



# **SÉCURITÉ ET INTELLIGENCE EN INITIATION: ÉTAT DE L'ART ET PERSPECTIVES**

**JOURNÉE TECHNIQUE DU GTPS du 26 novembre 2024:** *Fiabilité et initiation des systèmes pyrotechniques*

/ **COMMISSION « Sécurité & Intelligence en Initiation »** créée fin 2015.

Présidée depuis 2016 par Philippe LE BRETON/JT2M , épaulé depuis 2018 par Joëlle PINCHOT/E. Lacroix

### ➤ **OBJECTIF DE LA COMMISSION**

Rédiger un Etat de l'art sur les initiations dites « intelligentes », et positionner ces dernières par rapport aux technologies classiques utilisées jusqu'alors pour remplir les fonctions dans les dispositifs de sécurité, d'armement et d'initiation. Le champ d'étude de la Commission porte sur l'ensemble de la chaîne d'initiation, depuis le système de mise à feu jusqu'à la charge relais, en passant par les barrières, la conversion d'énergie et l'initiateur pyrotechnique.

### ➤ **PARTICIPANTS**

- Au fil des années, participation de 21 membres issus de 11 sociétés et DGA
- Départs du groupe remplacés régulièrement par de nouveaux arrivants.



### ➤ **ORGANISATION**

Depuis 2020, réunions mensuelles principalement en distanciel et 1 à 2 réunions sur site industriels.

# Sécurité et Intelligence en initiation - État de l'art et perspectives

3



## / INTRODUCTION

### ► Objectifs

- ❖ Positionner la problématique Sécurité et Intelligence au regard des limites technologiques actuelles en terme de sécurité, fiabilité, disponibilité et précision
- ❖ Évaluer l'apport des nouvelles technologies (énergétiques, numériques, mécaniques)
- ❖ Analyser la maturité, les limites des nouvelles technologies et les axes de recherche

Ces objectifs permettent de réaliser l'état de l'art de l'initiation.

# Sécurité et Intelligence en initiation - État de l'art et perspectives

4

## / INTRODUCTION

### ► Intérêts

- ❖ Nouvelles technologies, nouvelles fonctions pour dépasser les limites actuelles :
  - ❑ analyse d'informations numériques/digitales , codage, décodage, vérification
  - ❑ communication ascendante (identification/autotest)
  - ❑ Intégration locale, miniaturisation
- ❖ Intelligence et sécurité sont liées, sur l'intégralité de la chaîne pyrotechnique



***L'intelligence ne doit pas amener de régression (sécurité, fiabilité, disponibilité...) !!***

# Sécurité et Intelligence en initiation - État de l'art et perspectives

5



## / INTRODUCTION

### ► Enjeux = maîtriser

#### ❖ Sécurité

- ❑ Intégration de fonctions de sécurité au plus près de la fonction terminale
- ❑ Robustesse aux agressions intrinsèques à la chaîne ( ES, EM, ...)
- ❑ Alliance entre haute performance fonctionnelle et moindre sensibilité ( suppression des explosifs primaires, réduction de masses pyrotechniques)
- ❑ Réduction / élimination des matériaux à haut risque pyrotechnique, toxicologiques ou éco toxicologiques
- ❑ Maintenance, démantèlement, neutralisation, destruction

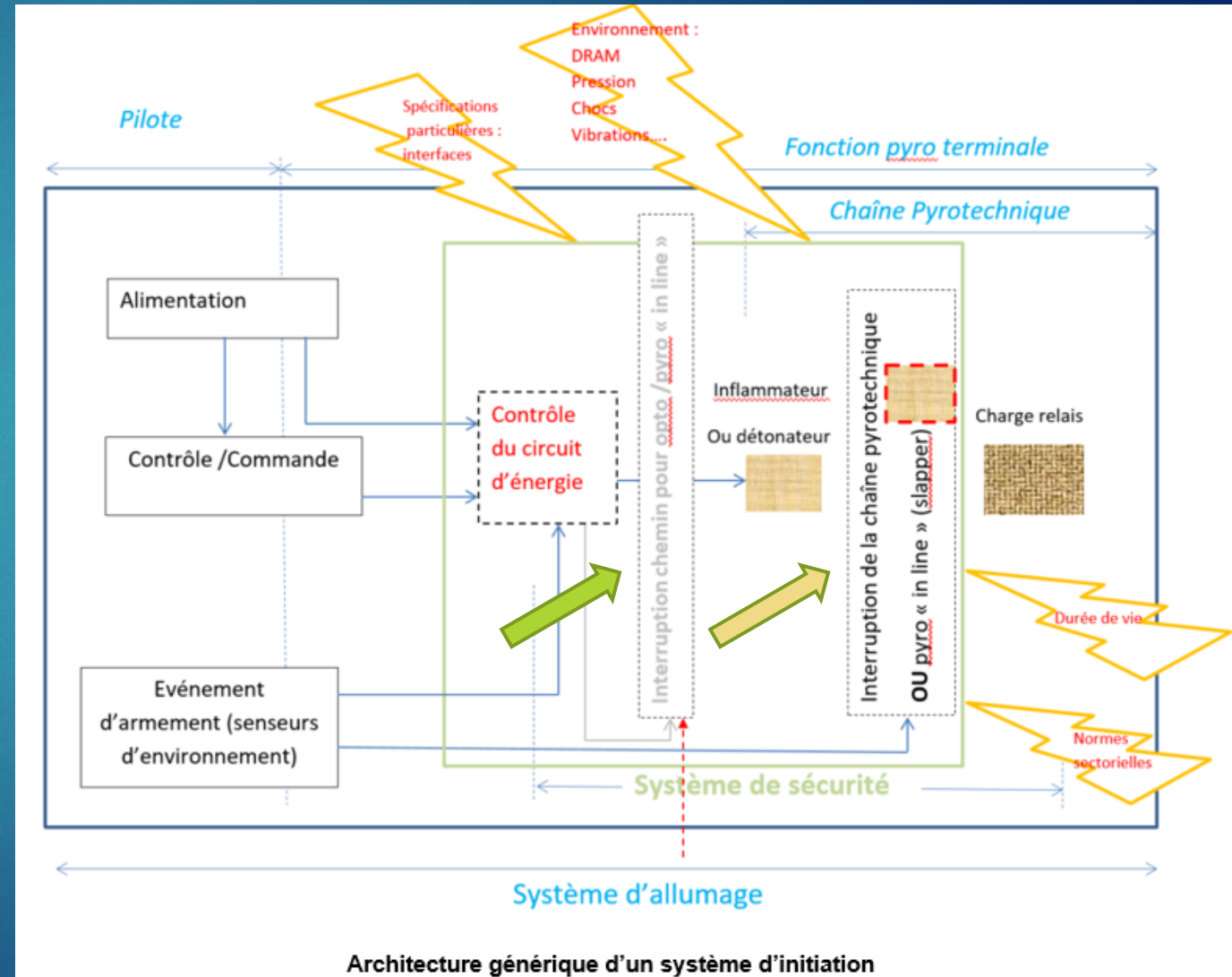
#### ❖ Intelligence

- ❑ Testabilité avant/après ou pendant l'utilisation, surveillance cyclique
- ❑ Adaptabilité de la chaîne aux besoins systèmes ( nombre variable d'initiateurs, configuration de vol )
- ❑ Fiabilité accrue (sans dégradation de la disponibilité)
- ❑ Autonomie fonctionnelle

## / SYSTÈMES D'INITIATION

### ► Architecture système

- Composants standards d'une chaîne d'initiation pyrotechnique
- Séquençage
- Localisation des barrières en fonction de la technologie :
  - En amont de la chaîne pyro
  - In situ



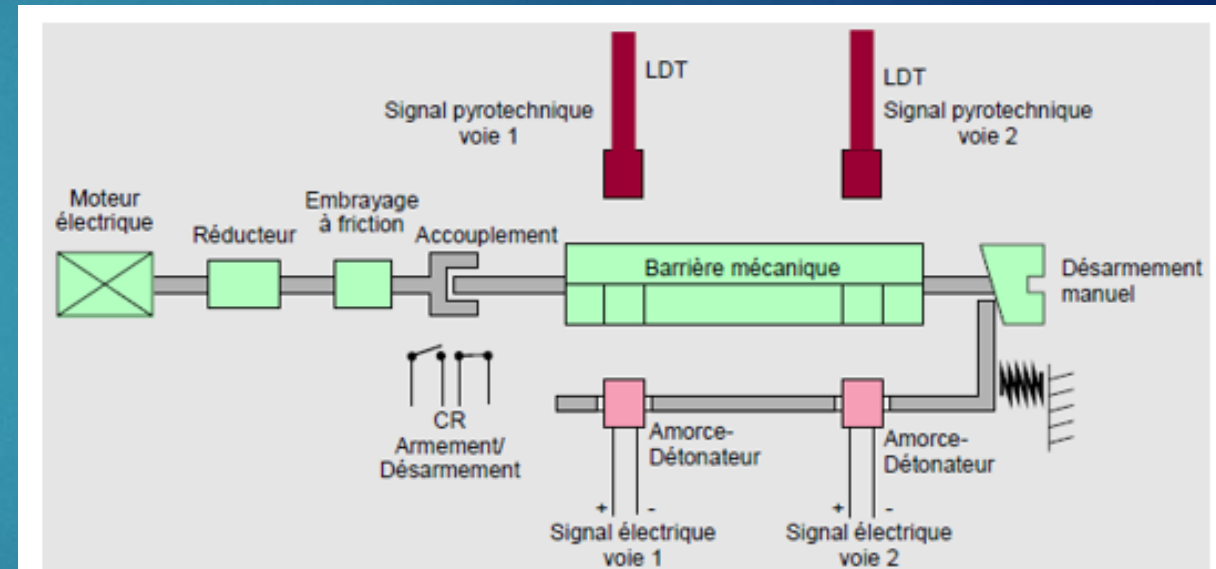
## / SYSTÈMES D'INITIATION

### ► Pilote du système d'initiation : boîtier de sécurité armement (BSA)

- ❖ 2 positions : SAFE / ARM,
  1. Intercepte le signal pyro amont ( initiation) vers l'aval (fonction terminale)
  2. Autorise le transfert du signal d'initiation vers la fonction terminale

Exemple de BSA mécanique (amont) pour lanceur spatial

- 2 entrées pyro / 2 sorties pyro,
- une barrière mécanique commandée électriquement



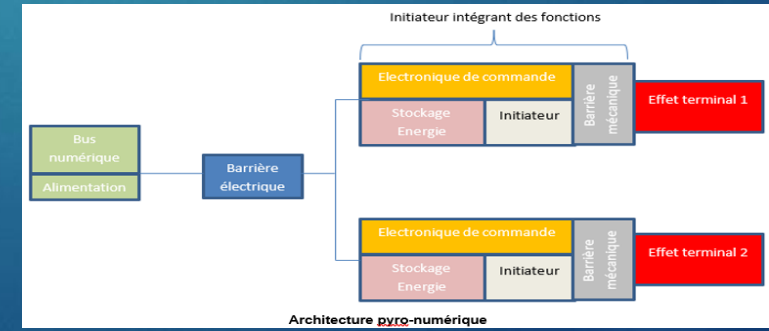
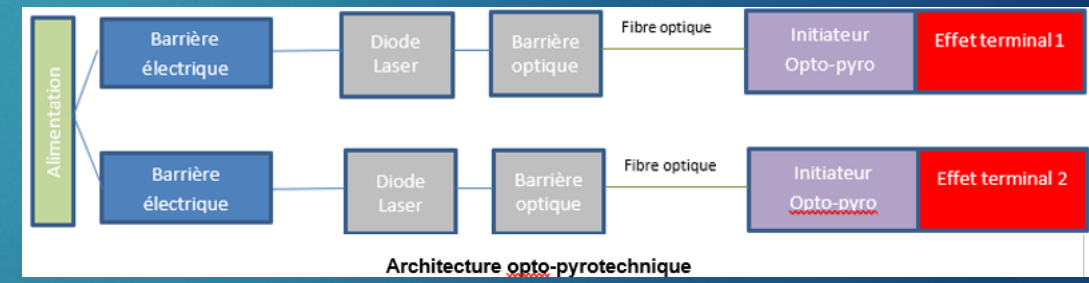
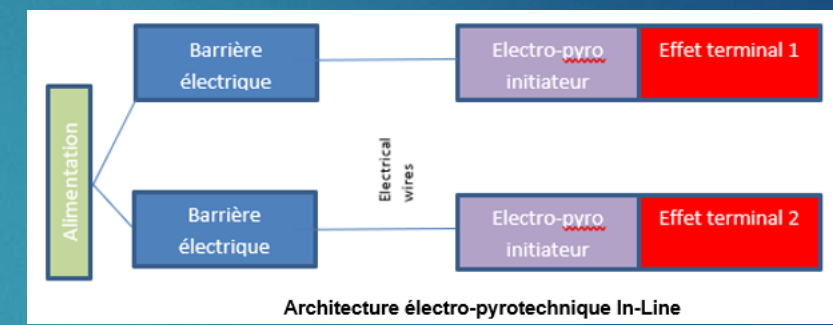
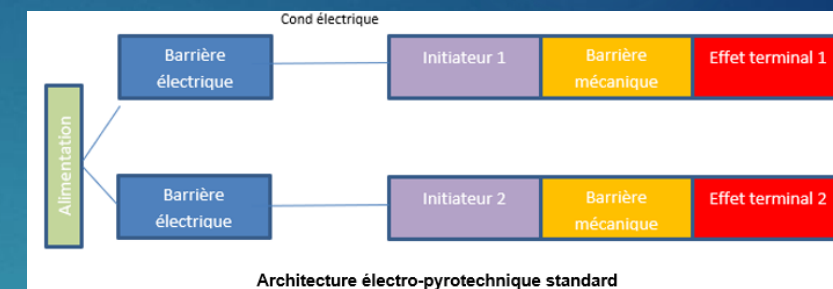
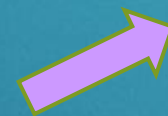
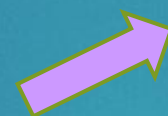
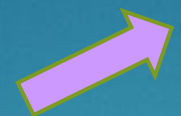
Principe de fonctionnement d'un boîtier de Sécurité Armement.

# Sécurité et Intelligence en initiation - État de l'art et perspectives

## / SYSTÈMES D'INITIATION

### ► Systemes de sécurité (1/2)

- ❖ Implantés en amont ou intégrés dans la chaîne
- ❖ Double fonction : gère l'état sécurité (safe/arm) et l'interruption de chaîne en cas de déclenchement intempestif d'un composant pyro (le plus sensible)
- ❖ Plusieurs architectures bâties autour de l'initiateur



## / SYSTÈMES D'INITIATION

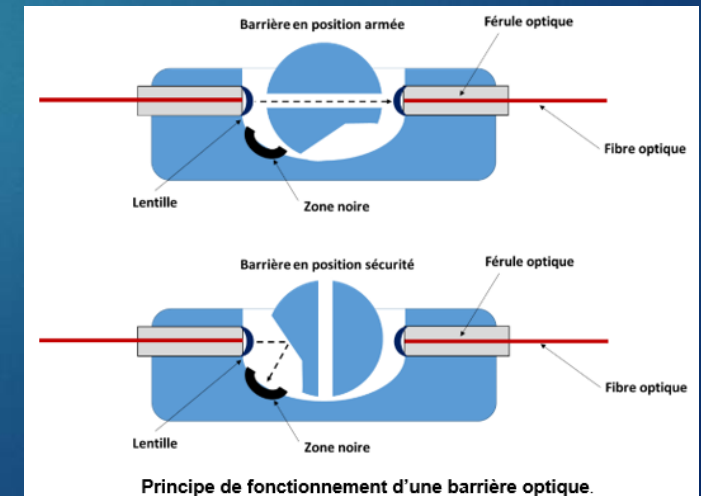
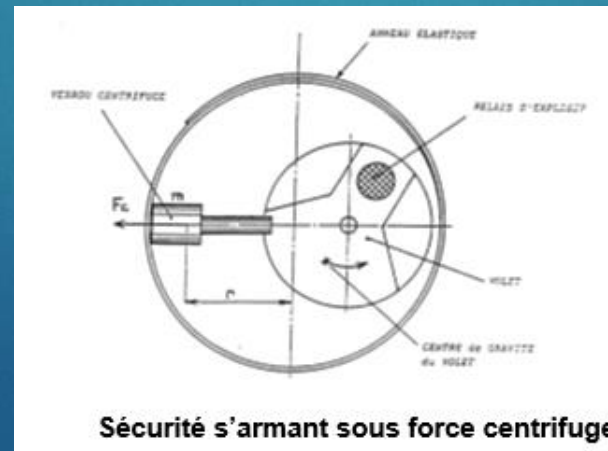
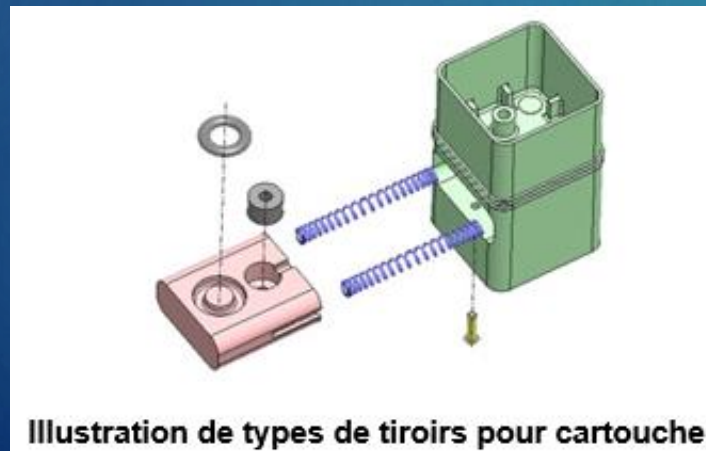
### ► Systemes de sécurité (2/2)

- ❖ DSMF : Dispositif de Sécurité et de Mise à Feu (propulseur, STANAG 4368)
- ❖ DSA : Dispositif de Sécurité et Armement (détonique, STANAG 4187)
- ☞ Levée des sécurités imposée par 2 évènements indépendants
- ☞ Type de verrous:

- Barrières électriques : interruption du passage du courant dans l'initiateur

- Barrières mécaniques: déplacement, accélération...

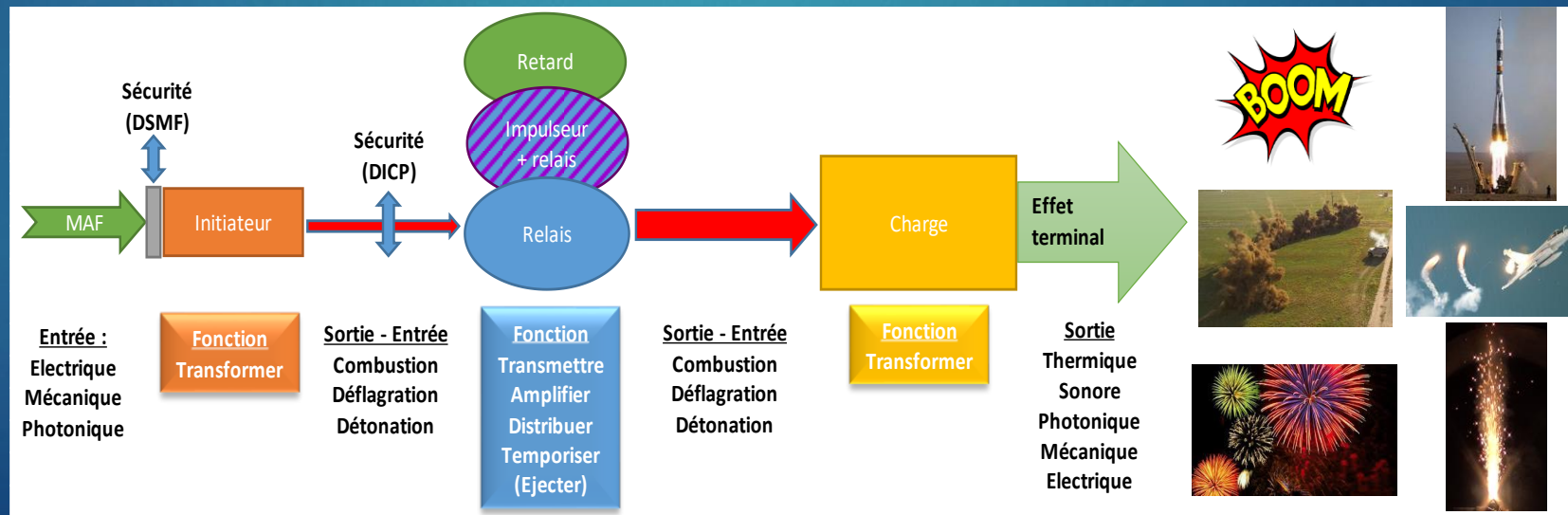
- Barrières optiques



## / SYSTÈMES D'INITIATION

### ► La chaîne pyrotechnique

- ❖ Ensemble de composants pyro en interaction, convertissant un signal extérieur (électrique, mécanique, optique) en un ou plusieurs effets terminaux (pression, onde de choc, rayonnement, chaleur, bruit... )
- ❖ Diversité de fonctions des composants : retard, transmission, distribution, conversion...
- ❖ Diversité de fonctions terminales : découper, pousser, pressuriser, émettre, chauffer ...



## / SYSTÈMES D'INITIATION

### ► Les initiateurs

- ❖ Ils convertissent un signal extérieur (non pyro : électrique, mécanique, optique) en signal pyro ( combustion, déflagration, détonation)
- ❖ Ils contiennent une faible quantité de matériau très énergétiques, particulièrement sensibles à de faibles stimuli extérieurs:
  - Explosifs primaires: azotures, tétrazoles, dérivés nitrés
  - Explosifs secondaires: hexogène, octogène,
  - Compositions pyro (mélanges oxydo-réducteurs): ZPP,...

L'introduction récente de la dimension « nano » dans le domaine de la pyrotechnie a permis de développer de nouvelles familles de substances hautement réactives : les nanothermites, les nanocomposites, ...

## / SYSTÈMES D'INITIATION

### ► Les initiateurs : une grande famille !

- ❖ À fil chaud
- ❖ Opto pyrotechnique
- ❖ Pyro-MEMS (nanothermite)
- ❖ À fil explosé
- ❖ Slapper ( plasma)
- ❖ A transition Choc /détonation

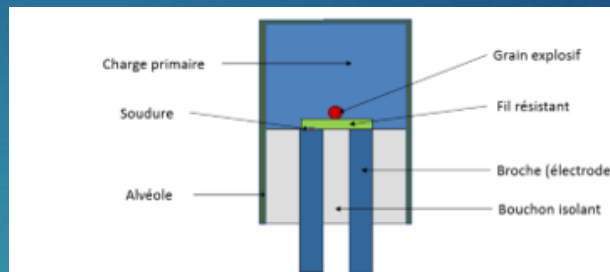


Schéma de principe d'un détonateur par Fil Chaud.

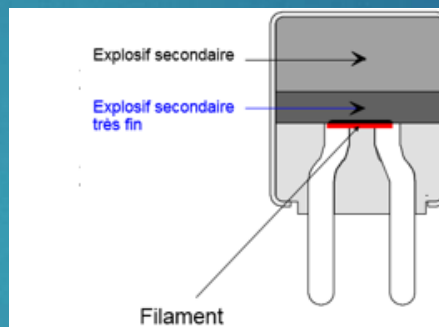


Schéma de principe d'un détonateur par Fil Explosé.

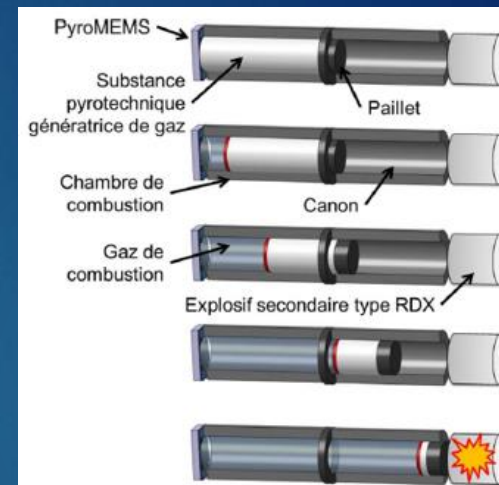


Schéma de principe de fonctionnement de propulsion d'un paillet pour créer une transition choc / détonation sur un explosif secondaire.

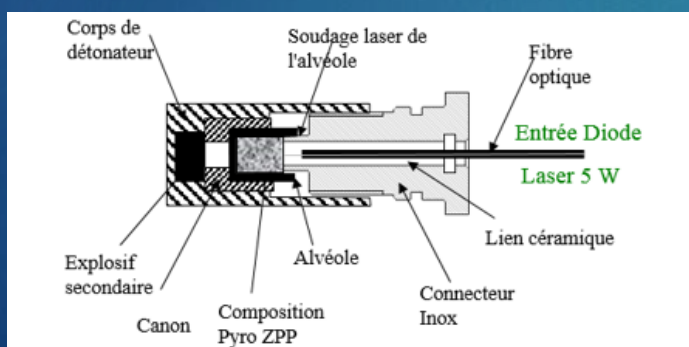


Schéma de principe d'un détonateur opto-pyrotechnique KNDS

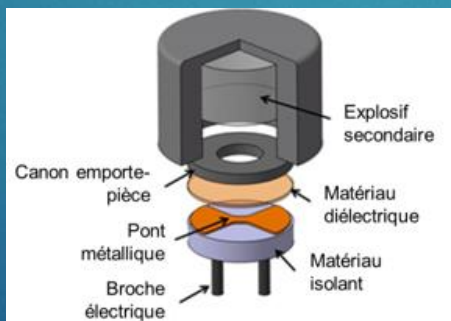
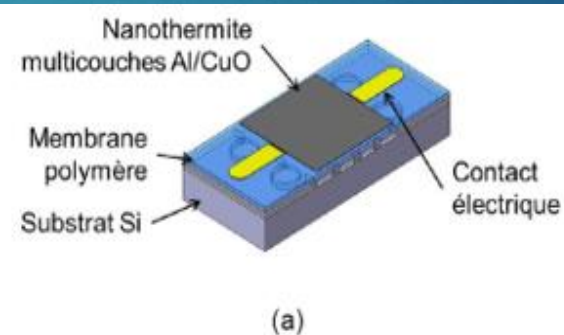
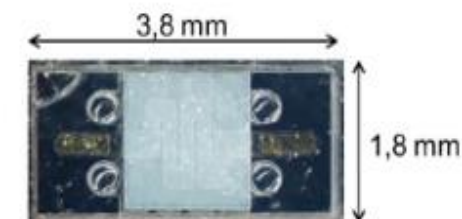


Schéma de principe d'un Slapper.



(a) Schéma d'un Pyro-MEMS



(b) Photo face avant d'un Pyro-MEMS

## / NORMES ET REGLEMENTATION

### ► Normes militaires

- ❖ **STANAG 4187 et AOP 16** : SYSTÈMES D'INITIATION : EXIGENCES DE SÉCURITÉ À RESPECTER DANS LA **CONCEPTION**
- ❖ **STANAG 4170 ET AOP 7** : HOMOLOGATION DES **SUBSTANCES** PYROTECHNIQUES (S-CAT 17500 pour la France)
- ❖ **STANAG 4238** : PRINCIPES DE CONCEPTION DES MUNITIONS – **ENVIRONNEMENTS ELECTRIQUES – ELECTROMAGNETIQUES**
- ❖ **STANAG 4369** : PRINCIPES DE CONCEPTION RELATIFS AU REGLAGE PAR **INDUCTION** DES SYSTEMES DE FUSEES DESTINES AUX PROJECTILES DE GRAND CALIBRE
- ❖ **STANAG 4297 & AOP-15** : GUIDE POUR L'ÉVALUATION DE LA **SECURITE ET DE L'APTITUDE** AU SERVICE DES MUNITIONS NON-NUCLEAIRES DESTINEES AUX FORCES ARMEES DE L'OTAN
- ❖ **STANAG 4368** : **DISPOSITIFS D'ALLUMAGE** POUR ROQUETTES ET MOTEURS DE MISSILES, PRINCIPES DE SÉCURITÉ À RESPECTER
- ❖ **STANAG 4432** - **MUNITIONS GUIDEES** A LANCEUR AERIEN, PRINCIPES DE SECURITE POUR LA CONCEPTION
- ❖ **STANAG 4560** - MÉTHODES D'ÉVALUATION ET D'ESSAI POUR LA **CARACTERISATION** DES DISPOSITIFS ÉLECTRO-PYROTECHNIQUES - AOP-43 Ed 3
- ❖ **NORMDEF 0301-1 (2017)** : qualification **DRAM**
- ❖ **NORMDEF 001 Ed 3 (2018) Annexe C**: **Couleurs** de la défense nationale

## / NORMES ET REGLEMENTATIONS CIVILES

### ▶ Domaine spatial

**Des spécifications générales** qui compilent des contraintes internes à la chaîne d'initiation et des contraintes légales (loi gouvernementale, code du travail, STANAG)

- ❖ **Des normes européennes ECSS** (European Cooperation for Space Standardization) qui s'appliquent aux équipements.
- ❖ **Loi sur les Opérations Spatiales LOS** : sécurité, fiabilité, performances tout au long du cycle de vie ( décollage, mise en orbite, retour sur terre,..)
- ❖ **REI** (Réglementation pour l'Exploitation des Installations à KOUROU).

### ▶ Domaine automobile

Pas de normes mais des spécifications clients (USCAR,...)

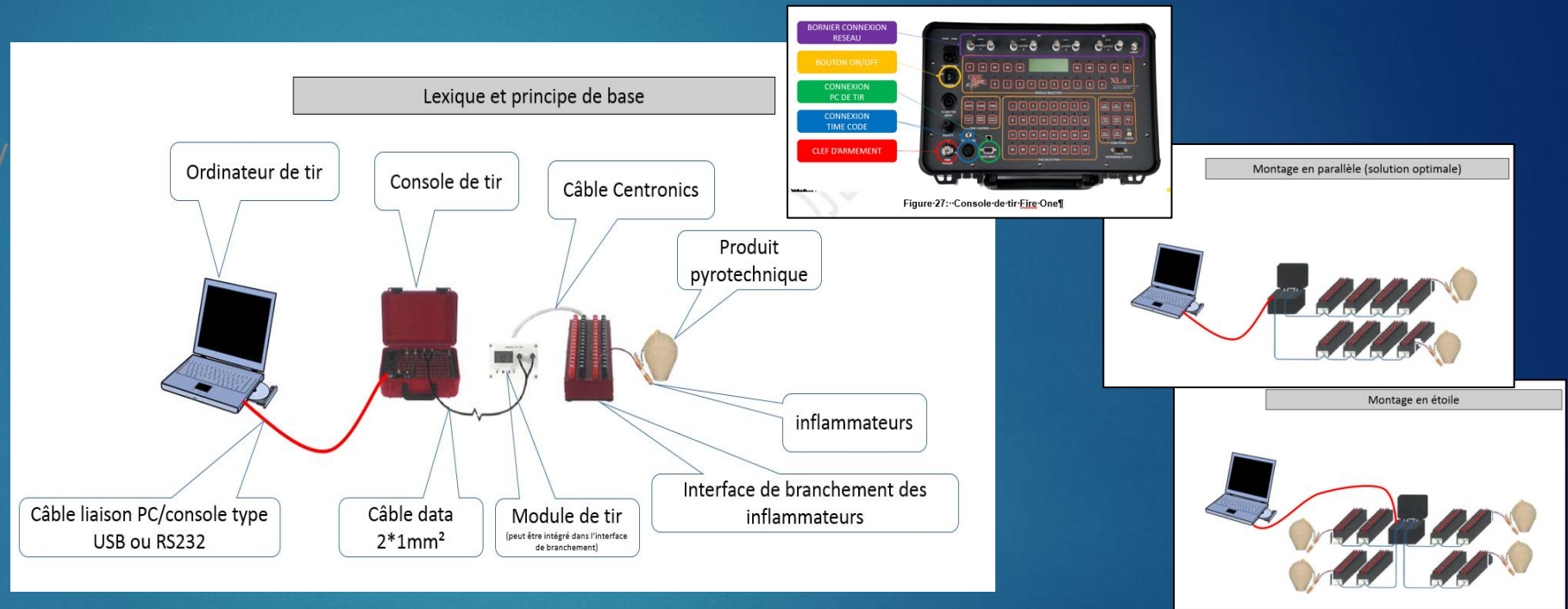
### ▶ Autre:

**NORME 13763** : **usage civil** pour les détonateurs et les relais

## / APPLICATIONS

### Systeme de tir programmable (FIREONE utilisé par RUGGIERI)

- ▶ Feux d'artifices
- ▶ Mines et carrières / destruction
- ▶ Automobile
- ▶ Aéronautique
- ▶ Munition
- ▶ Spatial



\*Up to 3.2 km (2 mi) of control cable

## / APPLICATIONS

- ▶ Feux d'artifices
- ▶ Mines et carrières/ destruction
- ▶ Automobile
- ▶ Aéronautique
- ▶ Munition
- ▶ Spatial

### Détonateurs pyronumériques DaveyTronic (DAVEY BICKFORD ENAEX)

- Autodiagnostic
- Communication bidirectionnelle
- Cryptage des communications
- Stockage local d'énergie
- ...

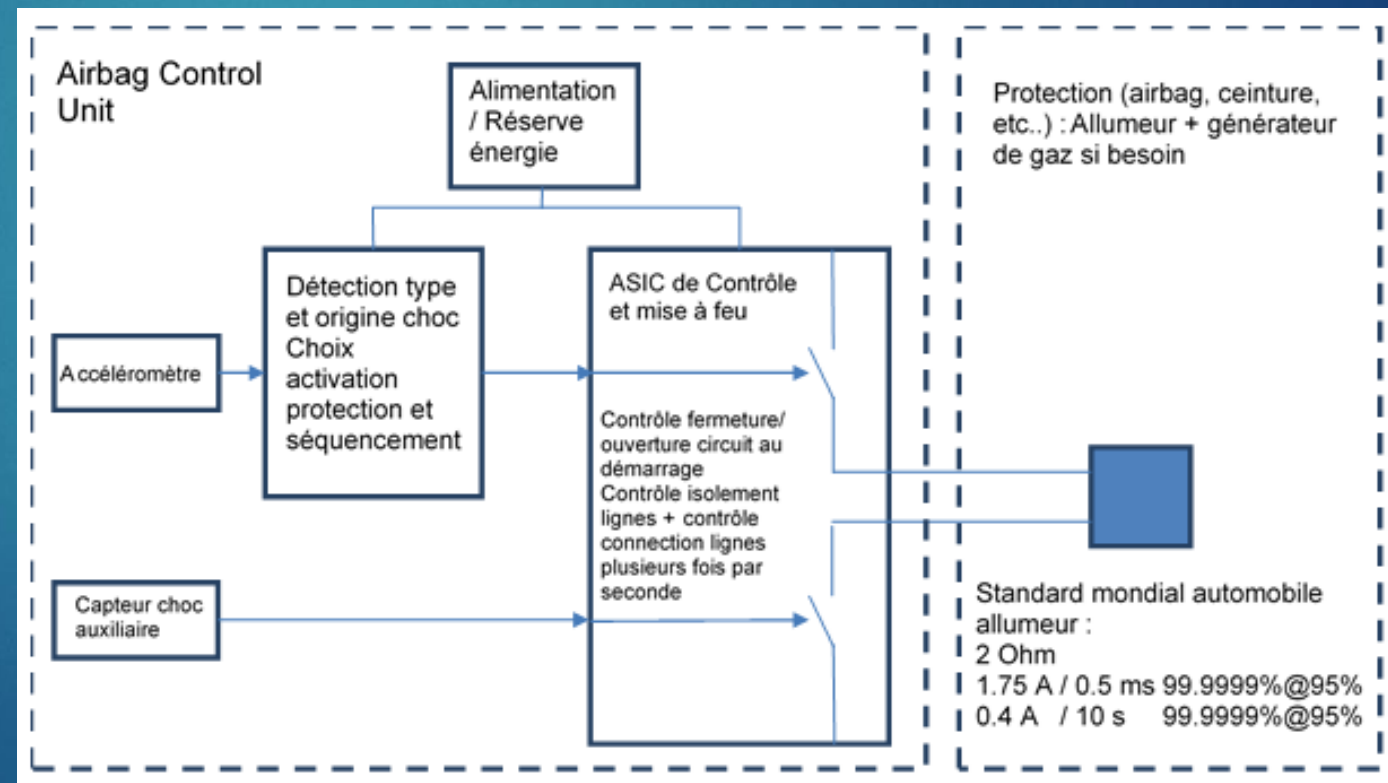


## / APPLICATIONS

### Système d'initiation générique des protections pour véhicule (AUTOLIV)

- ▶ Feux d'artifices
- ▶ Mines et carrières / destruction
- ▶ Automobile
- ▶ Aéronautique
- ▶ Munition
- ▶ Spatial

- Electronic Control Unit : gestion centralisée des sécurités
- Pas de besoin de système intelligent au niveau sécurité ( barrière économique, non justifié par gain sécurité )

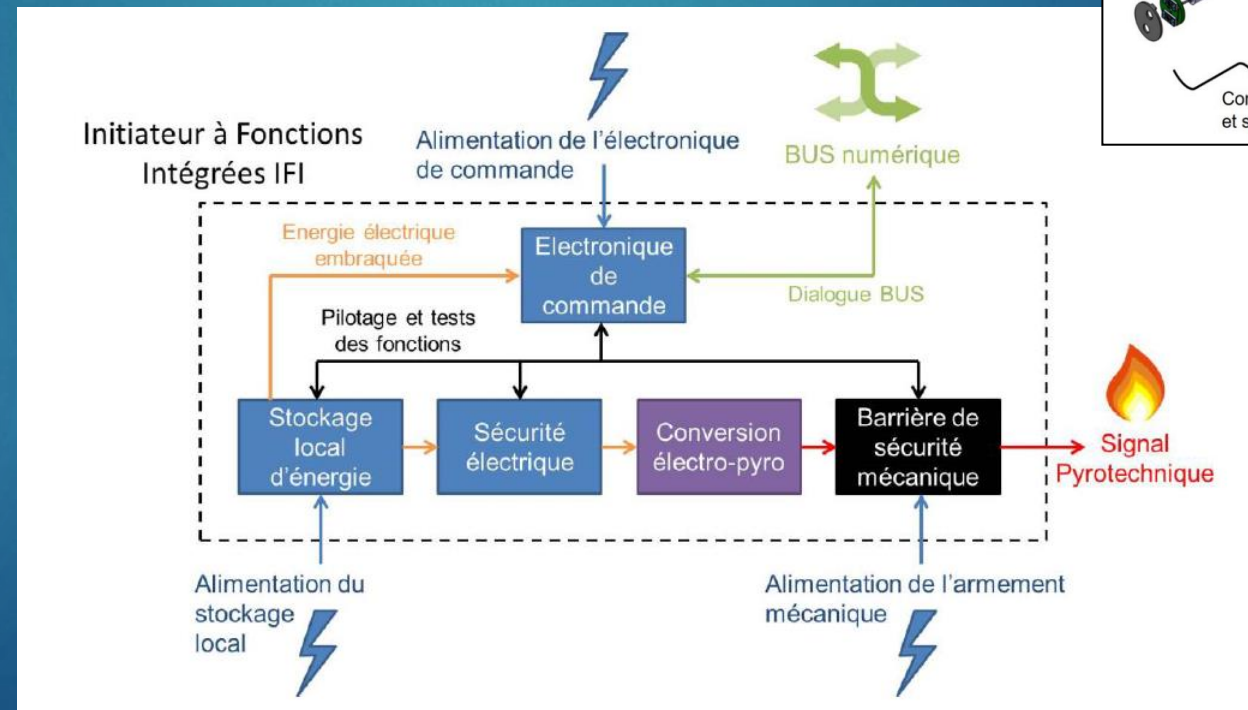
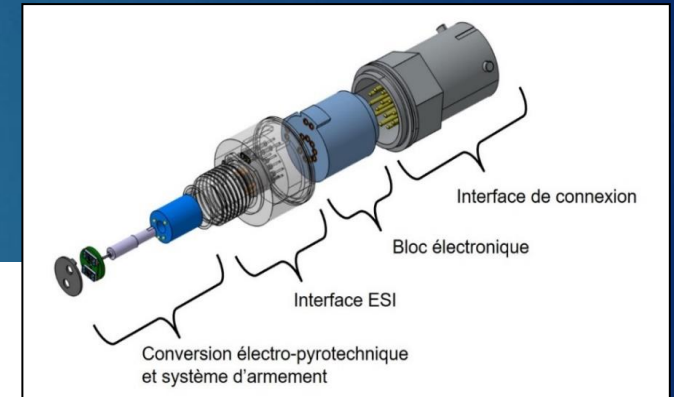


## / APPLICATIONS

- ▶ Feux d'artifices
- ▶ Mines et carrières/ destruction
- ▶ Automobile
- ▶ Aéronautique
- ▶ Munition
- ▶ Spatial

### Initiateur à Fonctions Intégrées (Dassault Aviation)

- Communication système par bus numérique
- Surveillance fonctionnelle cyclique
- Barrière de sécurité mécanique intégrée
- Stockage local d'énergie de mise à feu
- Adressage automatique des fonctions terminales

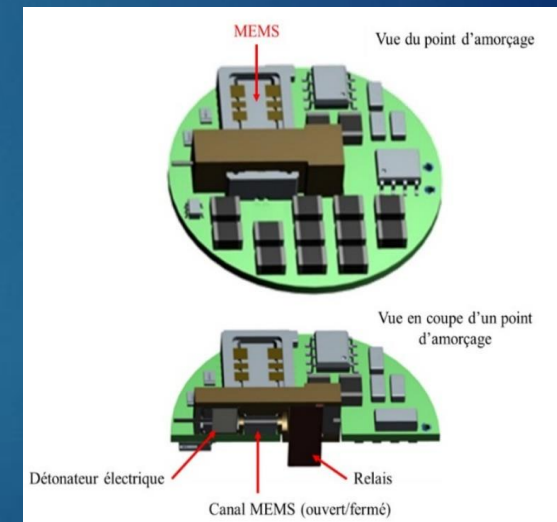
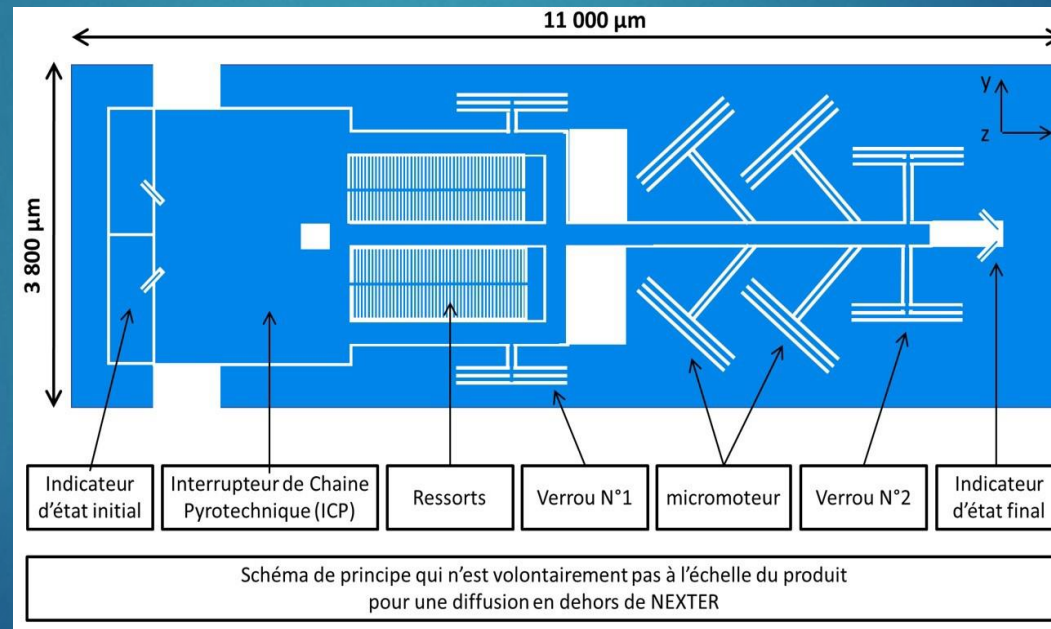


## / APPLICATIONS

- ▶ Feux d'artifices
- ▶ Mines et carrières/ destruction
- ▶ Automobile
- ▶ Aéronautique
- ▶ Munition
- ▶ Spatial

### Fusée multimode multi points d'amorçage (KNDS Ammo)

- Adressage de l'initiation multipoints par bus numérique
- Barrière mécanique à technologie Mems
- Miniaturisation extrême

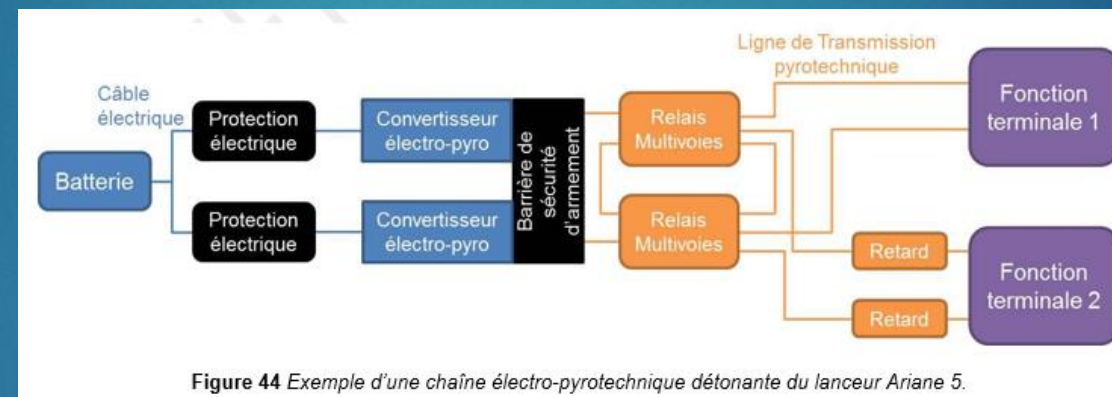


## / APPLICATIONS

- ▶ Feux d'artifices
- ▶ Mines et carrières/ destruction
- ▶ Automobile
- ▶ Aéronautique
- ▶ Munition
- ▶ Spatial

Projets spatiaux, lanceur, satellite (Ariane Group, Dassault Aviation)

- Des chaînes pyrotechniques redondées,
- Des sécurités mécaniques, électriques, numériques, optiques en amont des fonctions terminales
- Une intelligence centralisée au niveau lanceur



**New !** Les projets futurs réinventent ces architectures :

- Des chaînes opto-pyrotechniques ou pyro-numériques capables d'initiations multiples séquencées très précisément
- Des fonctions de sécurité et de l'intelligence au plus près des fonctions terminales
- Des chaînes pyrotechniques sans explosif primaire

## / INITIATION SECURISEE ET INTELLIGENTE : FACTEURS D'INNOVATION ET PERSPECTIVES

### ► Contraintes réglementaires dans l'initiation

#### ❖ Reach (Restriction, Evaluation, Autorisation of Chemicals)

- **Règlement (CE) n°2006/1907**: Protection de la santé et de l'environnement contre les substances les plus à risque
- L'initiation requiert des matériaux sensibles et stables (plombs, sels de plomb, chromate) ciblés par Reach
- Trouver des alternatives à ces substances historiques est un vrai défi

#### ❖ ROHS (Restriction of Hazardous Substances)

- **Directives 2011/65/CE (ROHS1) & 2017/2102/CE (ROHS2)**: Limitation d'utilisation de substances dangereuses dans les **équipements Électriques et Électroniques**
- **Directive 2012/19/CE** : **déchets** d'équipements Électriques et électroniques (DEEE)

#### ❖ Démantèlement

- Dépollution des sols, gestion des effluents → surveillée par les autorités
- Choix de conception en initiation compatibles des méthodes écologiques ( plantes, champignons, bactéries,..)
- Eco-conception et produits up-cyclables (démarche cradle to cradle : zéro déchet)

Interdits ou candidats	Alternatives étudiées
<ul style="list-style-type: none"><li>✓ Azoture de plomb</li><li>✓ Styphnate de plomb,</li><li>✓ Monoxyde de plomb,</li><li>✓ Plomb</li><li>✓ Tetroxyde de plomb,</li><li>✓ Chromate de plomb</li><li>✓ Dichromate de potassium et d'ammonium,</li><li>✓ Dibutylphtalate</li><li>✓ Dinitrotoluène</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>○ Azoture d'argent</li><li>○ DDNP (Diazodinitrophenol)</li><li>○ ZPP (Zirconium-Perchlorate de potassium)</li><li>○ SINTOX (Chlorate de potassium-sulfure d'antimoine)</li><li>○ NSTEX (thermite+ explosif secondaire)</li><li>○ Pyromems, nanothermite, ...</li></ul>

Interdits ou limités	Alternatives étudiées
<ul style="list-style-type: none"><li>✓ Cadmium</li><li>✓ Plomb</li><li>✓ Mercure</li><li>✓ Chrome hexavalent</li><li>✓ PBB (Polybrominated Biphenyls)</li><li>✓ PBDE (Polybrominated Diphenyls Ethers)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>○ Exemption défense (plomb et cadmium)</li><li>○ Exemption usage civil jusqu'en avril 2026</li></ul>

## / INITIATION SECURISEE ET INTELLIGENTE : FACTEURS D'INNOVATION ET PERSPECTIVES

### ► Réduction de masse du système d'allumage

- ❖ Miniaturisation des composants des chaînes pyrotechniques
  - Usage de nano matériaux énergétiques pour la fonction initiation
  - Intégration de barrières de sécurité plus petites
  - Réduction du poids des batteries
- ❖ Réduction des réseaux filaires :
  - Réduction de masse : lignes pyro remplacées par de la fibre optique ou un bus numérique
  - Vers l'usage du sans fil pour la transmission longue distance

## / INITIATION SECURISEE ET INTELLIGENTE : FACTEURS D'INNOVATION ET PERSPECTIVES

### ► Sécurité et fiabilité : des axes d'amélioration continue

- ❖ Utilisation de compositions moins sensibles
- ❖ Intégration d'une barrière ultime dans l'initiateur (IFI, MEMS)
- ❖ Rendre moins vulnérable aux agressions environnementales (foudre, ES, friction, vibration, choc, EM)
- ❖ Augmentation de la robustesse notamment en limitant le nombre de composants
- ❖ Intégration de fonctions de communication par l'apport de l'électronique et/ou de l'optique
- ❖ Contrôlabilité de l'intégrité de la chaîne : par auto-testabilité, par détection d'un nouveau composant dans la chaîne et/ou dès détection d'un nouvel ordre, par le contrôle continu des ordres et positions (exemple de l'IFI, géolocalisation)

## / BIBLIOGRAPHIE

[R1]	Simulation, conception et réalisation d'un commutateur en technologie microsystème pour dispositifs logiques sécuritaires, François Conseil, 2004, Thèse, Lille 1
[R2]	La micropyrotechnie sur silicium et l'intégration microsystèmes, Carole Rossi, 13 mars 2006, Thèse HDR
[R3]	Conception des Circuits Microélectroniques et Microsystèmes, Pierre Pennarun, 23 Octobre 2006, Thèse CNRS
[R4]	Conception et réalisation d'un microsystème d'initiation pyrotechnique intelligent et sécurisé pour applications spatiales, Guillaume Taton, 16 décembre 2013j Thèse, Toulouse 3
[R5]	Digital integrated pyrotechnic system, Laurent Renaud, 4 juillet 2013, Présentation à Congrès
[R6]	Conception et développement d'un micro détonateur électrique intégrant des nanothermites pour l'amorçage par impact d'explosifs secondaires, Ludovic Glavier, 13 janvier 2017, Thèse, Toulouse
[R7]	Dictionnaire de la Pyrotechnie, GTPS, 2016 (Edition 7),
[R8]	Pyrotechnie d'initiation – Explosifs Composants procédés, Jean-René Duguet, 2008
[R9]	De l'étude de l'initiation de nanolaminés réactifs Al/CuO par point chaud à l'intégration de pyroMEMS pour la sécurité, Andrea Nicollet, 2019, Thèse HAL, LASS –NEO, Rapport LAAS n°1842
[R10]	Conception et intégration en technologie MEMS d'une micro amorce sécurisée, Helène Pezous, 2002
[R11]	Présentation du système de fusée multi-modes multi-points d'amorçage (MMA) intégrant la technologie MEMS (ref : 6307 83502492), Laurent Reynard, 28/04/2023, KNDS Ammo
[R12]	Etat de l'art de la technologie optopyrotechnique, GTPS, 2011 (Edition 1)

Merci !

Vos questions ?

Joëlle PINCHOT

[joelle.pinchot@etienne-lacroix.com](mailto:joelle.pinchot@etienne-lacroix.com)

Ludovic GLAVIER

[ludovic.glavier@ariane.group](mailto:ludovic.glavier@ariane.group)