se lever indépendant entre les trois chambres.
8. collant l'impulseur triple sur son support imprimé 3D

Des images des véhicules de tests sont données en figure 3.21.

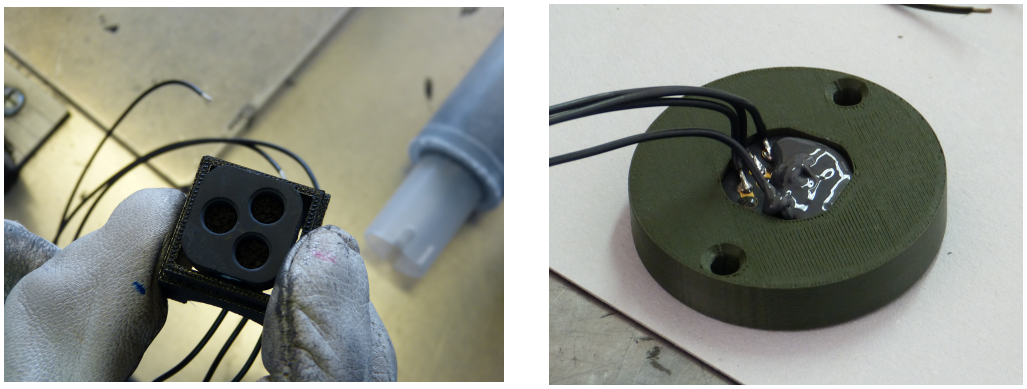


FIGURE 3.21 – Photos des véhicules de test en chargement (gauche) et en collage (droite)

A noter que le thermoscellage a été effectué à l'aide d'une machine Embaltherm TME 160. Nous y avons conduit une rapide étude de thermoscellage sur des plaques de polycarbonate. Nous avons levé l'operculage à l'aide d'un capteur de force monté sur une colonne de perçage. Nous avons mesuré une pression statique de désoperculage de $2.8 \pm 0.5 Bar$, soit très proche des $2.5 Bar$ que nous avions déterminés comme optimal lors de notre prédimensionnement, en restant sur les paramètres standards de la machine (250°C, $1s$ et $3.5 Bar$). Nous avons également remarqué qu'il était nécessaire de prédécouper l'opercule, sans quoi désoperculer une chambre les désoperculait toutes.

Contrairement à la bombe manométrique pour micro-inflammateurs, rendue étanche par vissage des différentes parties, cette bombe manométrique sera comprimée sous une presse hydraulique (voir figure 3.22), pour lui permettre de s'adapter à différents étages d'impulseurs, si jamais le design de celui-ce venait à changer.

FIGURE 3.22 – Photo de la bombe manométrique pour impulseurs triples montée sur presse

Les tirs ont été effectués à l'aide d'une unité de mise à feu AOIP MF28. Nous mesurons, sur une centrale d'acquisition GRAPHTEC GL900. :

- la pression dans la chambre de combustion à l'aide d'un capteur piezoélectrique Kistler 601H
- l'intensité parcourant les filaments plastroniques à l'aide de trois pinces ampérométriques
- et la tension aux bornes des filaments plastroniques

Résultats et discussion

Les pressions sont conformes à l'attendu, comme le montre, par exemple la courbe de pression du 4ème tir, présentée figure 3.23. Les résultats en pression sont synthétisés dans le tableau 3.8.

TABLE 3.8 – Pressions maximales simulées et mesurées lors des essais d'impulseurs plastroniques triples en bombe manométrique

Pression max simulée (Bar)	Pression max mesurée (Bar)
24.92	24.52 ± 1.98
50.44	49.01 ± 2.42
74.56	73.83

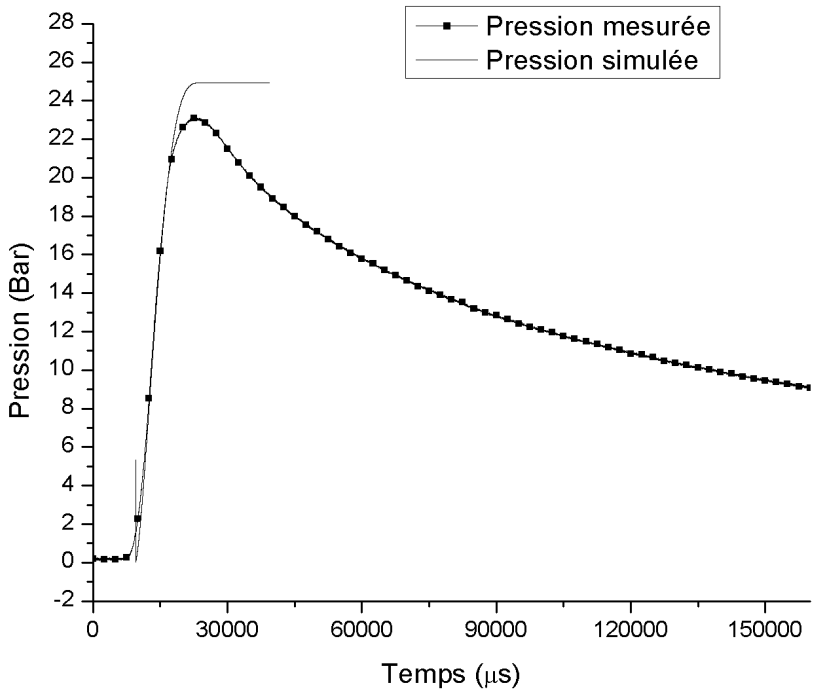


FIGURE 3.23 – Courbe de la pression en fonction du temps lors du premier tir du démonstrateur 3, une chambre allumée

Nous avons sélectivement allumé une, deux ou trois chambres, et le feu ne s'est propagé dans aucun de nos essais, pour peu qu'un paillet métallique ferme les chambres.

Nous proposons donc de garder ce concept, et de le valider au cours d'essais de tirs représentatifs. Le dispositif est quant à lui fonctionnel et apte à continuer la validation d'impulseurs triples plastroniques, ou de tout types d'impulseurs non standards en adaptant la pièce imprimée 3D.

3.4.4 Essais de tir semi-dynamiques de cartouches intégrant un impulseur plastronique triple

Objectifs

Nous arrivons enfin au terme de cette partie, et désirons vérifier que nous arrivons effectivement à contrôler la vitesse d'éjection de munitions 1"1"8". Nous proposons donc de conduire un essai de tir semi-dynamique, où la munition est tirée depuis un pas de tir fixe.

Plan d'expérience

Comme défini précédemment, il nous reste 10 impulseurs. Nous proposons le plan d'expérience suivant :

- Démonstrateurs 6, 7, 8 & 9 : tir d'une chambre
- Démonstrateurs 10 & 11 : tir de deux chambres
- Démonstrateurs 12, 13 & 14 : tir de trois chambres

Dispositif de test

Nous proposons de réutiliser le dispositif de tir semi-dynamique de cartouches 1"1"8" existant, en utilisant des pièces imprimées 3D là où il faut adapter les interfaces mécaniques. Le dispositif dans son ensemble est représenté en figure 3.24.

FIGURE 3.24 – Dispositif pour tir semi-dynamique d'impulseurs triples

La munition est faite d'un pain inerte, monté sur une sécurité mécanique existante. N'ayant pas a disposition de pains inertes de 160g, nous nous contenterons de pains inertes plastiques de 60g, et corrigerons la simulation en conséquence.

L'impulseur triple est monté exactement comme lors de l'essai précédent, et est collé à la DP190 sur une pièce imprimée 3D qui vient remplacer le fond de douille métallique existant.

Nous proposons, pour valider plus avant notre modèle de balistique intérieure de mesurer la pression dans la chambre. Des essais en ce sens avaient été menés à Lacroix-défense, mais n'avaient pas aboutis faute d'étanchéité entre la douille et le support de capteur. Nous avons donc décidé de redévelopper un outillage de mesure de pression d'éjection dans une cartouche 1"1"8", et avons abouti au design détaillé dans l'éclaté figure 3.25.

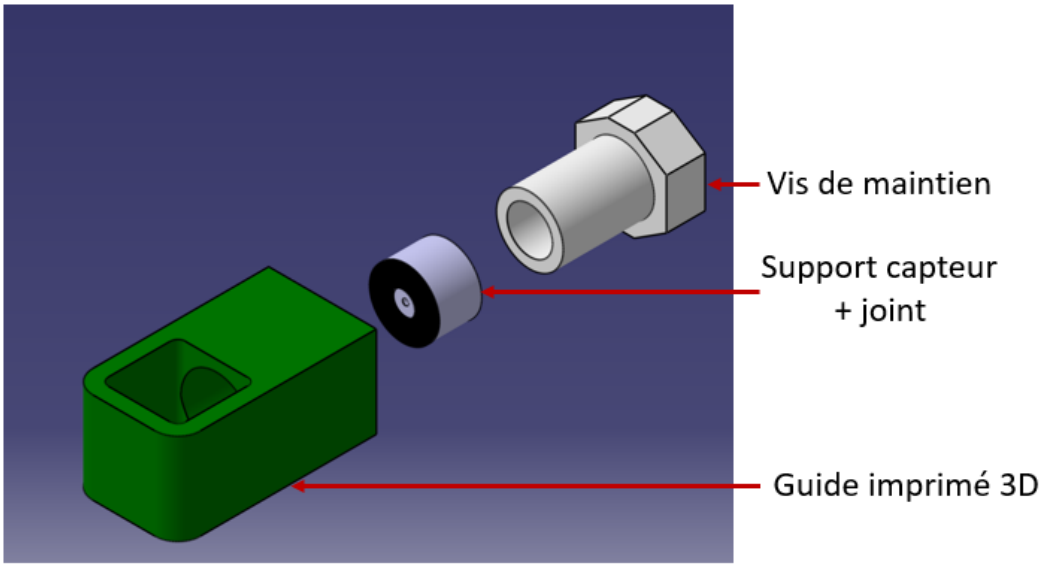


FIGURE 3.25 – Schéma éclaté du support capteur pour mesure pression interne cartouche 1"1"8"

Il se monte, dans l'ordre :

1. en vissant le capteur sur son support
2. en passant le capteur dans le truc imprimé 3D
3. en connectant le capteur à son fil
4. en passant l'ensemble autour de la cartouche
5. en vissant la vis de maintien

La présence d'une vis de maintient, serrable à l'envie, et d'un large joint polymère assure l'étanchéité de l'ensemble.

Nous mesurons :

- la pression dans la chambre de combustion à l'aide d'un capteur piezoélectrique Kistler 5015
- l'intensité parcourant les filaments plastroniques à l'aide de trois pinces ampérométriques
- la vitesse d'éjection à l'aide d'une caméra rapide AOS S-VIT
- et la tension aux bornes des filaments plastroniques

Sur une centrale d'acquisition GRAPHTEC GL900.

Résultats et discussion

Les résultats de ce dernier essai sont synthétisés dans le tableau 3.9.

TABLE 3.9 – Délais et vitesses d'éjection pour les impulseurs triples en situation

N° tir	Configuration	Délai d'initiation (ms - charge 1/2/3)	Vitesse d'éjection ($m.s^{-1}$)
1	1 charge / 5A	42.16/-/-	23.9
2	1 charge / 5A	18.92/-/-	23.5
3	1 charge / 5A	8.66/-/-	30.3
4	1 charge / 5A	16.24/-/-	29.6
5	2 charges / 60V	11.4/30.95/-	48.4
6	2 charges / 60V	2.29/2.01/-	13.0
7	3 charges / 5A	NO/NO/NO	57.4
8	3 charges / 30V	NO/NO/NO	58.0
9	3 charges / 60V	1.99/1.58/0.38	53.2
10	3 charges / 60V	2.29/2.01/-	28.4

Tout d'abord, notons que tous les tirs ont réussi et que, dans tous les cas, nous avons pu choisir le nombre de chambres initiées. Les tirs ont été effectués avec deux alimentations différentes, l'alimentation CPX400S TTI 60V n'étant pas disponible au début des essais nous avons utilisé un boîtier d'initiation 5A/50ms Lacroix-défense.

Remarquons ensuite que mis à part les tirs 6 et 10, les vitesses semblent reproductibles. Les deux ont des délais d'allumage très élevés, malgré l'utilisation de l'alimentation 60V. Les filaments étant situés dans le fond des chambres, et la métallisation étant réalisée dans des bains à agitation magnétique, très artisanaux, les résistances des filaments varient fortement, de 0.462 à 0.925 Ω. Une résistance trop métallisée - qui peine à claquer - couplée à une alimentation en tension saturée - qui peine à envoyer de la puissance à mesure que la température, et donc la résistance des filaments augmentent - expliquent ces artefacts.

Enfin, pour les tirs qui se sont déroulés correctement, nous démontrons bel et bien que nous pouvons contrôler la vitesse d'éjection, comme en témoigne le tableau 3.10. , qui rassemble les vitesses d'éjection, et la figure 3.26, qui présente les mesures de pression des tirs 1, 5 et 9.

TABLE 3.10 – Vitesses d'éjection moyennes mesurées lors des essais d'impulseurs plastroniques en situation

Configuration	Vitesse d'éjection moyenne ($m.s^{-1}$)
MAF 1 charge	26.8 ± 3.6
MAF 2 charges	48.4
MAF 3 charges	56.2 ± 2.6

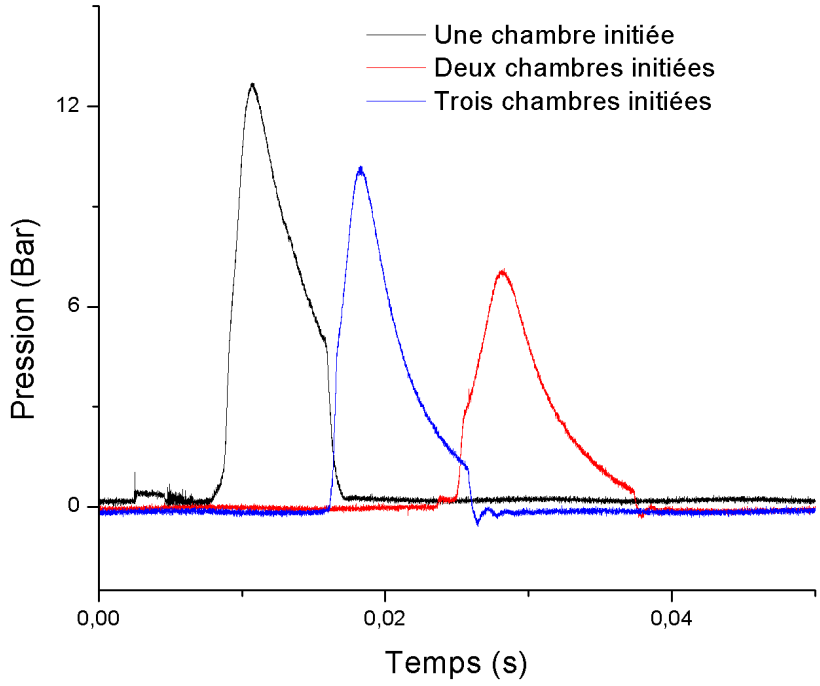


FIGURE 3.26 – Mesures de pression en fonction du temps dans la chambre de détente pour les tirs 1 (une chambre), 5 (deux chambres) et 9 (trois chambres)

3.5 Conclusion

Dans ce troisième chapitre, nous avons détaillé la conception et la validation du sous-ensemble bloc d'éjection. Nous avons, sur base de l'état de l'art présenté aux chapitres 1, 2 et encore un peu étendu ici, proposé deux solutions technologiques

d'impulseur triple contrôlable. Le premier se base sur la technologie plastronique, et le second sur les micro-initiateurs LAAS-CNRS, et tous deux se basent sur la compartimentation de plusieurs charges d'éjection indépendantes.

Nous avons développé un code de simulation, et un superviseur d'optimisation nous permettant conjointement d'évaluer l'influence de nos différents paramètres. Ils nous ont permis de prédimensionner des démonstrateurs, indépendamment de l'incertitude sur nos données d'entrée, en définissant des grandes règles de conception. Sommairement, la charge de poudre pilote l'éjection. Augmenter les volumes libres aux gaz et le poids de la munition diminue ses performances. La pression de désoperculage n'est pas prépondérante, mais pour éviter que sa dispersion influence trop la vitesse, on cherchera un opercule qui lâche autour de $2.5Bar$. L'influence de la pression de forcement et du covolume sont négligeables.

Nous avons ensuite validé nos solutions au fur et à mesure. Nous avons commencé en évaluant la capacité de micro-initiateurs à allumer directement de la BNP. Malheureusement, les puces existantes ne sont pas assez énergétiques, et nécessitent l'usage d'une composition secondaire pour enflammer de la BNP. La bombe manométrique développée pour cet essai garde son intérêt pour la caractérisation de compositions plus sensibles.

En suivant, nous avons voulu étudier l'initiation de ZPP par filaments plastroniques. Nous avons vu que nous étions capables d'allumer de la BNP de manière reproductible, et que le délai d'initiation était piloté par la section du filament. Nous avons donc choisi de ne conserver qu'un design de résistance de 1Ω dans la suite.

Nous avons ensuite validé notre concept de contrôle lors d'essai en bombe manométrique. Nous avons prouvé que nous étions capables d'allumer sélectivement une, deux ou trois chambres, et de produire trois pressions maximales en chambre différentes.

Nous avons ensuite validé notre concept de contrôle lors d'essai de tirs semi-dynamiques. Nous avons prouvé que nous étions capables d'allumer sélectivement une, deux ou trois chambres, et de produire trois vitesses d'éjection différentes.

Nous nous proposons, maintenant que nous avons évalué nos solutions de contrôle de la fonction terminale et de l'éjection, de nous intéresser à nos solutions de commande et de sécurisation, dans notre quatrième et pénultième chapitre.

Chapitre 4

Conception et développement du bloc électronique et sécurités

Sommaire

4.1 Introduction 114

4.2 État de l'art des systèmes de contrôle et de sécurisation des leurres 114

4.3 Analyse fonctionnelle du bloc électronique et sécurités . . . 116

4.4 Recherches de solutions technologiques pour le bloc électronique et sécurités de CASSIS 117

4.4.1 Armement 117

4.4.2 Gestion de l'énergie 118

4.4.3 Autotest 120

4.4.4 Contrôle/commande 120

4.5 Prototypage et validation de l'électronique 120

4.5.1 Prototypage virtuel 120

4.5.2 Plate-forme d'expérience 121

4.5.3 Module taille réelle 121

4.6 Conception et développement de la sécurité mécanique . . 123

4.6.1 État de l'art des sécurités mécaniques dans les leurres 123

4.6.2 Recherche de solutions de sécurités mécaniques 124

4.6.3 Concept retenu 129

4.6.4 Prototypage et validation expérimentale 129

4.7 Conclusion 132

A cable is a source of potential trouble connecting two other sources of potential trouble.

Anonyme, tel que rapporté par Bill Whitlock dans Understanding, Finding, & Eliminating Ground Loops, 2008

4.1 Introduction

Le quatrième et avant dernier chapitre de ce manuscrit s'intéresse à la conception du bloc intelligence et sécurités du leurre CASSIS. Il doit commander la mise à feu des fonctions éjection et terminale. Il doit donc stocker de l'énergie électrique et garantir une sécurité de bouche. Le pain IR ne doit pouvoir s'allumer que si l'éjection s'est bien déroulée. Une dernière fois, nous proposons de revenir plus en détail sur les blocs électro-pyrotechniques et sécurités existants, avant de proposer des solutions de contrôle possible, qu'enfin nous validons expérimentalement.

4.2 État de l'art des systèmes de contrôle et de sécurisation des leurres

Aujourd'hui, les fonctions de contrôle et de sécurité sont limitées ou inexistantes sur les objets pyrotechniques peu onéreux et de petite taille. Les lanceurs des leurres 1"1"8" assurent seulement un test de ligne, ils vérifient que la résistance du squib est autour de la résistance cible de 1 Ω en y envoyant un courant faible. Les munitions 1"1"8" n'embarquent qu'un inflammateur haute énergie et une sécurité mécanique de type *bore rider* pour garantir leur innocuité. Un bore rider utilise un ressort pour pousser une pièce mécanique contre le tube de lancement de la munition. Lorsque la munition sort de sa douille, la pièce ne rencontre plus de résistance et peut se déplacer. Ce faisant, elle aligne une partie de la chaîne pyrotechnique et permet le passage du feu vers la fonction terminale. Certains leurres, plus volumineux, embarquent déjà leur propre module électronique, comme SEPIA et SEALIR que nous avions mentionnés dans le chapitre 1.

Notamment, le bloc électronique de SEPIA intègre un compteur MC14541 *drivé* par un circuit RC. Un switch analogique MC14066 permet de faire varier la résistance du circuit RC à la volée. Le compteur commence à compter dès lors que la munition perd le contact avec le lanceur. Une fois le délai atteint, il commande la décharge d'un condensateur tantale 16V/150μF dans un inflammateur. Un seul condensateur assure la mise à feu et l'alimentation de l'électronique. Deux sécurités mécaniques - un bore rider et une masselotte d'accélération - assurent la sécurité de l'ensemble. Une masselotte d'accélération utilise une masse montée sur ressort que l'accélération de la munition va faire bouger par inertie pour aligner une partie de la chaîne pyrotechnique.

Le bloc électronique de SEALIR embarque deux FPGAs (Field-Programmable Gate Array) et un microcontrôleur. Le microcontrôleur assure la communication avec le lanceur, transmet les ordres aux FPGAs, et assure un test de ligne sur les deux inflammateurs 1A/1W embarqués. Les FPGAs assurent la mise à feu et le décompte du délai, lancé si la communication avec le lanceur est coupée après qu'un fort courant ait été détecté dans le bloc éjection à l'aide d'un capteur à bobine torique. Trois condensateurs tantale alimentent respectivement le microcontrôleur, les

FPGAs et la mise à feu. La munition garde trace de ses heures et de la température d'emport dans la mémoire du microcontrôleur.

FIGURE 4.1 – Bloc électronique et bloc sécurités mécaniques SEPIA - Lacroix-défense

Au delà des leurres, le monde de la pyrotechnie fourmille de concepts de blocs intelligence et sécurités. Mentionnons par exemple le brevet US5476044 A d'Ensign Bickford Aerospace & Defense Company [44], le brevet US9115970 d'Orbital ATK [45], le brevet US8528478 B2 de Raytheon Company [46] ou les Electronic Safe and Arms Devices (ESAD) du Multiple Lauch Rocket System (MLRS) de KDI Precision Products [47]. L'écrasante majorité des travaux à ce sujet touche aux têtes militaires et répond donc au STANAG 4187.

Notons enfin qu'intégrer une électronique dans un système d'arme permet un grand nombre de fonctions complémentaires, depuis le monitoring longue durée du cycle de vie missile, comme proposé dans le brevet EP2642241A1 de MBDA [48], jusqu'à la mise en réseau de systèmes pyrotechniques élémentaires, comme proposé dans les travaux de Guillaume Taton [49] et Ludovic Glavier [50] (voir figure 4.2).

Les architectures possibles des blocs électronique et sécurités des systèmes pyrotechniques ont déjà été explorées en détail, pour toutes sortes d'application, et notamment pour les leurres. Malheureusement, les blocs existants restent volumineux, particulièrement lorsqu'il s'agit de leur faire réaliser des opérations complexes. Dans le cadre de ces travaux, nous proposons de repartir d'une architecture connue et reconnue, définie par le STANAG 4187, et de chercher à amener de la miniaturisation, de la fiabilité et de la performance à travers le choix des composants. En particulier, nous proposons de choisir des composants sur étagère pour faciliter le développement, l'adaptation et la récupération ultérieure du projet.

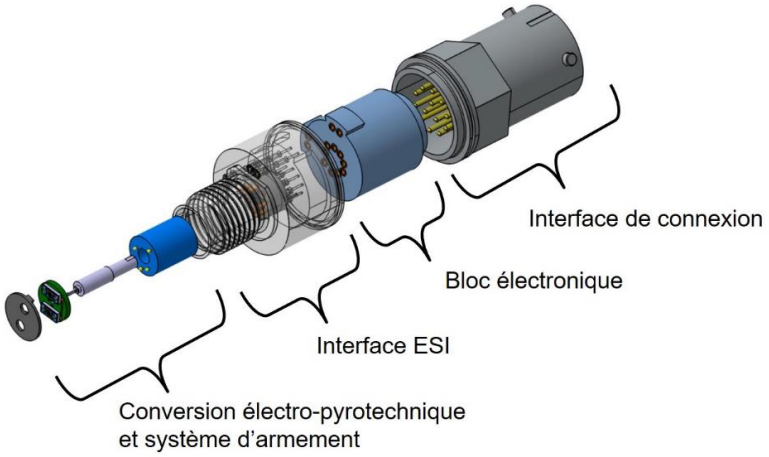


FIGURE 4.2 – EFI designé par L. Glavier - Initiateur sécurisé pouvant être mis en réseau - Dassault / LAAS-CNRS

Nous proposons donc dans la suite de ce chapitre d'établir une analyse fonctionnelle plus poussée du bloc électronique et sécurités, de rechercher, dans l'existant les composants et sous-ensembles innovants puis d'établir un prototype permettant de valider nos concepts et nos choix.

4.3 Analyse fonctionnelle du bloc électronique et sécurités

Rappelons tout d'abord que nous voulons contrôler trois initiateurs d'éjection, et quatre micro-inflammateurs de fonction terminale. Pour ce faire, le électronique doit être capable de recevoir des ordres et de l'énergie de la part du système lanceur, et de les stocker pour être initier les micro-inflammateurs après éjection. Il doit assurer son autotest et en renvoyer le résultat vers le lanceur. En outre, nous avons choisi de nous aligner sur les recommandations du STANAG 4187. Il impose :

- Trois interrupteurs de ligne énergétique (mécaniques ou électroniques, interrompant la transmission d'énergie vers la charge terminale)
- Sur ces trois interrupteurs, au moins un doit fonctionner en statique et au moins un doit fonctionner en dynamique.
- Ces interrupteurs doivent être commandés par au moins deux signaux d'éjection indépendants

Notre bloc électronique et sécurités devra donc remplir six grandes fonctions :

- Adresser nos inflammateurs
- Mettre a feu les initiateurs adressés
- Embarquer et adapter l'énergie d'initiation
- Armer la munition
- Effectuer un autotest
- Communiquer avec le lanceur

L'adressage et la mise à feu peuvent être réalisés à l'air d'un jeu de transistors et d'optocoupleurs. Nous ne détaillerons donc pas plus avant le choix des composants pour ces deux fonctions. Nous proposons dans la suite, de ne présenter que les choix technologiques fait pour l'armement, la gestion de l'énergie, l'autotest et le contrôle/commande.

4.4 Recherches de solutions technologiques pour le bloc électronique et sécurités de CASSIS

Il est à noter, qu'a partir de ce point, les travaux sur l'électronique ont été menés en collaboration avec le Dr. Andres BELISARIO, ingénieur de recherche, CDD au LAAS-CNRS de mars 2016 à décembre 2017.

Nous présentons dans cette partie nos choix, sous-ensemble fonctionnel par sous-ensemble fonctionnel.

4.4.1 Armement

Pour respecter le STANAG 4187, trois interrupteurs de ligne énergétique dont au moins un fonctionne en dynamique seront intégrés. Puisque la munition CASSIS n'embarque pas d'explosifs primaires, nous n'avons pas l'obligation d'intégrer une sécurité mécanique. Or nous proposons ici un bloc électronique qui respecte à lui seul le STANAG 4187 et une sécurité mécanique. **L'objectif avoué est de tester un grand nombre de concepts de sécurisation innovants, et de constituer une base de réflexion qui servira lors de futures itérations du concept CASSIS.**

La sécurité mécanique étant indépendante du bloc électronique, nous proposons de lui dédier une section à part, ultérieure dans ce chapitre.

Reste l'armement électronique. Nous proposons d'intégrer trois transistors, dont un piloté par un signal dynamique entre la supercapacité et les micro-inflammateurs. Nous devons alors définir au moins deux capteurs permettant de récupérer deux signaux démontrant que l'éjection a eu lieu nominalement. Plutôt que de réutiliser

un tore volumineux pour détecter le passage du courant d'éjection comme sur SEALIR, nous proposons d'intégrer deux capteurs miniatures, un accéléromètre et un émetteur/récepteur infrarouge. Le capteur IR est placé face à la douille, et renvoie un écho tant que la munition n'a pas été éjectée. Le troisième interrupteur est levé sur ordre d'éjection. Les capteurs sont présentés en figure 4.3.

FIGURE 4.3 – Photo d'un accéléromètre (gauche) et d'un émetteur/récepteur IR (droite

4.4.2 Gestion de l'énergie

Comme mentionné plus haut, la gestion de l'énergie peut sépare en deux sous parties, le stockage de l'énergie et l'adaptation de l'énergie. Commençons par nous intéresser au stockage d'énergie.

L'objectif est d'allumer quatre inflammateurs, jusqu'à 30s après éjection. La quantité d'énergie électrique embarquée doit être substantielle, et le courant de fuite du stockage minimal. Pour des raisons de sécurité, il est souhaitable de ne pas embarquer de stockage d'énergie longue durée. La munition ne devrait être chargée que lorsqu'elle est montée à poste ou lorsqu'elle va être lancée. Ce faisant, il est possible de limiter les risque d'une initiation intempestive de la munition en stockage sur un court-circuit ou une défaillance du système d'armement. Les leurres, comme toute munition, doivent respecter les normes environnementales, aux rangs desquelles REACH et ITAR. Il n'est donc pas possible d'y intégrer des batteries, des piles ou des capacités au plomb ou au mercure. En conséquence, la plupart des munitions - et notamment les leurres - embarquent des capacités tantale, énergiquement denses, très rapides à charger et sans danger pour l'environnement. Des photos en sont données en figure 4.4.

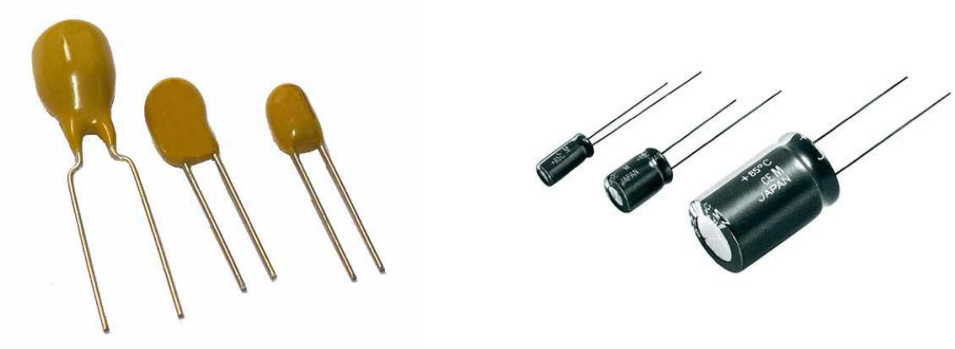


FIGURE 4.4 – Photo de capacités tantale goutte (gauche) et électrolytiques (droite)

Il existe deux grandes alternatives aux capacités tantale, les supercondensateurs et les piles thermiques. Les supercondensateurs sont formés de deux électrodes, l'une négative, l'autre positive, séparées par une membrane poreuse et isolante, le tout baignant dans un solvant électrolytique. Ces condensateurs présentent une densité énergétique supérieure et une résistance équivalente en série très inférieure aux capacités tantale, comme le démontre le tableau 4.1. Les piles thermiques sont formées d'un empilement d'anodes et de cathodes, d'un électrolyte solide et d'un fil chaud. Lorsqu'un courant traverse le fil chaud, l'électrolyte solide fond et permet à la pile de générer un courant. Ces piles présentent une très forte densité énergétique et peuvent être activés à la demande, avant de fonctionner en continu pendant quelques dizaines de secondes à quelques minutes. Puisque vouées à n'être utilisées qu'une fois, les piles thermiques sont principalement utilisées pour des applications défense, sont souvent très onéreuses et doivent être fabriquées sur mesure.

TABLE 4.1 – Caractéristiques de différents stockages d'énergie sur base des catalogues Mouser, Farnell, Murata, Maxwell et Kemet au premier semestre 2016

Type condensateur	Gamme de capacité (μF)	Gamme de tension de fonctionnement (V)	ESR (Ω)
Tantale / MnO_2	10^{-4} à 4700	2 à 125	0.05 à 25
Supercondensateurs	10^3 à 4.10^6	2.5 à 25	0.001 à 300

Nous choisissons d'embarquer seulement une supercapacité. Il faudrait, en toute rigueur et pour des raisons de sécurités, ajouter un deuxième stockage d'énergie et séparer le réseau d'alimentation de l'électronique d'une part et le réseau de mise à feu des micro-inflammateurs d'autre part. Puisque la consommation de notre électronique n'est pas vouée à être optimisée à court terme, nous préférons faire le choix de l'alimenter sur une supercapacité surdimensionnée.

Intéressons nous maintenant à l'adaptation d'énergie. Il n'existe, à ce jour, aucun lanceur $1''1''8''$ capable de recevoir des leurres intelligents. Nous n'avons donc

aucune information quant à l'énergie incidente de notre système. Faute de plus d'informations, nous faisons le choix d'intégrer un régulateur linéaire 5.5V pour alimenter l'électronique dans son ensemble, et un régulateur linéaire 3.3V pour alimenter l'émetteur/récepteur IR.

Nous faisons également le choix d'intégrer, entre la supercapacité et les micro-inflammateurs, des micro sources de courant de 2A et un circuit flash. Le circuit flash amplifie le courant émis par la supercapacité, les micro-sources de courant le régulent. Cette architecture nous permet d'initier de manière plus contrôlée - et plus reproductible - les micro-inflammateurs.

4.4.3 Autotest

Pour ce qui est de l'autotest, nous choisissons de faire, dans l'ordre, un test de la charge embarquée, un test des capteurs, un test des courants émis par les micro-sources de courant et enfin un test de ligne de l'intégralité des inflammateurs. Puisque les micro-inflammateurs, et à moindre niveau les inflammateurs plastroniques, sont sensibles au courant qui les traversent, nous proposons d'intégrer une micro-source de courant de 30mA pour le test de ligne.

4.4.4 Contrôle/commande

Il est préférable, pour le contrôle électronique de projets défense, d'utiliser des FPGA, puisqu'il suffit de démontrer la fiabilité des sous-systèmes utilisés, du code, plutôt que de la puce dans son ensemble. Nous choisissons cependant d'utiliser un microcontrôleur, débuggable, et plus adapté à une phase de développement amont. Les microcontrôleurs sont également plus adaptés à réaliser des séquences d'opérations, et intègrent souvent directement leur propre tranceiver/receiver de communication CAN.

4.5 Prototypage et validation de l'électronique

4.5.1 Prototypage virtuel

Un prototype virtuel de l'électronique a été réalisé sous Proteus afin de valider les choix de composants. Nous avons écrit les routines d'autotest, d'armement et de mise à feu sur MPLAB, l'environnement de développement de Microship, et les avons validées sur le modèle. Nous avons enfin développé une interface homme-machine sous LabView, dont un aperçu est donné en figure 4.5, permettant de contrôler manuellement toutes les séquences du PIC, que nous avons fait communiquer par bus CAN avec la simulation Proteus. Des images du reste de l'IMH sont données en annexe E.

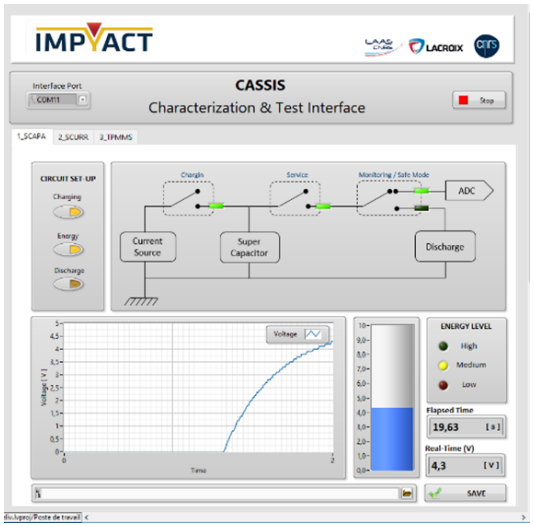


FIGURE 4.5 – IHM LabView pour le monitoring et le contrôle du bloc de gestion de l'énergie de l'électronique CASSIS - LAAS-CNRS

4.5.2 Plate-forme d'expérience

Nous avons développé une plate-forme de test, d'environ $20 \times 10cm$ (voir figure 4.6). Sa taille macroscopique et sa conception modulaire nous aura permis de tester différents composants pour chacune des fonctions et de débugger le circuit et les routines d'autotest, d'armement et de mise à feu à l'aide de l'interface LabView.

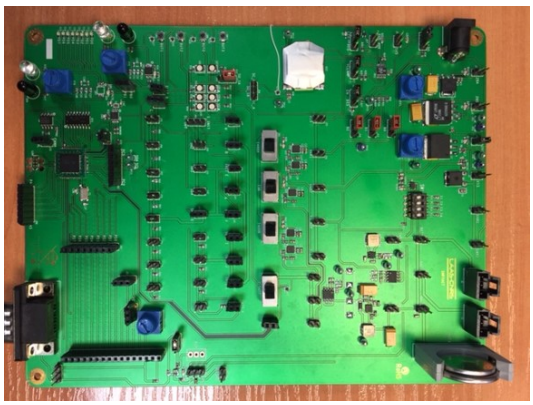


FIGURE 4.6 – Plate-forme de test électronique pour CASSIS

4.5.3 Module taille réelle

Nous avons enfin conçu puis prototypé un module taille réelle, intégrant les composants retenus sur la plateforme d'essais, et listés dans le tableau 4.2.

TABLE 4.2 –

Fonction	Sous-fonction	Composant
Armement	Capteur éjection 1	Accéléromètre InvenSense MPU-6050
	Capteur éjection 2	E/R IR Vishay VCLN4040
Gestion de l'énergie	Supercapacité	Panasonic EECS5R5V474 0.47F 5.5V
	Gestion charge	Chargeur supercapacité Linear technologies LTC4425
	Adaptation tension 1	LNO 5.5V Texas instruments LM317MDCY
	Adaptation tension 2	LNO 3.3V ST Electronics LD39100
	Adaptation courant 1	Circuit flash Texas instruments LM3410
	Adaptation courant 2	Micro sources de courant Micro-ship MIC94082YFT-TR
Intelligence	Contrôle	Microchip PIC18F4580

Le module est séparé en cinq étages :

1. un étage qui porte la supercapacité
2. un étage de contrôle
3. un étage de gestion énergétique
4. un étage qui porte le PIC et les capteurs
5. un étage d'armement et de mise à feu des micro-inflammateurs de la fonction terminale

Nous donnons une photo du module assemblé en figure 4.7.

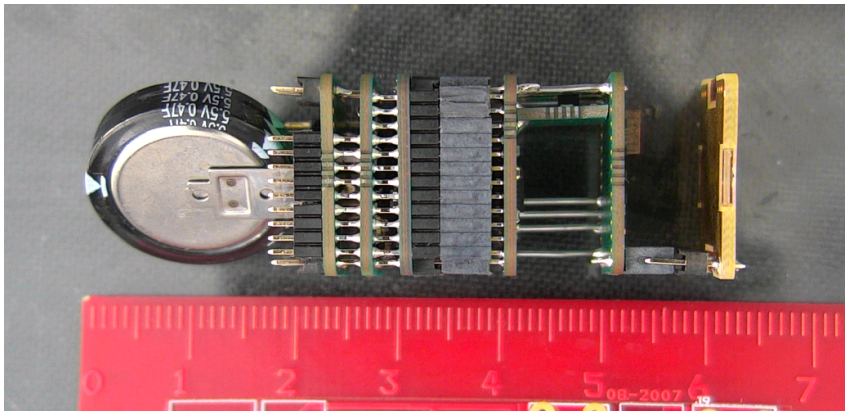


FIGURE 4.7 – Photo du module électronique taille réelle de CASSIS

Nous y avons validé l'ensemble des séquences, jusqu'à la mise à feu des micro-inflammateurs, comme représenté figure 4.8.

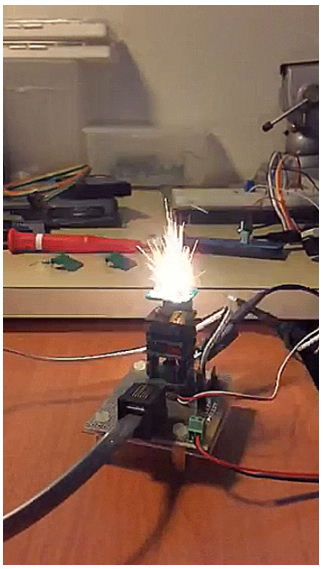


FIGURE 4.8 – Photo illustrant la mise à feu des micro-inflammateurs sur le module taille réelle

Nous y avons notamment mesuré un temps d'allumage de nos micro-inflammateurs de $2ms$. La supercapacité doit donc être chargée au moment du décollage de l'aéronef, et les micro-inflammateurs sont allumés de manière très reproductibles, bien en dessous de ce que nous avions montré comme étant négligeable (10ms) dans le chapitre 2. Nous avons mesuré une puissance d'initiation nécessaire pour allumer un micro-inflammateur autour de $30mJ$.

Nous y avons enfin mesuré un temps de charge de la supercapacité de $7s$, et un capacité à allumer plus d'une centaine de micro-inflammateurs (par extrapolation après 4 tirs) sans descendre en dessous des 2V de tension de service nécessaires à l'électronique.

4.6 Conception et développement de la sécurité mécanique

4.6.1 État de l'art des sécurités mécaniques dans les leurres

Les leurres IR existants intègrent une sécurité mécanique de bouche, qui assure que le pain s'allume pas tant que l'ensemble éjecté est dans sa douille. Cette fonction repose, dans les produits Lacroix, presque toujours sur une architecture de bore rider, dont le principe schématique est représenté en figure 4.9.

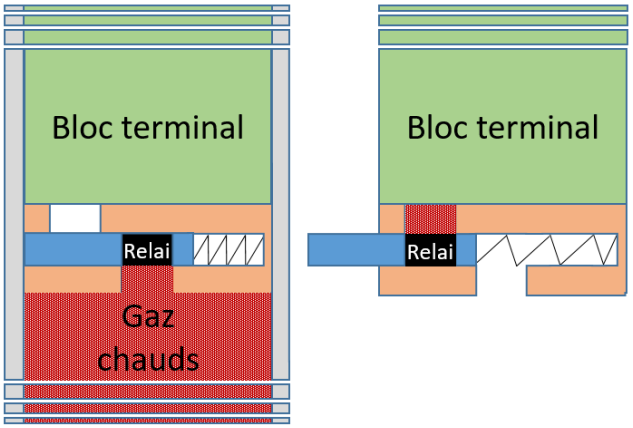


FIGURE 4.9 – Schéma de principe d'une sécurité mécanique de type bore rider

Lorsque la munition est dans sa douille, le bore rider est en position sécurisé. Les gaz d'éjection peuvent enflammer un relai pyrotechnique, mais le feu ne se propage pas à la fonction terminale. Si et seulement si la munition sort de sa douille, un ressort aligne la chaîne pyrotechnique et permet le passage du feu, du relai vers le pain IR du bloc terminal.

Dans le cadre de l'étude CASSIS, nous avons fait le choix d'initier le pain IR à l'aide de micro-inflammateurs. Les gaz de l'éjection ne sont donc pas récupérés pour initier le pain, et nous pouvons assurer une étanchéité parfaite entre les deux fonctions pyrotechniques. La sécurité mécanique interviendrait donc entre les micro-inflammateurs et le pain. Si nous avons démontré qu'il était possible d'allumer des rainures à distance dans le chapitre 2, nous avons aussi démontré que l'allumage devient de moins en moins reproductible, dès que la distance d'allumage dépasse $1mm$. Il nous faut donc concevoir une sécurité mécanique qui se lève simultanément sur 4 inflammateurs, et qui prenne moins de 1mm entre les deux. Nous pouvons donc exclure les concepts existants de bore rider, le ressort lui même faisant déjà plus d'1mm.

Il existe dans la littérature un très grand nombre de concepts de sécurités mécaniques. Nous proposons donc, dans la suite de cette section, de structurer notre recherche de solutions comme des réponses à des grandes questions, qui nous permettront de restreindre successivement le champ des possibles jusqu'à sélectionner un concept.

4.6.2 Recherche de solutions de sécurités mécaniques

Sécurité mécanique active ou passive ?

Il existe deux grands types de sécurités mécaniques. Celles qui sont contrôlées électroniquement - que nous appellerons *actives* - et celles qui ne le sont pas - que

nous appellerons *passives*. Les sécurités actives intègrent un actionneur électrique, généralement un moteur. Une fois que l'électronique détecte l'éjection, elle impose à l'actionneur de mettre en mouvement une partie de la chaîne pyrotechnique. Par exemple, l'IFI de L. Glavier (voir figure 4.2) intègre un moteur électrique qui fait tourner un PCB portant des micro-inflammateurs, ouvrant ou fermant mécaniquement le circuit électrique.

Les sécurités mécaniques passives utilisent un effet de l'éjection - l'accélération, la pression des gaz d'éjection, la disparition de la douille ... - pour mettre en mouvement une partie de la chaîne pyrotechnique ou un verrou qui retient une partie de la chaîne pyrotechnique sur ressort. Par exemple, la figure 4.10 présente une sécurité mécanique mise en mouvement par reprise de gaz et retenue par un masselotte d'accélération

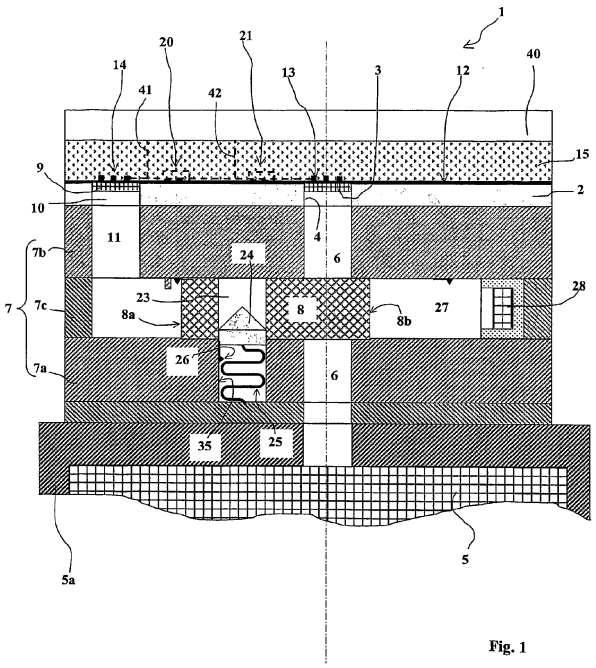


FIGURE 4.10 – Schéma de principe d'une sécurité mécanique passive - Nexter

Les sécurités actives sont la plupart du temps réversibles et peuvent parfois faire l'objet d'un autotest électronique. Elles sont cependant très complexes à intégrer et nécessitent une large réserve d'énergie, souvent supérieure à celle nécessaire pour l'initiation des inflammateurs, pour fonctionner. Les sécurités passives sont plus simples à mettre en œuvre, moins onéreuses mais non réversibles, sauf sur action d'un opérateur.

Puisque l'encombrement, notamment du stockage d'énergie, est un des enjeux

majeurs de ces travaux, nous choisissons de développer une sécurité mécanique passive.

Masque ou écartement ?

Une sécurité mécanique par masque constitue une barrière physique qui coupe la chaîne pyrotechnique, empêchant le feu de se propager. C'est la sécurité mécanique la plus classique et la plus utilisée dans les systèmes d'armes et de leurres. Les sécurités par masque sont éprouvées et documentées mais imposent des contraintes sur le placement des micro-inflammateurs. Un exemple en est donné figure 4.11.

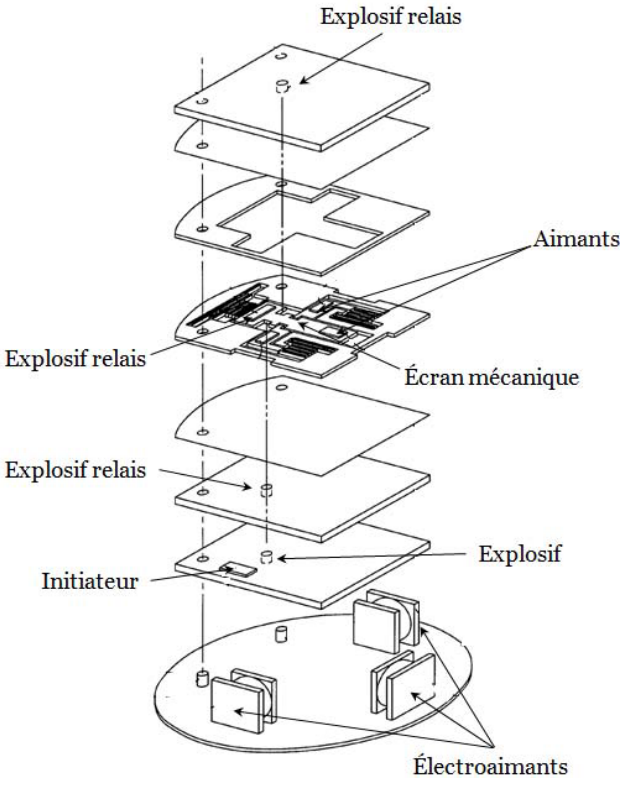


FIGURE 4.11 – Schéma de définition d'une sécurité par masque, par écran, mis en mouvement par électroaimants - US Navy [51]

Une sécurité mécanique par écartement maintient physiquement séparés deux éléments de la chaîne pyrotechnique, empêchant le feu de se propager. Un schéma de principeen est donné en figure Les sécurités par écartement sont envisageables dans le cadre de ces travaux puisque les micro-inflammateurs possèdent une distance d'initiation déterminée et relativement faible, de 1.5 à 4mm selon les compositions d'initiation considérées. Une telle sécurité imposerait de déplacer tout ou partie du sous ensemble électronique, de laisser libre un volume de débattement important,

et impliquerait des risques difficiles à évaluer : le pain peut s'effriter au cours de sa vie, se déposer sur les micro-inflammateurs et augmenter leur distance d'initiation.

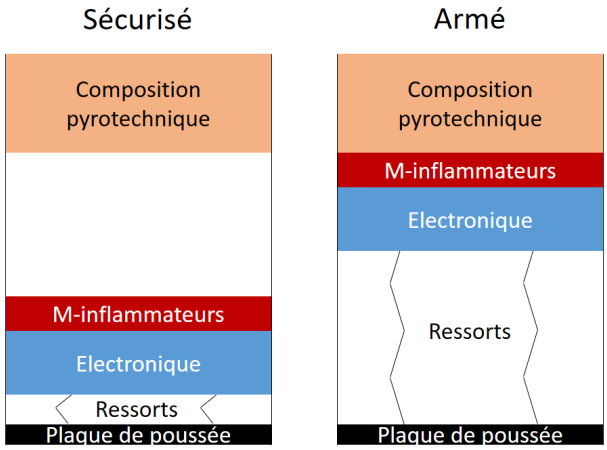


FIGURE 4.12 – Schéma de principe d'une sécurité par écartement

Nous choisirons donc de développer une sécurité par masque.

Quel actionneur ?

Aux rangs des actionneurs, nous avons déjà mentionné les ressorts, classiques dans la conception de systèmes de sécurité et d'armement. De manière plus exhaustive, nous avons à notre disposition le stockage d'énergie mécanique (ressorts, cartouches de gaz ou moteurs pyrotechniques) et la réutilisation d'énergie d'éjection (accélération, reprise de gaz, fil accroché à la douille).

Nous donnons un rapide comparatif de ces solutions dans le tableau 4.6.2.

Type actionneur	Ressort	Cartouche de gaz	Moteur pyrotechnique
Avantages	Sécurité, simplicité, durée de vie	-	Rapidité
Inconvénients	-	Étanchéité, contrôle, volume	Étanchéité, contrôle, volume

Masse d'accélération	Reprise de gaz	Fil fixé à la douille
Sécurité, durée de vie	Rapidité, durée de vie	Simplicité
Volume	Etanchéité	Fiabilité

Les systèmes à ressort présentent d'indéniables avantages et semblent simples à mettre en œuvre. Reste à trouver comment concevoir un système ressort compatible avec nos contraintes dimensionnelles.

Quel type de mouvement ?

Nous avons choisi de nous concentrer sur un système a ressort. Par nature des ressorts, nous pouvons facilement réaliser des mouvements de translation ou de rotation, selon que nous intégrions des ressorts de compression ou de torsion.

Réaliser un mouvement de translation nécessite souvent des architectures hautement hyperstatiques, par exemple un profil prismatique, ou une grande précision dans l'assemblage, par exemple un parallélisme. Qui plus est, les systèmes par translation, comme les tiroirs des leurres 1"1"8" existants imposent que le ressort se trouve dans le plan de translation, ce qui impose une distance irréductible entre le pain et les initiateurs, difficilement compatible avec notre contrainte de 1mm.

Ce n'est pas le cas pour un mouvement de rotation, le ressort de torsion peut se trouver hors du plan de rotation. Nous choisissons donc de nous concentrer sur le développement d'une sécurité mécanique par rotation, jamais développée à notre connaissance pour les leurres infrarouges.

Quel verrou ?

Nous avons fait le choix de développer une sécurité passive. Le mouvement de la sécurité mécanique doit donc être initié par la levée de verrous mécaniques. Ils sont classiquement de quatre types :

- Verrou d'accélération : l'accélération de la cartouche fait se déplacer une goupille, une masselotte ou un levier dans la direction opposée à la direction d'éjection de la cartouche.
- Verrou de rotation : même principe que le verrou d'accélération, en utilisant cette fois l'accélération angulaire de la cartouche. Dans le cadre de notre étude, la cartouche n'a pas de rotation imposée et il ne nous sera pas possible d'utiliser ces verrous.
- Bore Riders : une partie mécanique de la munition est poussée par un ressort contre la douille, de manière à ce qu'elle ne bouge que lorsque la munition aura été éjectée.
- Récupération de gaz : une partie des gaz d'éjection est récupérée pour mettre en mouvement une pièce mécanique.

Les verrous sont en général choisis sur la base des contraintes d'intégration ou de fiabilité du système. Après une série de drafts et de concepts, nous avons retenu le concept détaillé en section 4.6.3

4.6.3 Concept retenu

Nous proposons ici un concept de sécurité mécanique passive, mise en mouvement par un ressort de torsion, et verouillée par la présence de la douille. En particulier, nous proposons de faire tourner le bloc électronique et sécurités - et potentiellement le bloc éjection - dans son ensemble, comme représenté schématiquement figure 4.13.

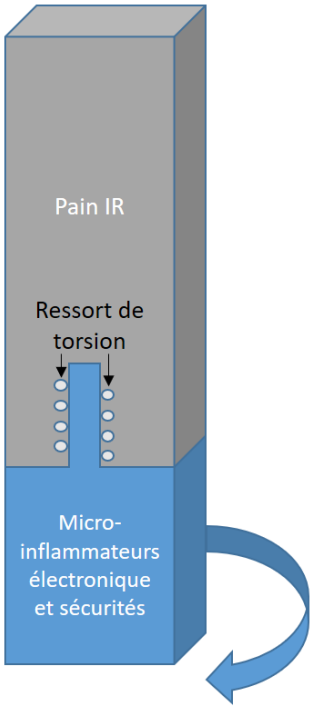


FIGURE 4.13 – Schéma de principe de notre concept de sécurité mécanique pour CASSIS

Nous nous proposons d'intégrer le ressort de torsion à l'intérieur du pain infrarouge pour limiter la perte de place. Sachant que les douilles 1"1"8" sont carrées, tant que la munition sera dans le tube, l'ensemble électronique ne pourra pas tourner par rapport au pain. Dès que la munition aura été éjectée de son tube, le ressort de torsion entrainera en rotation l'ensemble du bloc électronique.

4.6.4 Prototypage et validation expérimentale

Nous avons proposé une première définition, dans laquelle l'insert - l'alésage - est formé d'une seule pièce fendue pour bloquer en rotation le premier bras du ressort. Le deuxième bras est bloqué dans l'axe. Un anneau d'arrêt bloque la translation de l'axe dans l'insert. Le ressort a lui une forme complexe, que nous lui imposons par déformation manuelle. Le tout est représenté en figure 4.14. Une vis et un profil dans le pain assurent l'arrêt en rotation.

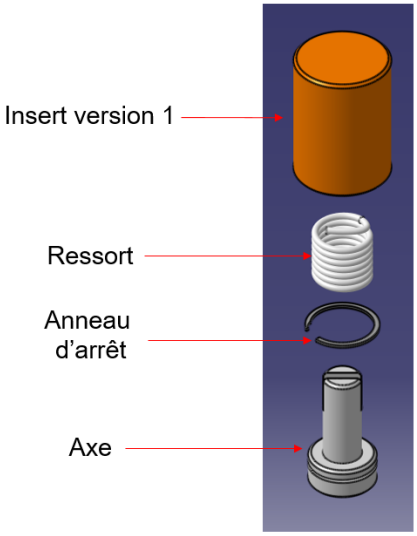


FIGURE 4.14 – Schéma éclaté de notre concept de sécurité mécanique pour CASSIS, version 1

Nous l'avons monté dans un pain imprimé 3D et avons mesuré un temps d'ouverture de l'ordre de 40ms à l'aide d'une centrale inertielle MPU-6050 montée sur une carte indépendante. Nous avons réalisé les *tirs* sur une potence (voir figure 4.15) permettant de sortir de manière reproductible - si ce n'est plus lentement qu'un tir pyrotechnique - la munition de sa douille, par action d'un contrepoids.

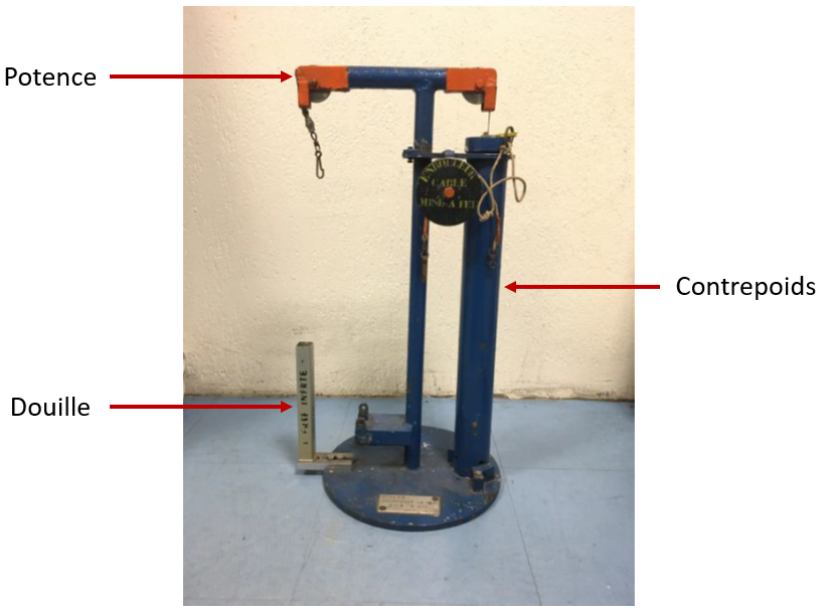


FIGURE 4.15 – Potence de tir

Nous avions prédimensionné le ressort pour que la rotation ai lieu en en 5ms. La différence est attribuable à la déformation manuelle du ressort, peu adaptée, à la précision relative ($\pm 0.1mm$) des pièces métalliques et à l'absence de graisse de lubrification.

Nous sommes allés jusqu'à comprimer un pain inerte autour de l'insert, pour nous rendre compte que malgré son épaisseur importante, le fait qu'il soit fendu le fragilisait dramatiquement. Nous avons en conséquence simulé sous COMSOL la déformation de l'insert (voir figure 4.16), et avons validé que les mesures de déformations correspondaient à la simulation, aux tolérances près. Les conditions initiales et limites sont données en annexe D.

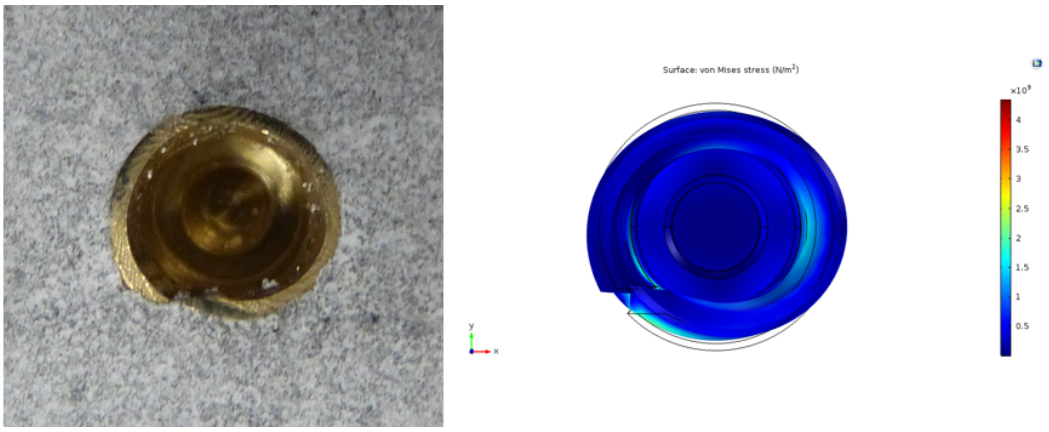


FIGURE 4.16 – Résultats expérimentaux (gauche) et de simulation (droite) d'une compression de l'insert, version 1

Nous avons donc proposé un second design et validé la compression d'un pain autour du second design. Le concept est présenté en figure 4.18, et les résultats de la compression en figure 4.17.

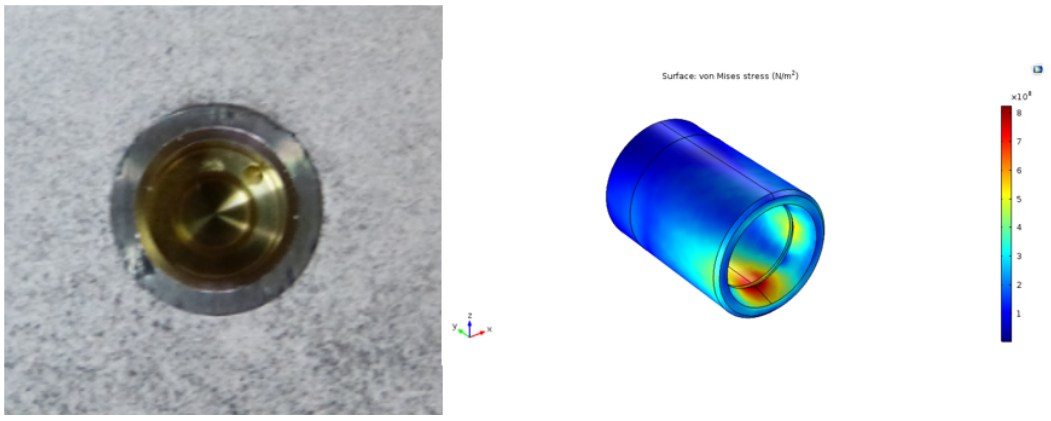


FIGURE 4.17 – Résultats expérimentaux (gauche) et de simulation (droite) d'une compression de l'insert, version 2

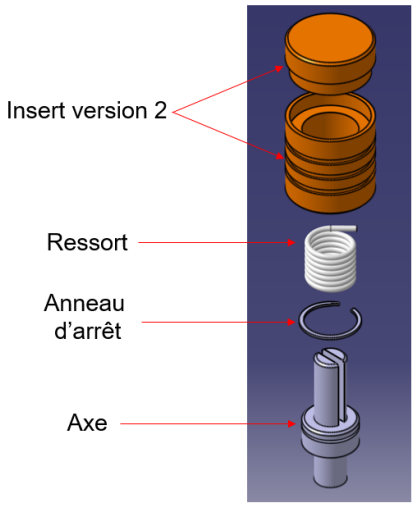


FIGURE 4.18 – Schéma éclaté de notre concept de sécurité mécanique pour CASSIS, version 2

Nous aurions voulu valider le temps d'ouverture du deuxième design, malheureusement la composition inerte, à base de téflon, s'est légèrement rétractée au bout de quelques mois, permettant la rotation de l'insert par rapport au pain et rendant la sécurité inopérante.

4.7 Conclusion

Dans ce quatrième chapitre, nous avons détaillé notre conception d'un bloc électronique et sécurités. Nous avons exploré l'état de l'art des systèmes électro-pyrotechniques intelligents, et avons conclu que la plupart d'entre eux, étant destinés à des applications missiles respectaient le STANAG 4187. Nous avons donc proposé un concept de bloc électronique répondant au STANAG 4187, et une sécurité mécanique innovante.

Notre bloc électronique intègre un accéléromètre et un émetteur/récepteur IR, dont nous avons validé sur des essais en laboratoire la capacité à détecter l'éjection. Il intègre une supercapacité, et un bloc d'adaptation d'énergie intégrant un circuit flash et des micro-sources de courant, dont nous avons démontré la capacité à allumer de manière très reproductible un grand nombre de micro-inflammateurs. Il intègre un microcontrôleur capable d'effectuer un autotest, de commander les séquences de vie de la munition, et de communiquer par protocole CAN avec un lanceur.

Nous avons conçu et prototypé une sécurité mécanique innovante, qui entraîne tout le bloc électronique et sécurités en rotation. Nous avons démontré sa capacité

à désaxer/réaxer la chaîne pyrotechnique en moins de 40ms. Il peut encore être amélioré, en utilisant des ressorts faits sur mesure, et en modifiant la surface de l'insert pour éviter sa rotation dans le pain.

Nous arrivons enfin à notre cinquième et ultime chapitre, dans lequel nous proposons de revenir de manière critique sur nos trois blocs technologiques, en proposant des perspectives d'amélioration et de déclinaison des outils que nous avons proposés, avant de parler de leur intégration dans un démonstrateur complet et fonctionnel.

Chapitre 5

Perspectives et intégration

Sommaire

5.1 Introduction 136

5.2 Perspectives 136

5.2.1 Bloc fonction terminale 136

5.2.2 Bloc éjection 139

5.2.3 Bloc électronique et sécurités 141

5.3 Intégration 142

5.4 Conclusion 146

> Il semble que la perfection soit atteinte, non quand il n'y a plus rien à ajouter, mais quand il n'y a plus rien à retrancher.
>
> *Antoine de Saint-Exupéry, Terre des Hommes, 1939*

5.1 Introduction

Ce cinquième et dernier chapitre s'apparente à une discussion. Dans une première section, intitulée perspectives, nous rappelons les résultats obtenus lors du développement des trois blocs technologiques principaux du leurre intelligent CASSIS. Nous confrontons ces résultats aux exigences du cahier des charges que nous nous étions donné chapitre 1, puis proposons pour chaque bloc des perspectives d'amélioration et d'adaptation. Dans une seconde partie intitulée intégration, nous discutons de manière critique de nos choix technologiques au regard de leur intégration dans un démonstrateur de leurre 1"1"8" intelligent complet.

Tout au long de ce chapitre, nous mettons en lumière les apports de ces travaux au développement de leurres et d'objets électro-pyrotechniques intelligents.

5.2 Perspectives

5.2.1 Bloc fonction terminale

L'objet du bloc fonction terminale était de permettre de contrôler la combustion - et à fortiori le signal infrarouge - d'un pain solide de compositions pyrotechniques. Le cahier des charges nous guidait vers l'utilisation de 4 micro-inflammateurs LAAS-CNRS. Nous avons proposé deux solutions technologiques qui semblaient permettre de contrôler la combustion d'un pain solide à l'aide d'un système d'initiation multipoint, la compartimentation et la structuration.

S'il est aisé de se représenter l'effet d'une combustion compartimentée, pour laquelle les effets devraient se cumuler, il est bien plus difficile de se représenter les effets d'une combustion d'un pain structuré. Avant d'aller plus loin, nous avons développé un code de régression de surface basé sur la méthode dite des courbes de niveau, des level-set, pour simuler des fronts de combustion 3D sur des pains multi-composition, partiellement inertés et initiés séquentiellement en plusieurs points. En exploitant le code, nous avons vu qu'imposer un délai d'initiation entre les initiateurs permettrait de piloter le front de montée sans modifier le profil du signal infrarouge d'un pain structuré, et qu'effectuer un allumage partiel permettrait de modifier substantiellement tous les paramètres du signal, front de montée, niveau maximum et durée.

Nous avons donc validé expérimentalement que nous étions capables d'allumer des compositions infrarouges avec des micro-inflammateurs, que notre plus grand ennemi était la génération violente et incontrôlée de gaz chauds, et enfin qu'en utilisant des surfaces sacrificielles nous étions capables de piloter le signal infrarouge de pains IR, dans les ordres de grandeur que nous avions prédimensionné. Nous avons donc réussi, à l'aide d'un étage de micro-initiation commandé électroniquement à contrôler le signal infrarouge d'un pain infrarouge, avons répondu au cahier des

charges, et avons démontré, pour la première fois qu'il était possible de contrôler un effet de combustion solide à l'aide d'un système d'initiation multipoint.

Le code que nous avons développé constitue un formidable outil de simulation. Il est capable de simuler la combustion de tout pain solide, pour des applications de propulsion, de génération de gaz, d'émission de rayonnement visible ou infrarouge. Il suffit de mesurer expérimentalement la vitesse de combustion des compositions mises en jeu, et de dessiner le pain sous PTC Creo. Son utilisation est simple et adaptée à être intégrée avec fluidité dans un process de conception. En particulier, il sera d'une aide précieuse pour la définition des séquences d'initiation de leurres intelligents, si les compositions ou le placement des rainures venait à évoluer à cause de contraintes extérieures, ou pour d'autres formats de pain. Vu ses capacités, NINA excellera particulièrement lors de la conception de pains fortement structurés, et pourrait par exemple être utilisé en parallèle de l'émergence de technologies d'impression 3D de pains pyrotechniques solides.

NINA est avant tout et toute chose un solveur mathématique. Il n'intègre qu'un modèle physique simple, la régression perpendiculairement à sa surface d'un solide en combustion. Sa première perspective d'amélioration serait donc de le coupler avec le système d'équation défini dans le chapitre 2. NINA définirait Ψ, la fonction de forme à chaque instant et Ψ dépendrait de la pression dans une chambre de confinement ou de combustion. Il serait également possible de rendre NINA plus physique en prenant en compte une combustion érosive, matérialisée par une vitesse de combustion anisotrope, ou en considérant une *inertie chimique de surface*, sur la même idée qu'une condition d'inertage, qui conduirait à un délai lors du passage du feu d'une composition à une autre, ou à un allumage progressif d'une surface à mesure que les gaz chauds se répandent dans la chambre de confinement.

A plus long terme, il serait possible de coupler NINA à un solveur CFD (Computational Fluid Dynamics) pour modéliser la progression des gaz dans la chambre de combustion ou la forme du nuage de gaz qui suit le leurre. Il serait même possible d'imaginer un superviseur d'optimisation topologique qui serait capable de trouver une forme de pain qui renverrait un signal donné lors de sa combustion.

Malheureusement pour ces deux perspectives d'amélioration, elles nécessiteraient des puissances de calcul déraisonnables, le temps de calcul actuel d'une simulation NINA étant de l'ordre de l'heure. Il faudrait donc optimiser le code, en réécrivant la boucle principale dans un langage plus adapté que le Matlab, comme le C, ou le CUDA.

Dans tous les cas, le code que nous avons développé se pose en amélioration de Vulcad, un code existant dont les preuves ne sont plus à faire. S'il n'y a pas grand chose à redire à la méthode, les résultats de NINA restent critiquables tant qu'une

phase de validation expérimentale de plus grande ampleur n'a pas été conduite. Il semble donc de bon ton que d'exhorter à son utilisation en parallèle de phases de conception d'objets pyrotechniques, jusqu'à ce sa validité et sa maturité aient été démontrées.

Pour ce qui est des solutions expérimentales, nous avons démontré que la compartimentation et la structuration permettaient de maîtriser suffisamment les gaz de combustion pour contrôler le signal infrarouge, en utilisant des surfaces sacrificielles. Malheureusement, ces solutions restent relativement complexes à industrialiser en l'état. En particulier, il faudrait adapter l'interface mécanique entre le séparateur et le bloc électronique et sécurité pour faciliter l'assemblage et assurer une plus grande fiabilité de l'étanchéité entre compartiments. Une représentation des modifications envisagées est donnée en figure 5.1

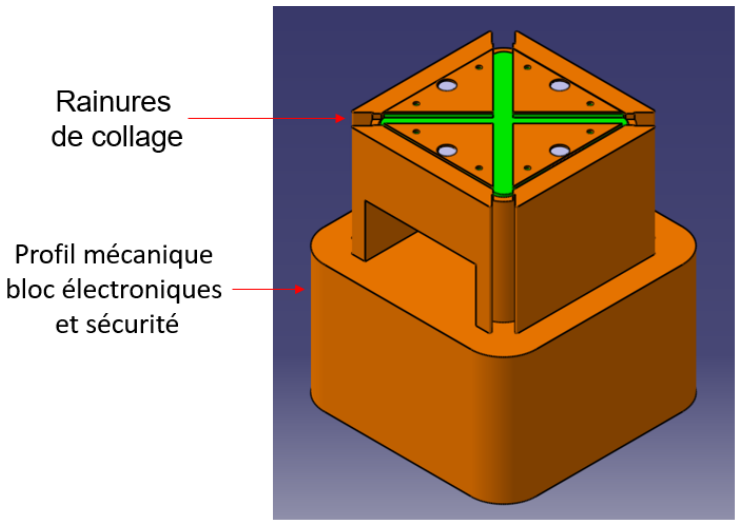


FIGURE 5.1 – Exemple de possible profil de collage plus fiable pour leurre IR intelligent compartimenté

Maintenant que nous avons démontré notre capacité à faire du contrôle sur un pain 1"1"8", il serait possible d'adapter nos solutions pour d'autres leurres, d'autres formats de pain. En particulier, il serait possible d'imaginer embarquer un bien plus grand nombre de rainures et d'initiateurs, comme figure 5.2 sur un pain cylindrique structuré de diamètre 40mm.

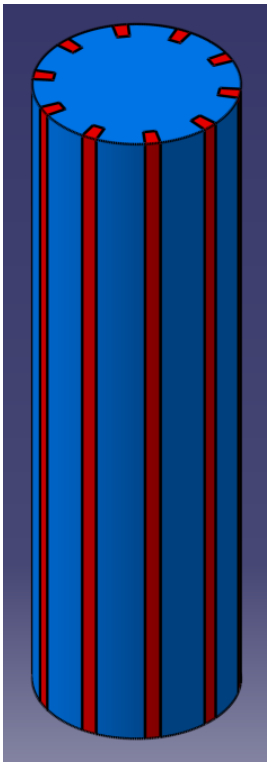


FIGURE 5.2 – Exemple de possible géométrie de pain structuré, diamètre 40mm

5.2.2 Bloc éjection

L'objet du bloc d'éjection était d'atteindre trois vitesses d'éjection différentes. Nous avons proposé deux solutions technologiques basées sur l'intégration de trois charges d'éjections indépendantes initiées soit à l'aide de filaments plastroniques, soit de micro-inflammateurs.

Nous avons implémenté un modèle de balistique intérieure à paramètres globaux et un superviseur d'optimisation qui nous ont permis d'extraire des règles de conception d'un bloc d'éjection pour leurre 1"1"8", indépendamment de l'incertitude expérimentale sur les paramètres de la poudre. Nous avons vu que, pour limiter la charge de poudre à embarquer, et donc la taille et le coût du bloc éjection, il valait mieux limiter le volume des chambres de combustion et de détente, ce qui nous laisse plus de place pour la charge utile.

Nous avons montré qu'entre les essais d'impulseurs triples en bombe manométrique et les essais de tir semi-dynamique, le code s'est avéré suffisamment précis pour être considéré prédictif.

L'utilisation d'une étude de RSM pour définir l'influence des paramètres ne se limite pas a des applications de miniaturisation. Par exemple, dans le cas de

CASSIS, nous embarquons de l'électronique sur étagère, dont certains composants peuvent ne pas être prévus pour encaisser une accélération de plusieurs milliers de G. Il serait alors possible de se demander comment atteindre les mêmes vitesses d'éjection, tout en réduisant le pic d'accélération. Il faut donc trouver un facteur dont l'influence sur l'accélération est très élevée, et dont l'influence sur la vitesse est très faible, ce qui est faisable en conduisant une RSM avec pour objectif la vitesse, une RSM avec pour objectif l'accélération, et en calculant les rapports des coefficients. Nous avons conduit cette étude et avons trouvé que le volume de la chambre de détente est le meilleur facteur sur lequel jouer, comme le démontre le tableau 5.1.

TABLE 5.1 – Vitesses et accélérations simulées sous URUK pour différentes valeur de volume chambre de détente de CASSIS

Volume chambre de détente cm^3	Vitesse d'éjection $(m.s^{-1})$	Accélération max $(m.s^{-2})$
4	44.19	14131
8	42.68	10337
12	41.35	8469

Il faudra donc trouver un compromis entre résistance de l'électronique et volume disponible à la charge utile. La méthode peut être étendue à d'autres problèmes, et pourra donner réponse à nombre de questions du concepteur.

Pour ce qui est des solutions expérimentales, nous avons prédimensionné un bloc d'éjection triple, dont les trois chambres de combustion sont fermées par un disque de métal et un opercule thermoscellé. Nous avons validé que les filaments plastroniques étaient capables d'allumer de manière reproductible des compositions d'initiation comme la ZPP ou les nanothermites Al/CuO. Nous avons en revanche observé que les micro-inflammateurs LAAS-CNRS n'étaient pas assez énergétiques pour allumer directement de la BNP, qu'ils ne permettaient pas de se passer d'une composition d'initiation. Nous avons validé, en bombe manométrique et dans des conditions de pressions durcies, que le disque de métal et l'opercule thermoscellé garantissaient que le feu ne se propage pas d'une chambre à l'autre. Nous avons enfin validé sur des essais représentatifs que notre concept de bloc d'éjection permettait de contrôler la vitesse d'éjection d'un leurre infrarouge. Nos deux concepts d'initiation sont a priori viables. Le choix entre les deux va venir de considérations d'intégration, que nous explorerons dans la section suivante.

Nous avons évalué des compositions de remplacement pour la BNP et la ZPP. En particulier, nous avons évalué la capacité de la composition COLIBRI a générer des gaz. Elle est plus gazogène et plus sensible que la BNP. Elle est donc adaptée à être directement initiée par des micro-inflammateurs sur puce, mais risque de poser

des problèmes de sécurité, notamment à cause du processus de thermoscellage, la température d'auto-inflammation de la COLIBRI se situant autour de 300°C. Nous avons également vu que nous pouvions remplacer la ZPP par des nanothermites, sans gain de performances, puisque la conductivité thermique des nanothermites compense leur plus faible température d'auto-inflammation et leur plus forte réactivité. En revanche, nous avons observé qu'une dose modeste de nanothermites, une dizaine de milligrammes, générait un bruit important, comparable à celui d'un pétard. Il pourrait donc être intéressant, pour des applications de génération de bruit et d'entraînement de caractériser précisément l'onde de pression générée. Il deviendrait possible de très largement réduire la taille des systèmes d'entraînement, ou d'augmenter sensiblement le nombre de coups dont ils sont capables.

5.2.3 Bloc électronique et sécurités

L'objet du bloc électronique et sécurités était plus complexe que celui des blocs précédent. Il fallait répondre au STANAG 4187 et réaliser un ensemble de fonctions dans un volume aussi réduit que possible.

Après plusieurs prototypes de bloc électronique et de sécurité mécanique, nous avons réussi à développer une électronique de 6x2x2cm, permettant de réaliser un autotest - et notamment un test de ligne des inflammateurs embarqués -, de communiquer avec le lanceur, d'adresser les inflammateurs embarqués, de fermer des switch de sécurité lorsque les capteurs détectent l'éjection et de mettre à feu les micro-inflammateurs à l'aide de l'énergie embarquée.

Nous avons réussi à intégrer toutes les fonctions que notre cahier des charges nous imposait, dans un volume légèrement supérieur à celui initialement prévu. Fort heureusement, nous pouvons réduire la taille des pins de connections, laissés volontairement longs sur nos prototypes pour des questions que débuggage (voir figure 4.7).

Plus généralement, il serait possible, dans de futurs travaux, de privilégier la compacité et la simplicité à l'innovation et la performance. Tout d'abord, l'étage d'adaptation d'énergie constitué de micro-sources de courant et d'un circuit flash permet une grande reproductibilité dans l'allumage des micro-inflammateurs, mais consomme beaucoup. En chiffres, nous n'avons pas réussi à allumer un micro-inflammateur avec moins de 3mJ, là où Guillaume Taton, avec une source de courant continue de plus grande résistance avait réussi à faire descendre l'énergie d'initiation jusqu'à 80 μJ [52]. Il serait donc possible d'imaginer réduire l'énergie d'initiation et la taille du bloc électronique en utilisant une pompe de charge et des capacités tantale haute tension déchargées directement dans les micro-inflammateurs. En toute rigueur, une partie de la différence d'énergie entre les deux système vient également du fait que les puces de G. TAton utilisaient une membrane kapton suspendue, moins conductrice thermiquement.

Il serait également possible de rationaliser le nombre de sécurités, un leurre n'ayant pas les mêmes besoins qu'un missile. Tout d'abord, nous ne saurions que trop conseiller l'abandon de la sécurité mécanique, les micro-inflammateurs semblant parfaitement stables, sans aucun cas de départ accidentel observé à ce jour en laboratoire. La sécurité mécanique constitue un point de fragilité de l'étanchéité entre éjection et fonction terminale, risque de complexifier l'assemblage et de poser des problèmes de fiabilité.

Notre travail sur la sécurité mécanique n'est pas totalement perdu, puisque nous avons développé un mécanisme miniature et compact, inédit à notre connaissance, où un ressort de torsion, placé entre un arbre et un alésage, permet de faire tourner l'un par rapport à l'autre, tandis qu'un micro anneau d'arrêt maintient le tout en position. Nous avons également démontré qu'il était possible de comprimer un pain autour d'un insert sans risquer - a priori - de fragilité mécanique, et avons démontré que des simulations de déformation par éléments finis rendaient quantitativement compte de la réalité, malgré la nature pulvérulente de la composition. Il serait donc possible d'envisager designer des canes centrales d'inflammation ou de détonation autour desquelles comprimer des pains pyrotechniques solides.

Plutôt que d'embarquer deux capteurs d'éjection, un seul doublé d'une détection de la rupture de communication avec le lanceur devrait suffire. Les deux capteurs que nous avons testé sont compétitifs. La centrale inertielle est plus volumineuse, mais elle peut être intégrée n'importe où, là où l'émetteur/récepteur IR est plus petit mais doit être placé face à la douille. Une centrale inertielle est un outil très puissant, qui permettrait de reconstituer l'intégralité du vol de la munition après récupération de l'ensemble éjecté. Il serait donc possible d'envisager utiliser un outil moins puissant, tel qu'un accéléromètre 1 axe type accéléromètre de système airbag, pour la sécurité embarquée, et de développer un module miniature construit autour d'une centrale inertielle pour caractériser l'éjection et le vol de n'importe quelle munition.

5.3 Intégration

Nous avons posé les résultats auxquels nous sommes arrivés pour les trois blocs technologiques constitutifs de CASSIS, et leurs perspectives d'amélioration individuelles. Reste à s'occuper de leur intégration en un démonstrateur complet, et donc à s'occuper de leurs interfaces.

En ce qui concerne les interfaces mécaniques, les démonstrateurs de tous nos blocs ont été conçus pour rentrer dans une section de douille 1"1"8", soit dans un carré d'un peu moins de 22.75mm de côté. Nous avons démontré que nous étions capables de rentrer toutes nos fonctions dans cette douille, éjection, sécurité mécanique, électronique et fonction terminale, au risque d'empiéter un peu sur le

pain tant que l'électronique n'a pas été perfectionnée. Un schéma CATIA, figure 5.3 permet de se rendre compte que même en l'état nous serions capables de monter l'intégralité de nos blocs en un tout cohérent. Le pain fait ici 100mm de long.

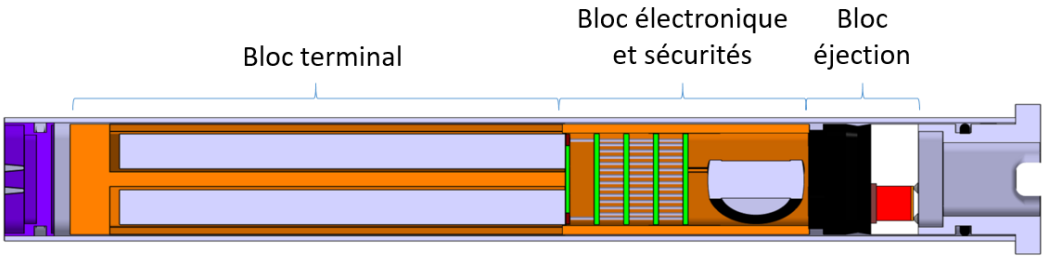


FIGURE 5.3 – Section d'un démonstrateur CASSIS intégrant les trois blocs fontionnels

En revanche, la figure 5.3 ne tient pas compte des interfaces électriques, de puissance et de communication. Dans une optique de fiabilisation, de simplification et de miniaturisation des interfaces, et donc des systèmes leurres en général, nous proposons de réfléchir aux aux moyens de faire communiquer le lanceur et la munition.

Jusqu'ici, les leurres les plus simples utilisaient deux plots de cuivre, souvent matérialisés par le corps et le fond du squib, pour permettre à un courant de passer jusqu'à l'unique fil chaud que contient la munition. Certains leurres, plus complexes, emploient parfois un inflammateur déporté, loin du fond de la douille. Un fil électrique, soudé sur le fond de la douille et remontant le long de la munition permet de lui transmettre de l'énergie. Les leurres les plus complexes, comme SEALIR, s'alignent sur les missiles et utilisent des flex pour connecter lanceur et électronique embarquée. Les flex sont des fils plats qui peuvent être laminés ou soudés sur des PCBs (voir figure 5.4). Ils sont onéreux et nécessitent souvent au moins une étape de soudure, soit manuelle, peu fiable, soit en four, peu solide. Dans l'absolu, pour des expériences préliminaires, nous devrions être capables de passer des fils ou des flex depuis le système lanceur, autour du bloc éjection, jusqu'à l'électronique et les puces. Cependant, cette solution n'est ni fiable, ni simple à mettre en œuvre.

FIGURE 5.4 – Photo d'un flex SEALIR

Nos PCBs et nos puces forment un bloc solidaire. Le réel problème est donc de trouver un moyen fiable de connecter l'électronique au lanceur au travers du bloc

d'éjection. En anticipation de ce problème, nous avions choisi au chapitre 2 de développer la technologie plastronique pour une de nos solutions de bloc d'éjection. Nos deux solutions d'impulseurs utilisent un bloc plastique pour contenir les charges de poudres. Nous proposons donc dans les deux cas de métalliser les surfaces extérieures du bloc d'éjection pour faire communiquer de manière fiable et compacte le lanceur, l'électronique et l'éjection.

Nos choix technologiques étant faits, nous proposons de nous pencher sur la définition préliminaire des interfaces électriques de CASSIS. Pour ce faire, nous devons répondre à une questions que nous avons consciencieusement laissé de côté : Faut-il stériliser le bloc d'éjection après utilisation, initier les charges imbrûlées qui n'ont pas servi à l'éjection ?

Nous avons fait l'intégralité de notre conception sans nous en soucier. En l'état, CASSIS embarque son bloc éjection, initié à l'aide de l'énergie lanceur, puis retombe avec des compositions pyrotechniques imbrûlées. Ses interfaces sont représentées figure 5.5. En toute rigueur, ces compositions peuvent causer des dégâts ou être réutilisées à des fins malveillantes, il faudrait donc si possible les stériliser. Dans cette optique, nous émettons un certain nombre d'idées.

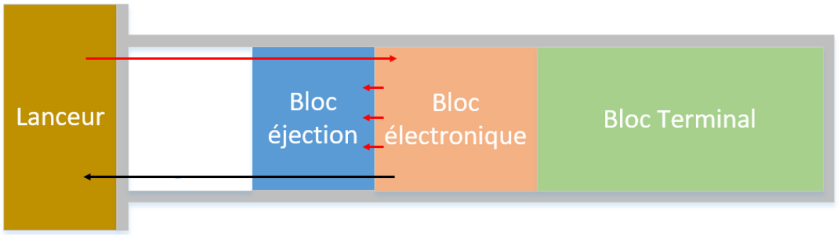


FIGURE 5.5 – Interfaces électriques des CASSIS

Première idée : il serait possible de conserver les mêmes interfaces électriques, mais de fixer le bloc d'éjection au fond de la douille. Il serait alors à la charge d'un opérateur de récupérer et de détruire les charges restantes, ce qui pourrait être fortement contraignant en opération.

Deuxième idée : il serait possible de conserver les mêmes interfaces électriques, mais d'utiliser un bloc d'éjection structuré. Un retard reliant les trois chambres permettrait de mettre feu passivement aux chambres non utiles. Cependant, nous l'avons vu partie 2, cette solution est onéreuse et - a priori - difficile à fiabiliser.

Troisième idée : il serait possible de conserver les mêmes interfaces électriques, et d'embarquer suffisamment d'énergie pour allumer 4 micro-inflammateurs de fonction terminale, et deux micro-inflammateurs d'éjection. Il serait alors possible d'ini-

tier les chambres non utiles après que la fonction terminale ai fonctionné correctement. Cette solution a l'avantage de donner la possibilité d'offrir un mode de fonctionnement alternatif aux munitions : la vitesse d'éjection et le signal infrarouge pourraient être programmés au sol, puis s'activer sur un échelon de puissance. De telles munitions pourraient être utilisées sur des lanceurs communicants, nouvelle génération, et sur des lanceurs plus anciens, qui produisent un échelon de courant pour activer les squibs. Cependant, allumer les chambres restantes en vol pourrait projeter ce qui reste du bloc électronique vers l'aéronef.

Quatrième idée : il serait possible de conserver les mêmes interfaces électriques, de fixer le bloc d'éjection au fond de la douille et d'y intégrer, à l'aide de la plastronique des composants électroniques. Il serait alors possible, sur présence du bloc électronique, d'adresser les trois initiateurs d'éjection, puis lorsque l'électronique est éjectée, de renvoyer un deuxième échelon de courant pour allumer les chambres restantes. Nous donnons un schéma électrique de principe en figure 5.6. Il serait possible de rajouter un petit stockage d'énergie et un compteur pour plus de sécurité. Nous préférons choisir pour cette solution les inflammateurs plastroniques, pour faire face aux effets de courants induits sans éléments de sécurité ajoutés.

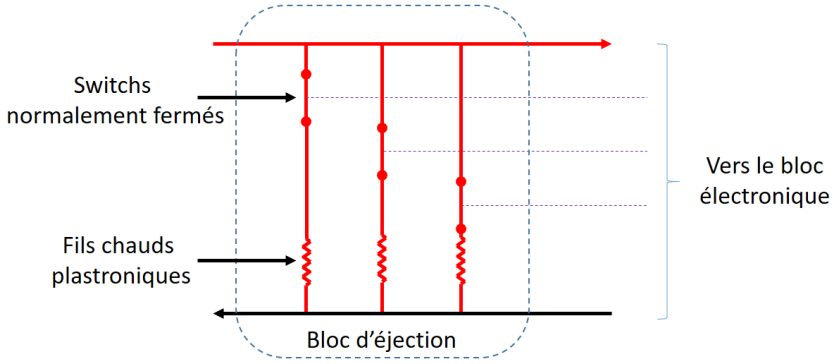


FIGURE 5.6 – Proposition de bloc éjection plastronique stérilisable pour CASSIS

Cinquième idée : il serait possible de changer les interfaces électriques et de fixer le bloc d'éjection au fond de la douille. Il suffit de rajouter 4 interfaces sur le fond de la douille pour que le système lanceur stérilise, voire pilote, l'éjection.

Le choix se porte donc sur la complexification des interfaces au delà du cahier des charges défini au chapitre 1, des risques de sécurité ou des contraintes pour le personnel d'armes.

Nous conseillerions à priori la solution tout micro-inflammateurs embarqués - à condition de démontrer son innocuité sur des études de balistique extérieure -, qui

peut être mise en œuvre en opérationnel à court terme puisque compatibles avec les lanceurs existants, et la solution de modification des interfaces, qui pourra être mise en œuvre à plus long terme, sur modifications majeures des systèmes lanceurs.

5.4 Conclusion

Dans ce cinquième chapitre, nous avons fait le bilan de nos résultats sur nos trois blocs technologiques. Partant de l'état actuel de développement de chacun d'entre eux, nous avons proposé des voies d'amélioration et des perspectives possibles.

There is no real ending. It's just the place where you stop the story.

Frank Herbert, dans une interview donnée au California State College, 1969

Conclusion générale

Ce manuscrit de thèse et les travaux qu'il décrit ont été réalisés dans le cadre d'IMPYACT, un laboratoire commun créé en partenariat entre Lacroix-défense et le LAAS-CNRS. Il s'inscrit d'une part dans une démarche de miniaturisation et de fonctionnalisation des systèmes pyrotechniques développés à Lacroix, les leurres, les artifices de divertissement et les pyromécanismes. Les systèmes pyrotechniques tendent à intégrer de l'intelligence, pour s'adapter à la demande et à l'évolution du marché, ou pour s'adapter aux évolutions de la course aux armements. Cependant, il est complexe et coûteux d'intégrer de l'intelligence dans des systèmes miniatures soumis à de fortes exigences. C'est pourquoi ce travail s'inscrit d'autre part dans la continuité des travaux de recherche en micro-pyrotechnie, notamment en thermites nano-structurées, conduits depuis 1995 et la thèse de Carole Rossi au LAAS-CNRS. Les travaux de l'équipe NEO du LAAS ont conduit au développement de micro-inflammateurs manufacturés par des processus de fabrication collective, et au développement de systèmes électro-pyrotechniques sécurisés miniatures.

Lacroix développe des systèmes pyrotechniques passifs ou embarquant une électronique simple, ne permettant pas de contrôler les effets terminaux d'une munition. Le LAAS a développé des objets sécurisé et pouvant être mis en réseau, mais rien qui ne permettent de contrôler activement un effet pyrotechnique. Il se sont donc proposés, au travers de cette thèse de mettre en commun leurs compétences pour développer un nouveau système d'initiation pyrotechnique, sécurisé, autonome, intelligent et intégrant des nanomatériaux énergétiques.

Puisqu'il n'est pas possible de créer un système d'initiation suffisamment générique pour contrôler n'importe quel type d'objet pyrotechnique miniature, nous avons décidé de nous restreindre à la conception et la validation d'un leurre infrarouge 1"1"8" intelligent. Les missiles guidés infrarouges suivent le rayonnement émis par un avion, un hélicoptère ou plus généralement un véhicule à moteur pour le toucher. Jusqu'ici, il était possible d'éjecter des leurres infrarouges qui, en brûlant, reproduisaient la signature émise par le véhicule cible, pour séduire la menace et la détourner de son objectif. La multiplication des types de menaces, et l'amélioration de leurs systèmes de contre-contre-mesures implique de développer de nouveaux leurres IR aux effets contrôlables.

L'apport de ces travaux de thèse aura été de concevoir et évaluer des solutions permettant de contrôler électroniquement et de manière sécurisée la vitesse d'éjection et le signal infrarouge émis par un leurre infrarouge 1"1"8", suffisamment génériques pour être adaptées à d'autres types d'objets pyrotechniques.

Dans le premier d'entre eux, nous avons détaillé l'historique de développement des systèmes missiles et des systèmes leurres et avons mis en lumière la nécessité

de développer des leurres intelligents, enjeu majeur pour l'autoprotection du futur. Nous avons fait l'état de l'art des leurres IR passifs et des rares leurres intégrant un bloc électronique pour nous rendre compte qu'aucun d'entre eux ne peux directement être adapté pour faire du contrôle de fonction pyrotechnique. Nous avons fait l'état de l'art des systèmes pyrotechniques intelligents en général, et avons vu que, si nous pouvions nous en inspirer, tout restait à faire dans le domaine du contrôle de la combustion et dans la miniaturisation extrême des systèmes électro-pyrotechniques et de leurs interfaces. Nous avons donc proposé de conduire une étude fonctionnelle qui a mené à la rédaction d'un cahier des charges complet et à la proposition d'une architecture de leurre intelligent, CASSIS. En particulier, nous avons défini que le leurre CASSIS devra intégrer trois blocs technologiques principaux, le bloc fonction terminale, le bloc éjection et le bloc électronique et sécurités, et avons décidé de consacrer les trois chapitres suivants au détail de leur développement respectif.

Dans le deuxième chapitre nous avons approfondi l'état de l'art de la génération d'un signal infrarouge. Les leurres actuels utilisent la combustion d'un pain pyrotechnique de compositions dites infrarouges pour reproduire la signature d'un véhicule. Les pains existants brûlent en masse et il n'est pas possible de contrôler leur combustion. Nous avons alors proposé deux concepts de contrôle par initiation multipoint, l'un basé la structuration d'un pain, l'autre sur sa compartimentation. De manière à prédimensionner notre capacité de contrôle, nous avons développé un code de simulation de combustion 3D pour pains multi-composition, partiellement inertés et initiés séquentiellement. Nous avons démontré que dans le cas du pain structuré, le délai d'initiation permet de contrôler d'un facteur 1 à 4 le front de montée, et le nombre d'inflammateurs initiés contrôle d'un facteur 1 à 2 durée, le niveau max et d'un facteur 1 à 4 le front de montée du signal infrarouge. Nous avons ensuite prototypé puis intégré un étage de micro-initiation et nos concepts de pains infrarouges contrôlables. Nous avons démontré que les micro-inflammateurs LAAS-CNRS sont capables d'allumer un pain infrarouge à plusieurs millimètres de distance, et que plus la distance est importante, moins le délai d'initiation est reproductible. Nous avons démontré que nos concepts étaient à même de contrôler le signal infrarouge généré, dans les ordres de grandeur que nous avions prédimensionné.

Le troisième chapitre a été consacré au processus de conception d'un bloc d'éjection contrôlable. Les systèmes d'éjection par effet mortier actuels utilisent un squib, un compartiment chargé de poudre qui s'ouvre avec la montée en pression. Sur ce principe, nous proposons un concept de bloc d'éjection doté de trois chambres de combustion, initiées soit par filaments plastroniques, soit par micro-initiateurs, et fermé par des disques de métal épaulés et un opercule thermoscellé pour éviter que le feu ne se propage d'une chambre à l'autre. Nous avons implémenté un modèle de balistique intérieure à paramètres globaux et avons conduit une étude de RSM pour extraire des règles de conceptions pour notre bloc d'éjection. Basé sur ces résultats, nous avons développé des prototypes que nous avons validé en plein air, en bombe

manométrique et sur des tirs représentatifs. Nous avons alors démontré que notre concept est viable, que l'allumage d'une ou deux chambres n'entraîne pas l'allumage des autres, et que l'on peut effectivement, de cette façon, piloter la vitesse d'éjection d'un leurre.

Le quatrième chapitre décrit le bloc électronique et sécurités. Il décrit notre démarche de conception d'un bloc électronique répondant au STANAG 4187 et d'une sécurité mécanique innovantes, tous deux prototypés à des dimensions représentatives puis validés lors d'essais en laboratoire.

le cinquième et dernier chapitre conclut ce travail en offrant des perspectives à nos trois blocs. Nos modèles de simulations pourront être réutilisés dans le cadre du développement d'autres types de systèmes électro-pyrotechniques ou dans le cadre de futures itérations du système CASSIS. Nos blocs technologiques de contrôle des effets mortiers et de la combustion d'un pain solide sont fonctionnels et peuvent être déclinés sur d'autres applications. Nous avons apporté des éléments de réponse à l'intégration de l'intégralité de nos blocs technologiques dans un démonstrateur, en exhortant à la suppression des sécurités mécaniques et à la simplification de l'électronique.

Les preuves de concept apportées par ces travaux démontrent de la faisabilité de blocs pyrotechniques contrôlables miniatures, adaptés aux leurres infrarouges mais pouvant être à l'avenir adaptés à tous types de systèmes pyrotechniques. Notre bloc d'éjection contrôlable peut être adapté à des mortiers d'armes ou à des mortiers de feux d'artifices. Notre bloc terminal contrôlable peut être adapté à de la propulsion solide ou a de la génération de fumée colorée. Partie ou intégralité de notre architecture électronique pourra être récupérée dans tout futur travaux portant sur les systèmes électro-pyrotechniques autonomes et sécurisés.

Ces travaux ouvrent la voie à la fiabilisation de systèmes électro-pyrotechniques contrôlables, basés sur des technologies nouvelles d'intégration - comme la plastronique - ou sur des technologies d'initiation de pointe - comme les micro-inflammateurs sur puces -, et pourquoi pas à leur industrialisation.

Annexe A

Pseudocode du schéma d'ULTRA-BEE limité à la 3D

Nous donnons ici notre implémentation du schéma de résolution d'ULTRA-BEE, limité à la 3D. Rappelons que les $\alpha \in A$ représente les directions d'advection prises en compte par le code. Les α sont donc des vecteurs normés.

Rappelons également que ν représente la fonction de niveau, ou de level-set, Δx le pas spatial du maillage cubique régulier et V la vitesse d'advection de la fonction.

Considérer une vitesse d'advection anisotrope reviendrait à faire dépendre V en fonction de α, et impliquerait donc de recalculer le pas de temps Δt et la vitesse réduite λ pour chaque α.

Rappelons enfin que nous avons choisi un CFL de 0.5, d'où le facteur $\frac{1}{2}$ dans l'expression de Δt.

Le pseudo-code est donné d'un bloc page suivante.

while $\nu^m_{(i,j,k)} \neq \emptyset$ **do**

$\nu^m_{(i,j,k)} \leftarrow \begin{cases} \nu^m_{(i,j,k),p} & \text{si } \nu^m_{(i,j,k),p} \neq \text{un de ses 6 voisins cartésiens} \\ \emptyset & \text{sinon} \end{cases}$

$\Delta t^m \leftarrow \frac{\Delta x}{2.\underset{\{i,j,k\}}{max}(V_{i,j,k})}$

$\lambda^m_{i,j,k} \leftarrow \frac{\Delta x}{\Delta t^m.V_{i,j,k}}$

for $\alpha = \{\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z\} \in A$ **do**

if $\alpha_x > 0$ **then**

$b_{i,j,k} \leftarrow max(\nu^m_{i,j,k}, \nu^m_{i+1,j,k}) + \lambda^m_{i,j,k}.(\nu^m_{i,j,k} - max(\nu^m_{i,j,k}, \nu^m_{i+1,j,k}))$;

$B_{i,j,k} \leftarrow min(\nu^m_{i,j,k}, \nu^m_{i+1,j,k}) + \lambda^m_{i,j,k}.(\nu^m_{i,j,k} - min(\nu^m_{i,j,k}, \nu^m_{i+1,j,k}))$;

$\nu^{1,m}_{i,j,k} \leftarrow \nu^m_{i,j,k} + A.\lambda^m_{i,j,k}.(min(max(\nu^m_{i,j,k}, b_{i+1,j,k}), B_{i+1,j,k}) -$
$min(max(\nu^m_{i-1,j,k}, b_{i,j,k}), B_{i,j,k}))$;

else

$b_{i,j,k} \leftarrow max(\nu^m_{i,j,k}, \nu^m_{i-1,j,k}) + \lambda^m_{i,j,k}.(\nu^m_{i,j,k} - max(\nu^m_{i,j,k}, \nu^m_{i-1,j,k}))$;

$B_{i,j,k} \leftarrow min(\nu^m_{i,j,k}, \nu^m_{i-1,j,k}) + \lambda^m_{i,j,k}.(\nu^m_{i,j,k} - min(\nu^m_{i,j,k}, \nu^m_{i-1,j,k}))$;

$\nu^{1,m}_{i,j,k} \leftarrow \nu^m_{i,j,k} + A.\lambda^m_{i,j,k}.(min(max(\nu^m_{i+1,j,k}, b_{i,j,k}), B_{i,j,k}) -$
$min(max(\nu^m_{i,j,k}, b_{i-1,j,k}), B_{i-1,j,k}))$;

end

if $\alpha_y > 0$ **then**

$b_{i,j,k} \leftarrow max(\nu^{1,m}_{i,j,k}, \nu^{1,m}_{i,j+1,k}) + \lambda^m_{i,j,k}.(\nu^{1,m}_{i,j,k} - max(\nu^{1,m}_{i,j,k}, \nu^{1,m}_{i,j+1,k}))$;

$B_{i,j,k} \leftarrow min(\nu^{1,m}_{i,j,k}, \nu^{1,m}_{i,j+1,k}) + \lambda^m_{i,j,k}.(\nu^{1,m}_{i,j,k} - min(\nu^{1,m}_{i,j,k}, \nu^{1,m}_{i,j+1,k}))$;

$\nu^{2,m}_{i,j,k} \leftarrow \nu^m_{i,j,k} + A.\lambda^m_{i,j,k}.(min(max(\nu^m_{i,j,k}, b_{i,j+1,k}), B_{i,j+1,k}) -$
$min(max(\nu^m_{i,j-1,k}, b_{i,j,k}), B_{i,j,k}))$;

else

$b_{i,j,k} \leftarrow max(\nu^{1,m}_{i,j,k}, \nu^{1,m}_{i,j-1,k}) + \lambda^m_{i,j,k}.(\nu^{1,m}_{i,j,k} - max(\nu^{1,m}_{i,j,k}, \nu^{1,m}_{i,j-1,k}))$;

$B_{i,j,k} \leftarrow min(\nu^{1,m}_{i,j,k}, \nu^{1,m}_{i,j-1,k}) + \lambda^m_{i,j,k}.(\nu^{1,m}_{i,j,k} - min(\nu^{1,m}_{i,j,k}, \nu^{1,m}_{i,j-1,k}))$;

$\nu^{2,m}_{i,j,k} \leftarrow \nu^m_{i,j,k} + A.\lambda^m_{i,j,k}.(min(max(\nu^m_{i,j+1,k}, b_{i,j,k}), B_{i,j,k}) -$
$min(max(\nu^m_{i,j,k}, b_{i,j-1,k}), B_{i,j-1,k}))$;

end

if $\alpha_z > 0$ **then**

$b_{i,j,k} \leftarrow max(\nu^{2,m}_{i,j,k}, \nu^{2,m}_{i,j,k+1}) + \lambda^m_{i,j,k}.(\nu^{2,m}_{i,j,k} - max(\nu^{2,m}_{i,j,k}, \nu^{2,m}_{i,j,k+1}))$;

$B_{i,j,k} \leftarrow min(\nu^{2,m}_{i,j,k}, \nu^{2,m}_{i,j,k+1}) + \lambda^m_{i,j,k}.(\nu^{2,m}_{i,j,k} - min(\nu^{2,m}_{i,j,k}, \nu^{2,m}_{i,j,k+1}))$;

$\nu^{3,\alpha,m}_{i,j,k} \leftarrow \nu^m_{i,j,k} + A.\lambda^m_{i,j,k}.(min(max(\nu^m_{i,j,k}, b_{i,j,k+1}), B_{i,j,k+1}) -$
$min(max(\nu^m_{i,j,k-1}, b_{i,j,k}), B_{i,j,k}))$;

else

$b_{i,j,k} \leftarrow max(\nu^{1,m}_{i,j,k}, \nu^{1,m}_{i,j,k-1}) + \lambda^m_{i,j,k}.(\nu^{2,m}_{i,j,k} - max(\nu^{2,m}_{i,j,k}, \nu^{2,m}_{i,j,k-1}))$;

$B_{i,j,k} \leftarrow min(\nu^{1,m}_{i,j,k}, \nu^{1,m}_{i,j,k-1}) + \lambda^m_{i,j,k}.(\nu^{2,m}_{i,j,k} - min(\nu^{2,m}_{i,j,k}, \nu^{2,m}_{i,j,k-1}))$;

$\nu^{3,\alpha,m}_{i,j,k} \leftarrow \nu^m_{i,j,k} + A.\lambda^m_{i,j,k}.(min(max(\nu^m_{i,j,k+1}, b_{i,j,k}), B_{i,j,k}) -$
$min(max(\nu^m_{i,j,k}, b_{i,j,k-1}), B_{i,j,k-1}))$;

end

end

$\nu^{m+1}_{i,j,k} \leftarrow \underset{\alpha}{max}(\nu^{3,\alpha,m}_{i,j,k})$

$\nu^{m+1}_{i,j,k} \leftarrow \begin{cases} \emptyset & \text{si } \nu^m_{(i,j,k),p} = \text{ses 6 voisins cartésiens} \\ \nu^m_{(i,j,k),p} & \text{sinon} \end{cases}$

end

Annexe B

Coefficients des RSM appliquées au modèle de balistique intérieure à paramètres globaux

Nous donnons ici les valeurs complètes des deux RSM exploitées dans le chapitre 2. La première, synthétisée dans le tableau B.2, prend en compte 10 facteurs, tandis que la seconde, synthétisée dans le tableau B.1 n'en prend en compte que 8.

i	a_i
0	42.6321
1	-1.0515
2	-1.4632
3	0.3699
4	13.2656
5	-5.7693
6	5.3982
7	3.1483
8	12.816
9	0.10387
10	0.32364
11	-0.55526
12	-0.021712
13	-0.11824
14	-0.40312
15	-1.7648
16	-0.091179
17	-0.34483
18	0.083665
19	-0.013808
20	-0.31763
21	-1.4654
22	-0.21824
23	-0.11311
24	-0.094661
25	-0.1244
26	-0.51632
27	-1.5938
28	1.7159
29	1.3339
30	5.5328
31	-0.59965
32	-0.75839
33	-2.9719
34	0.58059
35	2.3976
36	-1.7171
37	0.10314
38	0.078882
39	0.093194
40	-2.495
41	1.2491
42	-0.67957
43	-0.78633
44	-3.8768

Table B.1 – Résultats RSM 8 facteurs

i	a_i	i	a_i
0	42.9916	33	0.035644
1	-1.0039	34	0.079543
2	-1.1128	35	-0.47031
3	0.031843	36	-0.31306
4	0.92671	37	0.034436
5	12.9448	38	-0.23884
6	-5.9157	39	-0.33651
7	-0.014661	40	-1.4231
8	5.2643	41	-1.5185
9	2.9742	42	-0.05975
10	11.9962	43	1.7636
11	0.11575	44	1.4049
12	0.0042998	45	5.8083
13	0.2386	46	0.00969
14	-0.52151	47	-0.57701
15	-0.020617	48	-0.73054
16	0.023422	49	-2.8303
17	-0.10411	50	-0.0053982
18	-0.4148	51	-0.0015265
19	-1.8167	52	0.0647
20	-0.07414	53	0.61407
21	0.39959	54	2.5517
22	-0.49669	55	-1.5999
23	-0.03116	56	0.060964
24	0.0078249	57	0.057461
25	-0.098391	58	0.026206
26	-0.44409	59	0.29131
27	-1.9611	60	-2.3667
28	-0.20008	61	1.2857
29	0.05226	62	-0.0019946
30	0.047732	63	-0.65449
31	0.043664	64	-0.74093
32	0.041117	65	-3.6122

Table B.2 – Résultats RSM 10 facteurs

Annexe C

Plan de Doehlert

Nous donnons ici le pseudocode de l'algorithme permettant de générer un plan de Doelhert de taille arbitraire.

```
/* Construction du simplexe                                    */
for aa = 1 : k + 1 do
    for bb = 1 : k do
        if aa <= bb then
            S(aa, bb) ← 0
        else if i == bb + 1 then
            S(aa, bb) ← sqrt((bb+1)/(2.bb))
        else
            S(aa, bb) ← 1/sqrt(2.bb.(bb+1))
        end
    end
end
/* Rotation du simplexe                                        */
M_xy(1 : k + 1, :) ← S
u ← k + 2
for cc = 1 : k + 1 do
    for dd = [1 : k + 1] do
        M_xy ← S(cc, :) − S(dd, :)
        u ← u + 1
    end
end
/* Nous ne gardons que les lignes uniques de M_xy              */
```

S donne le simplexe de départ. Les lignes de la matrice M_{xy} correspondent aux $n = 1 + k + k^2$ expériences du plan de Doehlert. Les colonnes de M_{xy} correspondent aux k facteurs. La matrice M_{xy} donne les valeurs des k facteurs sur les n expériences.

Annexe D

Conditions initiales et limites

Nous donnons ici un rapide détail des conditions limites et initiales de nos différentes simulations.

D.1 Modèle filament plastronique

Nous simulons la chauffe d'un filament plastronique à l'aide du module "'effet joule"' de COMSOL 5.2. Nous modélisons le substrat polycarbonate, le filament cuivre et la ZPP. Nous prenons en compte :

- Les transferts de chaleur par conduction
- Les pertes par convection ($10W/(m^2.K)$)
- Les transferts de chaleur par rayonnement (émissivité polycarbonate 0.84, cuivre 0.5, ZPP 0.95)

Nous imposons un courant constant de 3A dans le filament. Tous les autres matériaux sont supposés parfaitement isolants.

Les valeurs de densité, conductivité thermique, résistivité et capacité thermique son issues de la bibliothèque COMSOL, exception faite de la résistivité du cuivre, prise à $2.924.10^{-}8\Omega m$ pour prendre en compte le mode de dépôt. Les caractéristiques de la ZPP sont obtenues par lois de mélange, à l'exception de sa conductivité thermique, obtenue par fit expérimental.

Puisque le dépôt du cuivre se fait chimiquement, il est en contact intime avec le polycarbonate. Nous avons donc fait le choix de ne pas ajouter une résistance thermique de contact entre les deux.

Initialement, tous les matériaux sont à 293.75K.

D.2 Insert sécurité mécanique

Nous simulons la compression d'un pain autour d'un insert de sécurité mécanique à l'aide du module "'multibody dynamics"' de COMSOL 5.2. Nous modélisons un comportement linéaire élastique du laiton et de l'acier. Les valeurs de densité, module d'Young et coefficient de Poisson sont issues de la bibliothèque COMSOL.

Nous imposons initialement deux chargements surfaciques de 400 bars, sur deux moitiés de l'insert, orientés dans deux directions opposés. Ils simulent respectivement la pression imposée par le piston et la réaction du support. Un schéma de principe est donné figure D.1.

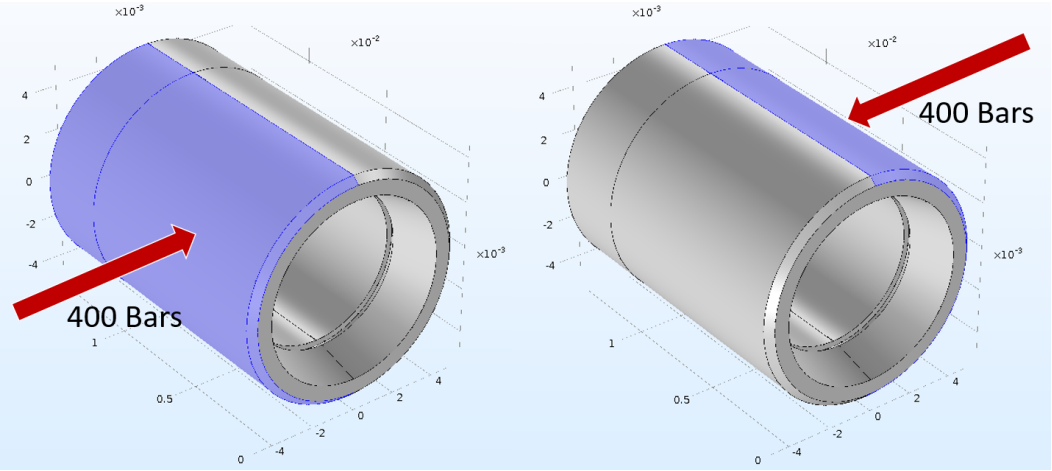


FIGURE D.1 – Schéma de principe du chargement imposé sous COMSOL pour la deuxième version de l'insert de la sécurité mécanique

Si ce modèle fait l'hypothèse d'une poudre rigide, il offre des résultats en très bons accords avec l'expérience, avec une erreur de l'ordre de quelques pour-cents sur la déformation de l'insert.

Annexe E

IHM LabView

Nous donnons en figure E.1 et E.2 les images des IHM labview dédiées respectivement au contrôle de la charge et de la mise à feu des micro-inflammateurs sur l'électronique CASSIS.

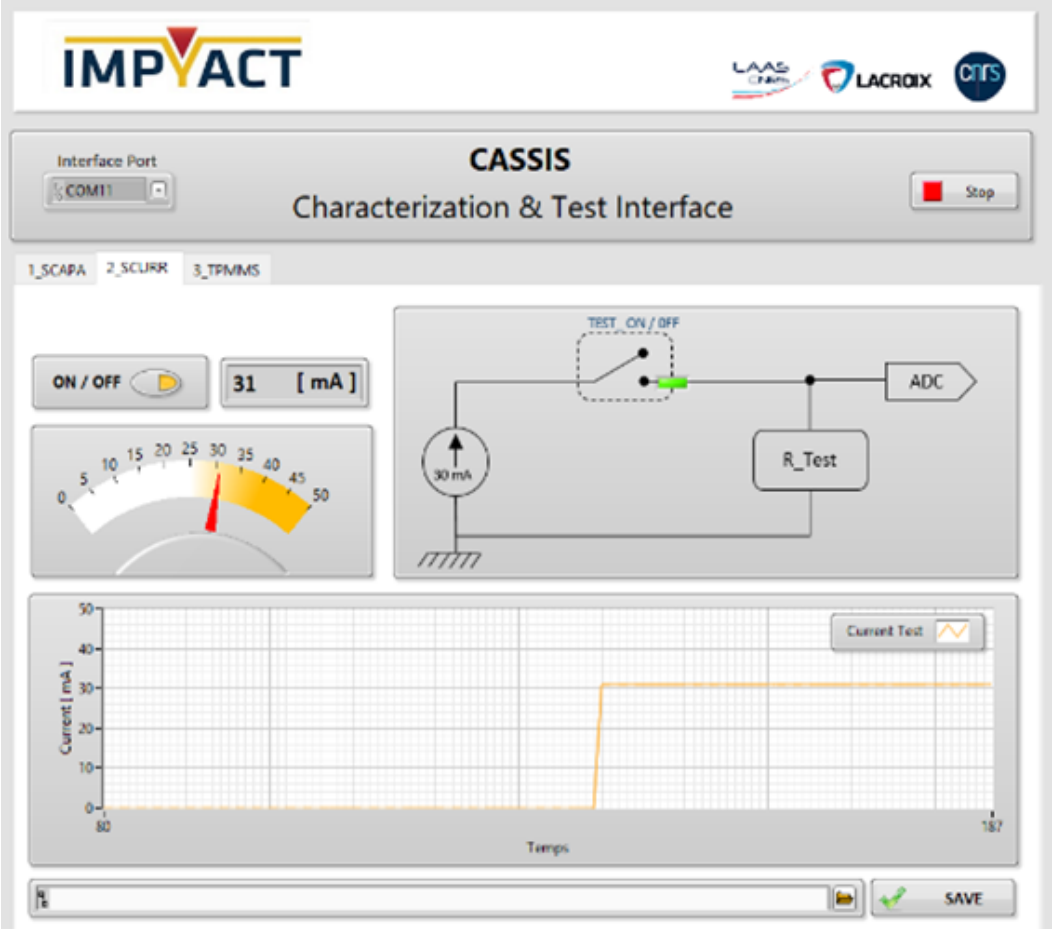


Figure E.1 – IHM LabView pour le monitoring et le contrôle des blocs autotest de l'électronique CASSIS - LAAS-CNRS

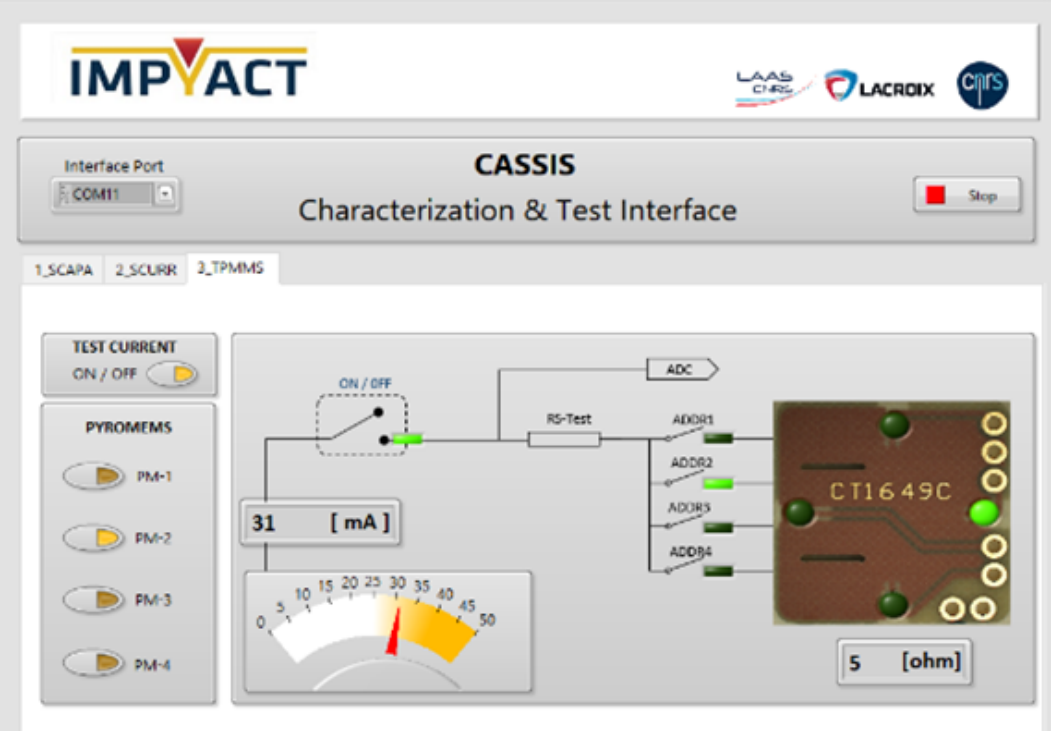


FIGURE E.2 – IHM LabView pour le monitoring et le contrôle de la mise-à-feu de l'électronique CASSIS - LAAS-CNRS

Bibliographie

[1] R. Miller, *Satellites*. Twenty-First Century Books, Sept. 2007.

[2] K. P. Werrell, *ARCHIE, FLAK, AAA, and SAM : A Short Operational History of Ground-Based Air Defense*. University Press of the Pacific, June 2002.

[3] I. Hogg, *German Secret Weapons of the Secret World War : The Missiles, Rockets, Weapons & New Technology of the Third Reich*. Frontline Books, Feb. 2015.

[4] R. P. Hamlin, ""The Gaze Heuristic :" Biography of an Adaptively Rational Decision Process," *Topics in Cognitive Science*, vol. 9, pp. 264–288, Apr. 2017.

[5] J. P. Baxter, *Scientists against Time*. Little, Brown and company, 1946.

[6] R. Westrum, *Sidewinder : Creative Missile Development at China Lake*. Naval Institute Press, Sept. 2013.

[7] B. E. Douda, *Genesis of Infrared Flares*. NAVAIR Public Release, Jan. 2009.

[8] M. D. Withey, "Infrared countermeasure flares," *The Imaging Science Journal*, vol. 58, pp. 295–299, Oct. 2010.

[9] K. Bradley, C. Martin, E. Wild, and R. Platteborze, "Adaptable Miniature Initiation System Technology (AMIST)," tech. rep., Air Force research lab munition directorate, Eglin Air Force base, Sept. 2006.

[10] C. Rossi and D. Estève, "Micropyrotechnics, a new technology for making energetic microsystems : Review and prospective," *Sensors and Actuators A : Physical*, vol. Volume 120,, pp. Pages 297–310, May 2005.

[11] M. Vives, "La sécurité et les systèmes d'amorçage," 2004.

[12] Commission opto-pyrotechnie du GTPS, *Etat de l'art de La Technologie Opto-Pyrotechnique*. Sept. 2011.

[13] M. Petrantoni, *Nanomatériaux Énergétiques Sur Puce : Élaboration, Modélisation et Caractérisation*. Thesis, Toulouse 3, Jan. 2010.

[14] G. Taton, *Conception et Réalisation d'un Microsystème d'initiation Pyrotechnique Intelligent et Sécurisé Pour Applications Spatiales*. Thesis, Toulouse 3, Jan. 2013.

[15] Ludovic Glavier, *Conception et Développement d'un Micro Détonateur Électrique Intégrant Des Nanothermites Pour l'amorçage Par Impact d'explosifs Secondaires*. PhD thesis, Toulouse 3, Oct. 2018.

[16] A. Nicollet, *De l'étude de l'initiation de Nanolaminés Réactifs Al/CuO Par Point Chaud à l'intégration de pyroMEMS Pour La Sécurité*. PhD thesis, Toulouse 3, 2018.

[17] C. Rossi, "Engineering of Al/CuO Reactive Multilayer Thin Films for Tunable Initiation and Actuation," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, vol. 0, no. 0, 2018.

[18] M. Petrantoni, C. Rossi, L. Salvagnac, V. Conédéra, A. Estève, C. Tenailleau, P. Alphonse, and Y. J. Chabal, "Multilayered Al/CuO thermite formation by reactive magnetron sputtering : Nano versus micro," *Journal of Applied Physics*, vol. 108, p. 084323, Oct. 2010.

[19] G. Taton, D. Lagrange, V. Conedera, L. Renaud, and C. Rossi, "Micro-chip initiator realized by integrating Al/CuO multilayer nanothermite on polymeric membrane," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 23, no. 10, p. 105009, 2013.

[20] L. Marín, B. Warot-Fonrose, A. Estève, Y. J. Chabal, L. Alfredo Rodriguez, and C. Rossi, "Self-Organized Al2Cu Nanocrystals at the Interface of Aluminum-Based Reactive Nanolaminates to Lower Reaction Onset Temperature," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 8, pp. 13104–13113, May 2016.

[21] L. Marín, Y. Gao, M. Vallet, I. Abdallah, B. Warot-Fonrose, C. Tenailleau, A. T. Lucero, J. Kim, A. Esteve, Y. J. Chabal, and C. Rossi, "Performance Enhancement via Incorporation of ZnO Nanolayers in Energetic Al/CuO Multilayers," *Langmuir*, vol. 33, pp. 11086–11093, Oct. 2017.

[22] A. Nicollet, G. Lahiner, A. Belisario, S. Souleille, M. Djafari-Rouhani, A. Estève, and C. Rossi, "Investigation of Al/CuO multilayered thermite ignition," *Journal of Applied Physics*, vol. 121, Jan. 2017.

[23] G. Lahiner, A. Nicollet, J. Zapata, L. Marín, N. Richard, M. D. Rouhani, C. Rossi, and A. Estève, "A diffusion–reaction scheme for modeling ignition and self-propagating reactions in Al/CuO multilayered thin films," *Journal of Applied Physics*, vol. 122, p. 155105, Oct. 2017.

[24] I. Abdallah, J. Zapata, G. Lahiner, B. Warot-Fonrose, J. Cure, Y. Chabal, A. Esteve, and C. Rossi, "Structure and Chemical Characterization at the Atomic Level of Reactions in Al/CuO Multilayers," *ACS Applied Energy Materials*, vol. 1, pp. 1762–1770, Apr. 2018.

[25] F. Gibou, R. Fedkiw, R. Caflisch, and S. Osher, "A Level Set Approach for the Numerical Simulation of Dendritic Growth," *Journal of Scientific Computing*, vol. 19, pp. 183–199, Dec. 2003.

[26] R. Tsai and S. Osher, "Level set methods in image science," in *Proceedings / ICIP ... International Conference on Image Processing*, vol. 2, pp. 631–634, Jan. 2003.

[27] M. Stolarska, D. L. Chopp, N. Moës, and T. Belytschko, "Modelling crack growth by level sets in the extended finite element method," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 51, pp. 943–960, July 2001.

[28] G. Allaire, F. de gournay, F. Jouve, and A.-M. Toader, "Structural optimization using topological and shape sensitivity via a level set method," *Control and Cybernetics*, vol. 34, Jan. 2005.

[29] T. Lolla, P. F. J. Lermusiaux, M. P. Ueckermann, and P. J. Haley, "Time-optimal path planning in dynamic flows using level set equations : Theory and schemes," *Prof. Lermusiaux via Angie Locknar*, Sept. 2014.

[30] Y. Liu, K. Yin, Y. Liu, F. Bao, and E. Wu, "Efficient Simulation of Grain Burning Surface Regression," in *Advanced Materials Research*, vol. 466-467, Jan. 2011.

[31] J. Choi and S. Menon, "Solid Propellant Combustion with Surface Regression by Coupled Gas-Solid Approach," in *45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Oct. 2018.

[32] A. Ulas, G. A. Risha, and K. K. Kuo, "An Investigation of the Performance of a Boron/Potassium-Nitrate Based Pyrotechnic Igniter," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, vol. 31, pp. 311–317, Aug. 2006.

[33] Ali Kamran, "Design and optimization of solid rocket motor finocyl grain using simulated annealing," *Journal of Aerospace Power*, Apr. 2011.

[34] J.-L. Pouchairet, A. Bellisario, A. Esteve, D. Medus, and C. Rossi, "Implementation and Comparison of First Order Level-Set and Fast Marching Methods to Model the Combustion of multi-compositional Solid Pyrotechnic Materials," *Combustion Theory and Modelling*, In review.

[35] B. Després and F. Lagoutière, "Contact discontinuity capturing schemes for linear advection and compressible gas dynamics," *J. Sci. Comput*, vol. 16, pp. 16–479, 2002.

[36] O. Bokanowski and H. Zidani, "Anti-Dissipative Schemes for Advection and Application to Hamilton–Jacobi–Bellmann Equations," *Journal of Scientific Computing*, vol. 30, pp. 1–33, Jan. 2007.

[37] J. Liu, Y. Q. Chen, J. M. Maisog, and G. Luta, "A new point containment test algorithm based on preprocessing and determining triangles," *Computer-Aided Design*, vol. 42, pp. 1143–1150, Dec. 2010.

[38] T. H. Cormen, ed., *Introduction to Algorithms*. Cambridge, Mass : MIT Press, 3rd ed ed., 2009. OCLC : ocn311310321.

[39] D. Eberly, "Distance Between Point and Triangle in 3D," p. 6.

[40] M. Jacobson, "N-dimensional sparse arrays - File Exchange - MATLAB Central." https ://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/29832, Oct. 2018.

[41] G. P. Sutton and O. Biblarz, *Rocket Propulsion Elements*. A Wiley-Interscience publication, New York : Wiley, 7. ed ed., 2001. OCLC : 247963124.

[42] P. Winiarski and A. Dziedzic, "Stability of thin-film resistors embedded in printed circuit boards," in *2011 International Students and Young Scientists Workshop "Photonics and Microsystems"*, pp. 138–142, July 2011.

[43] G. E. P. Box and N. R. Draper, *Response Surfaces, Mixtures, and Ridge Analyses*. Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, Inc., Mar. 2007.

[44] C. Boucher, P. Marshall, and D. Novotney, "Ordnance firing system," Apr. 2003.

[45] D. R. DeVries, B. D. Madsen, E. C. Peterson, D. L. Jackson, W. W. Thorup, and S. K. Lusk, "High voltage firing unit, ordnance system, and method of operating same," Aug. 2015.

[46] D. D. Fisher, "Safe arming system and method," Sept. 2013.

[47] D. Grilliot and C. Hatch, "Multiple Launch Rocket System (MLRS) Fuzing Evolving to Meet End User Requirements," in *51st Annual NDIA Fuze Conference*, p. 33, 2007.

[48] P. Massé, "Dispositif de surveillance d'un système d'arme, en particulier de type missile," Sept. 2013.

[49] G. Taton, *Conception et réalisation d'un microsystème d'initiation pyrotechnique intelligent et sécurisé pour applications spatiales.* PhD thesis, Université Paul Sabatier - Toulouse III, Dec. 2013.

[50] L. Glavier, *Conception et développement d'un micro détonateur électrique intégrant des nanothermites pour l'amorçage par impact d'explosifs secondaires.* PhD thesis, Université de Toulouse 3 Paul Sabatier, Jan. 2017.

[51] W. H. Maurer, G. H. Soto, and D. R. Hollingsworth, "MEMS safe arm device for microdetonation," May 2006.

[52] G. Taton, D. Lagrange, V. Conedera, L. Renaud, and C. Rossi, "Micro-chip initiator realized by integrating Al/CuO multilayer nanothermite on polymeric membrane," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 23, no. 10, p. 105009, 2013.

Résumé :

Répondant à un besoin grandissant de standardisation et d'adaptabilité pour les systèmes pyrotechniques, nous présentons au travers de ce travail un nouveau concept de leurre infrarouge intelligent, contrôlable à l'aide d'un système d'initiation électronique miniature embarqué. Notre solution innovante se décompose en trois blocs fonctionnels distincts : (1) un bloc d'éjection pyrotechnique contrôlable intégrant trois charges d'éjection dans une seule pièce plastique métallisée, (2) un bloc appelé fonction terminale, constitué d'un pain pyrotechnique infrarouge structuré, couplé à un étage de micro-initiation à base de nano-thermites, adressable et basse énergie, et (3) un bloc de contrôle, connecté et autonome, répondant au STANAG 4187 qui commande l'armement et la mise à feu des fonctions pyrotechniques.

Pour dimensionner le bloc d'éjection, nous avons développé un code de balistique intérieure à paramètres globaux et un superviseur d'optimisation, capable de simuler n'importe quel système à effet mortier. Ensuite, pour simuler la combustion des pains infrarouges, nous avons développé un code de régression géométrique basé sur la méthode level-set, capable de modéliser la combustion de n'importe quel pain solide multicomposition, compartimenté ou structuré, allumé séquentiellement ou simultanément en plusieurs points. Nous avons exploré des solutions technologiques innovantes, au rang desquelles l'initiation de pains pyrotechniques par micro-inflammateurs à nanothermites. Nous avons montré théoriquement, puis validé expérimentalement, qu'il était possible de contrôler finement la réaction de combustion des pains pyrotechniques IR grâce à un allumage séquentiel de ces derniers, ce qui représente une innovation importante en pyrotechnie.

Nous avons exploré la technologie plastronique pour réaliser le bloc d'éjection car elle permet de métalliser sélectivement les surfaces d'une pièce plastique pour condenser en une seule pièce des fonctions mécaniques, électroniques et de packaging. En particulier, nous avons utilisé pour la première fois cette technologie pour tracer des fils chauds sur la surface d'une pièce plastique, et permettre de rassembler trois impulseurs d'éjection dans un volume minimal. Nous avons validé expérimentalement le contrôle de la vitesse d'éjection de leurres IR grâce à un allumage partiel d'impulseurs plastroniques.

Enfin, une électronique de commande respectant le STANAG 4187 a été conçue pour initier séquentiellement les blocs terminaux et d'éjection. Elle intègre un étage de commande autour d'un microcontrôleur PIC, un étage de

gestion de l'énergie intégrant des micro-sources de courant et une supercapacité, et un étage de sécurité qui détecte l'éjection grâce à un accéléromètre et un émetteur/récepteur infrarouge.

Nous avons conclu la thèse par l'intégration des différents blocs fonctionnels dans un démonstrateur représentatif d'un leurre infrarouge intelligent et miniature : CASSIS. Au delà de la démonstration de CASSIS, l'ensemble de mes travaux de thèse, qui s'inscrivent dans le cadre d'un laboratoire commun, IMPYACT, entre le CNRS et le groupe Etienne Lacroix, ont contribué à mettre au point des solutions et technologies "génériques" et "versatiles" pour l'initiation contrôlée, la propulsion et l'intégration de systèmes pyrotechniques miniatures exploitables pour nombreux systèmes pyrotechniques.

Mots clés :

Systèmes pyrotechniques, intelligence, contrôle, conception, modélisation, validation expérimentale