Allumage et combustion de matériaux énergétiques et de poussières métalliques

Léo Courty

Laboratoire PRISME - Axe Combustion-Explosions

IUT de Bourges

Journées Techniques du GTPS

Joué-lès-Tours

26 novembre 2024

Sommaire

- ✓ **Introduction : l'axe Combustion-Explosions (CE) du laboratoire PRISME**
- ✓ **Allumage et combustion d'un grain de poudres propulsives**
- ✓ **Allumage et combustion de compositions pyrotechniques**
- ✓ **Etudes sur l'explosibilité de poussières métalliques**
- ✓ **Conclusion**

Introduction : l'axe CE (1/2)

- ✓ **Combustion-Explosions**

- ✓ **Objectifs scientifiques :** comprendre les phénomènes pouvant amener un système réactif à s'enflammer et à exploser
  - ➢ Depuis le **matériau** : solide, poussières, liquide, gaz, aérosol, etc.
  - ➢ Jusqu'aux **effets** (thermiques et mécaniques) et à l'**extinction**
  - ➢ Pour différentes sources d'**amorçage** (laser, étincelle, température, …)
  - ➢ En passant par la **propagation** (déflagration, détonation, feu)
  - ➢ Grâce à différentes **analyses** (produits de décomposition, gaz brûlés, …)

- ✓ **À Bourges, sur 2 sites : IUT (U.O.) et INSA**

Introduction : l'axe CE (2/2)

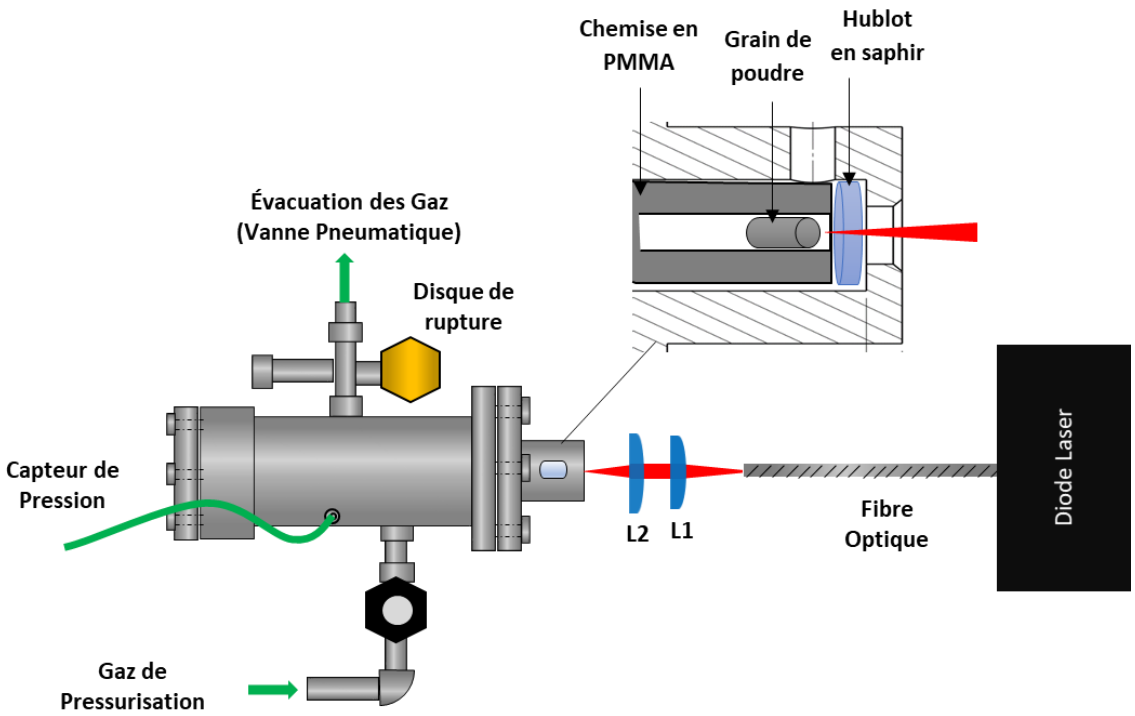
- ✓ **Trois thématiques de recherche :**
  - Allumage des explosions en phase solide (combustion hétérogène, matériaux énergétiques, explosions de poussières)
  - Compréhension des mécanismes des explosions et leurs effets
  - Perméation, pyrolyse, combustion, feux, extinction
- ✓ **12 membres permanents**
- ✓ **Doctorants, ingénieurs, post-doctorants**
- ✓ **Moyens expérimentaux lourds et numériques**

Poudres propulsives (1/9)

- ✓ Poudres propulsives « commerciales » et « de laboratoire »
- ✓ Etudes expérimentales réalisées dans un **bâtiment habilité**
- ✓ **Habilitation pyrotechnique unique** pour un laboratoire académique
- ✓ Trouver les conditions entrainant un **allumage sûr et une combustion contrôlée** des poudres propulsives à vulnérabilité réduite
- ✓ Cinétique globale d'allumage : **analyse thermique**
- ✓ Caractéristiques allumage et combustion : **réacteur** à volume fermé
- ✓ Apports numériques avec un code commercial (COMSOL)

Poudres propulsives (2/9)

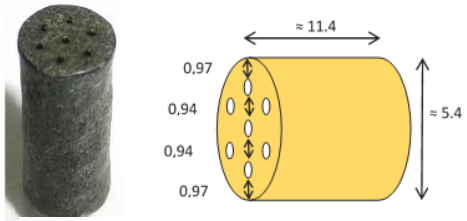
- ✓ **Poudres propulsives** à sensibilité réduite
- ✓ Système d'allumage : **diode laser**
- ✓ Réacteur **LILOVEM**



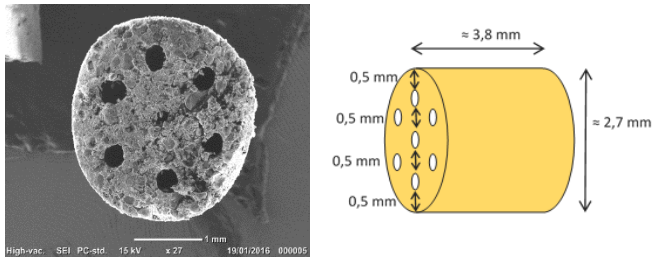
Poudres propulsives (3/9)

✓ **Deux types de poudres étudiées : commerciales et de laboratoire**

- Poudres commerciales (ArianeGroup)



98 % NC
1,2 % diphénylamine
m = 355 mg

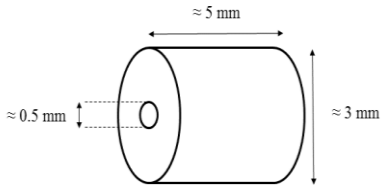


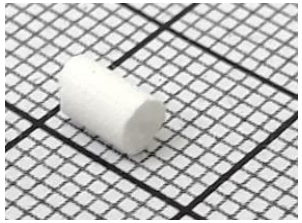
84 % RDX
16 % liant, principalement PBHT
m = 26 mg

- Poudres de laboratoire (ISL)

Trois compositions différentes :

- 94,7 % RDX – 5 % NC – 0,3 % Centralite I (95-5)
- 89,7 % RDX – 10 % NC – 0,3 % Centralite I (90-10)
- 84,7 % RDX – 15 % NC – 0,3 % Centralite I (85-15)





m = 40 mg

Poudres propulsives (4/9)

✓ Paramètres étudiés

- **Composition** des poudres
- **Atmosphère** gazeuse

Azote, Argon, Air synthétique

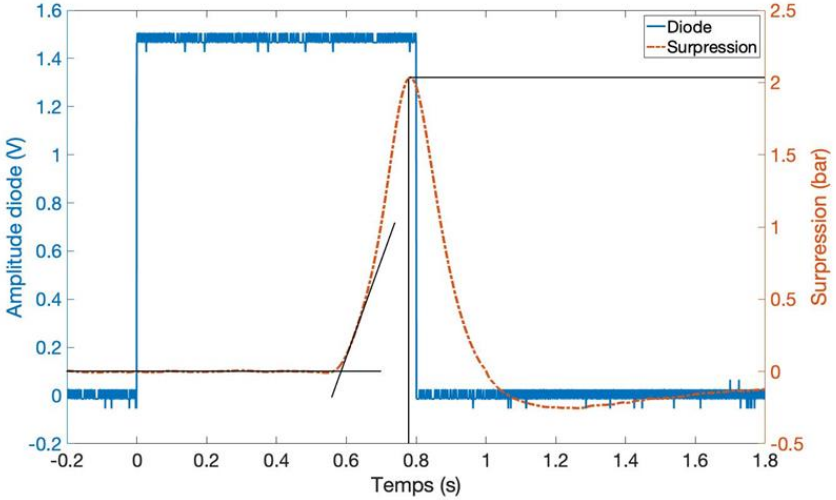
- **Pression** initiale

Entre 10 et 70 bars

- **Puissance** laser

Entre 1,42 W et 10 W

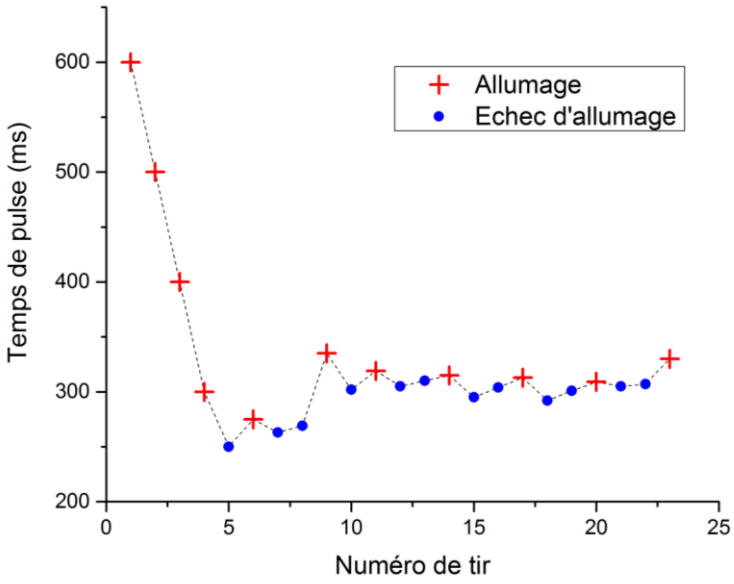
✓ Grandeurs obtenues



- Surpression max : $\frac{\Delta Pmax}{m}$
- Vitesse maximale de montée en pression : $\frac{1}{m}.\left(\frac{d(\Delta P)}{dt}\right)_{max}$
- Délai d'allumage : t_i
- Seuils d'allumage à 50 % de réussite (E_{50})

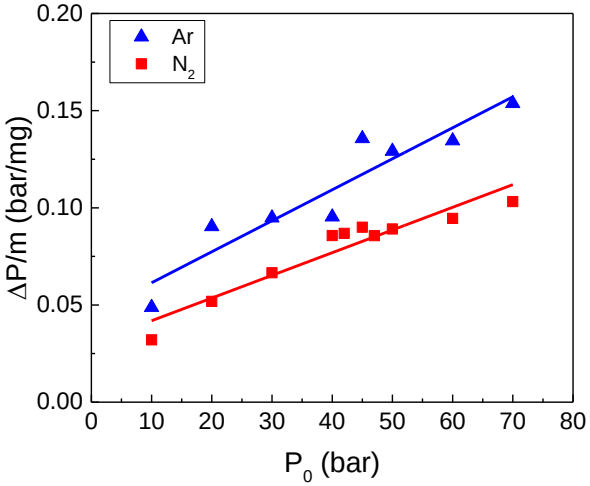
Poudres propulsives (5/9)

- ✓ **Énergies d'allumage**
- ✓ Seuils d'allumage **à 50 % de réussite (E_{50})**
- ✓ Pour une puissance laser fixée, une pression initiale et une atmosphère de pressurisation
- ✓ **Méthode de Langlie**

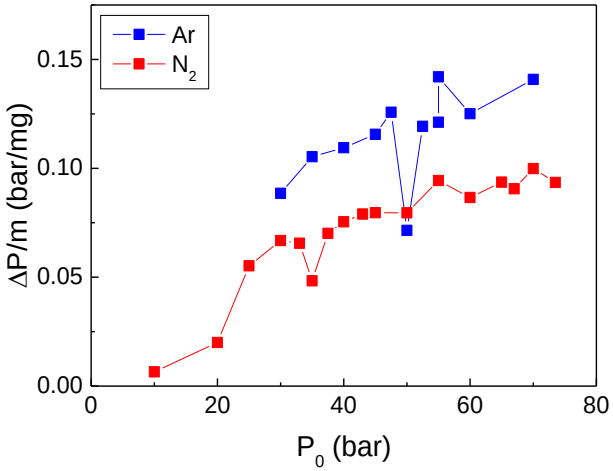


Poudres propulsives (6/9)

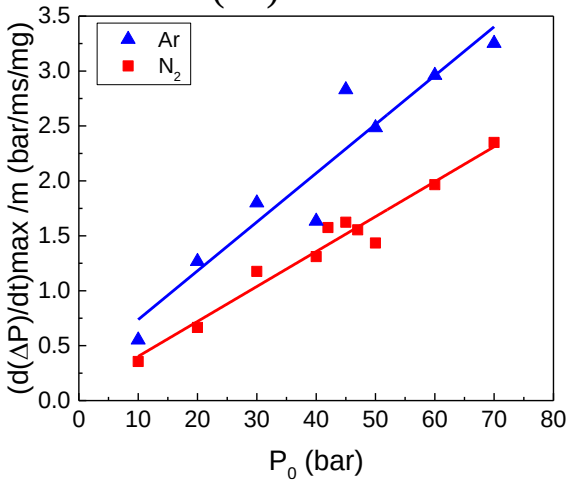
✓ Poudres commerciales : effet de la pression initiale



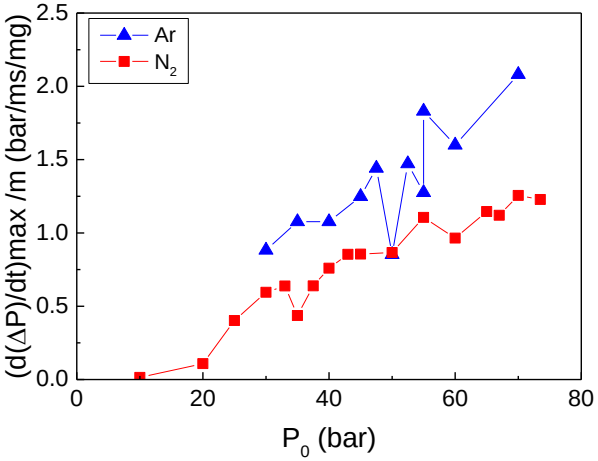
(P1)



(P2)



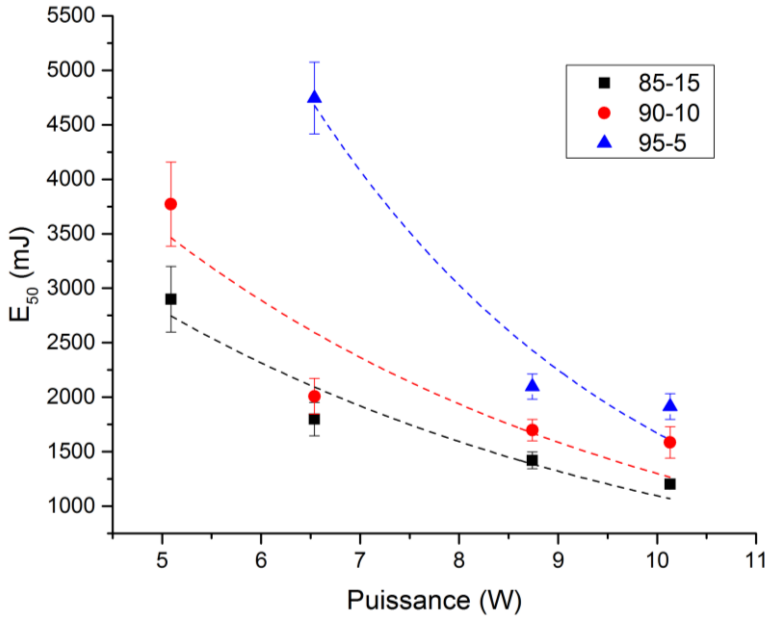
(P1)

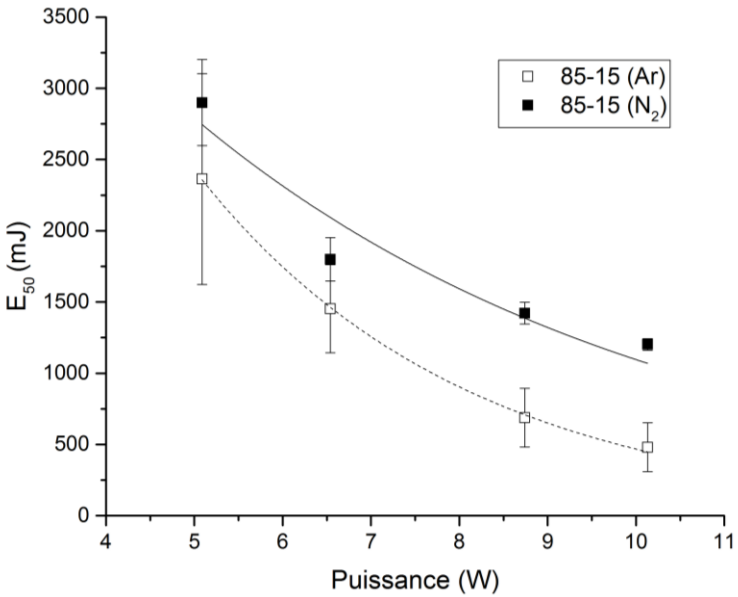


(P2)

Poudres propulsives (7/9)

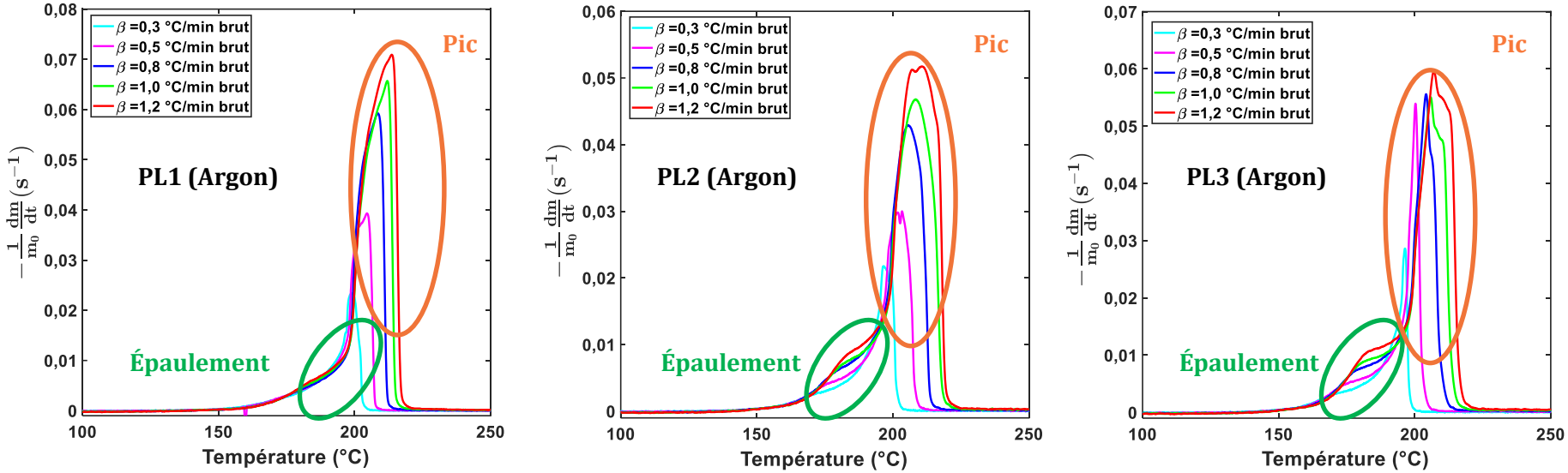
✓ Poudres de laboratoire : énergies d'allumage





- Énergies d'allumage fortement impactées par la puissance du laser.
- Écart-type diminue avec l'augmentation de la puissance.

Poudres propulsives (8/9)



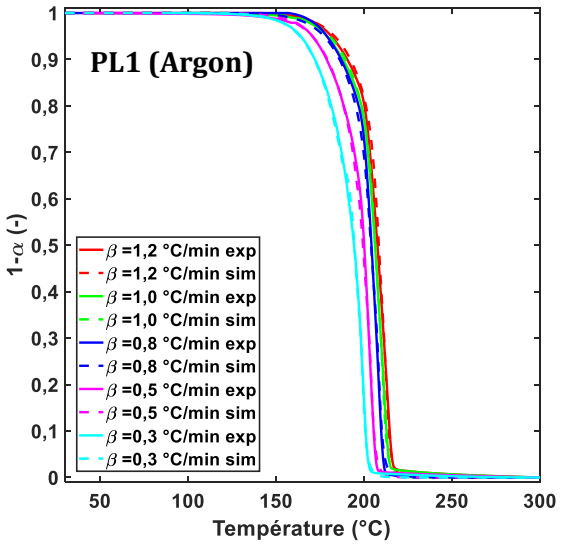
Résultats expérimentaux **d'analyse thermique** (ATG)

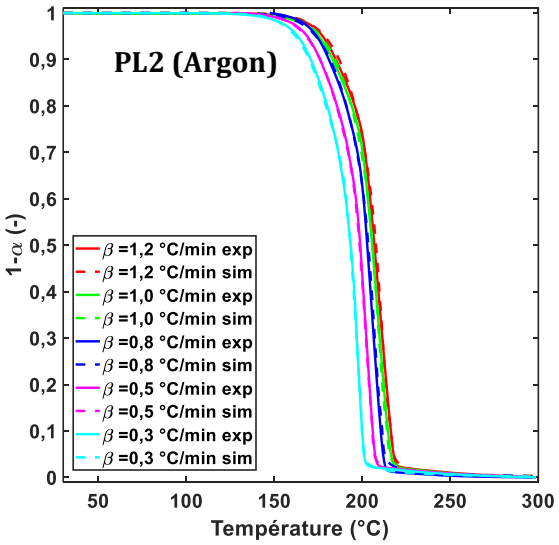
- Épaulement + pic : 2 étapes cinétiques minimum
  - Épaulement associé à la décomposition de la NC, pic à celle du RDX
- Pic principal asymétrique : superposition d'au moins 2 pics

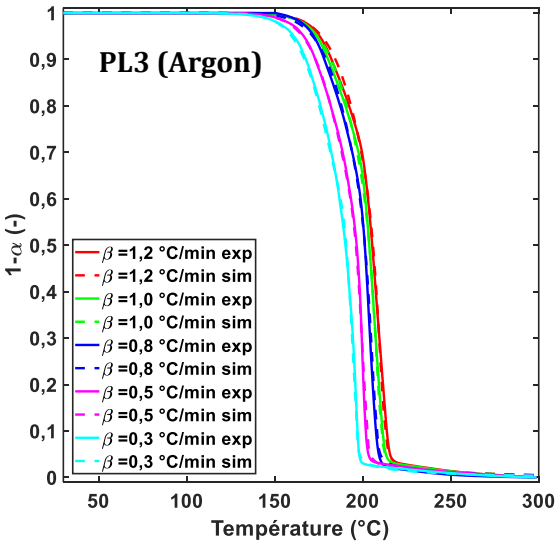
→ 3 étapes : 1 NC et 2 RDX

Poudres propulsives (9/9)

- Modélisation de la **dégradation thermique** de la phase solide
- Obtention des **paramètres cinétiques** globaux
- Comparaison modèle - expérience







Compositions pyrotechniques (1/7)

- **Mélange granulaire** composé d'au moins un oxydant et un réducteur permettant d'obtenir un effet spécifique.

- **Vitesse de combustion** dépend de nombreux paramètres : nature des composés, présence de liant, taille et forme des grains, richesse, atmosphère, porosité, …

- Thèse CIFRE 2021 - Compositions étudiées :

  - Composées d'un oxydant SrO_2, d'un réducteur Mg et d'un liant DNAN.
  - Dix ratios ox/red étudiés, de 50 % à 90 %.
  - Pour deux taux de liant, 5 et 10 %.
  - Et pour trois classes granulométriques du réducteur métallique :

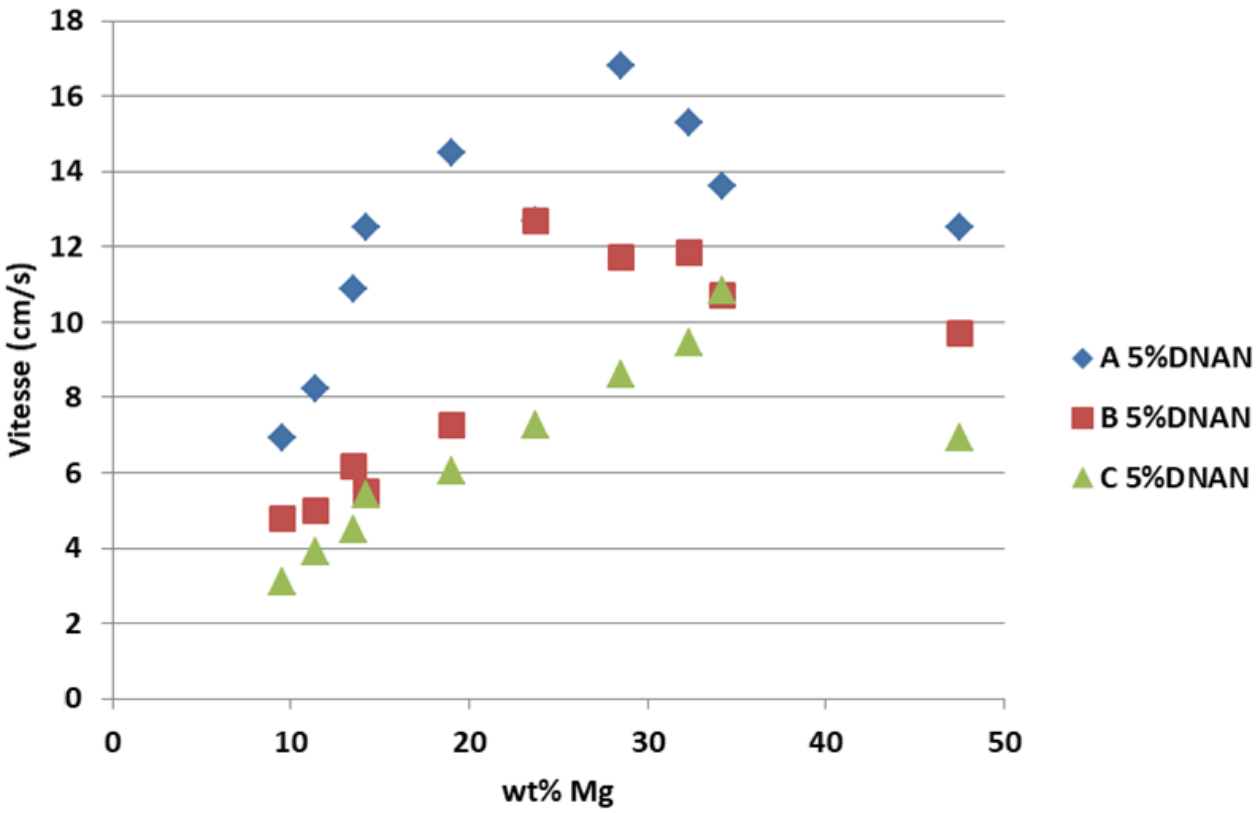
    $140\ \mu m < A < 200\ \mu m$

    $200\ \mu m < B < 250\ \mu m$

    $250\ \mu m < C < 300\ \mu m$

Compositions pyrotechniques (2/7)

- ✓ Première étude sur poudre foisonnante
- ✓ Mesure de la vitesse de combustion **en gouttière**



Compositions pyrotechniques (3/7)

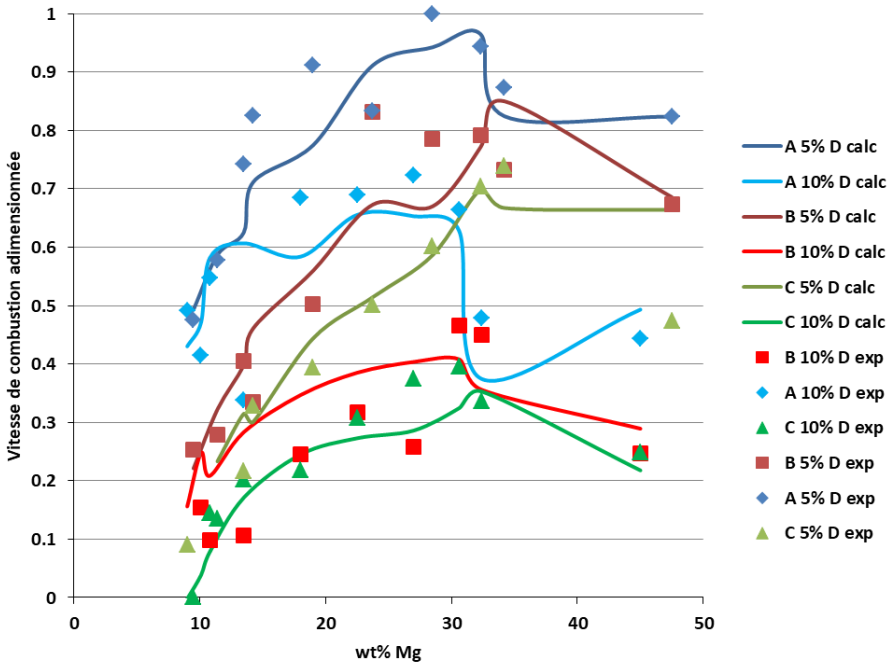
- Trois nombres sans dimension obtenus (analyse dimensionnelle à l'aide du théorème de Vaschy-Buckingham) + richesse mélanges binaires :

$$\frac{e_f}{D_{50}}, \frac{\rho_{app}}{\rho_{th}}, \frac{\lambda}{\sqrt{Q}\cdot D_{50}\cdot Cp\cdot \rho_{app}} = \frac{\alpha}{\sqrt{Q}\cdot D_{50}}, \Phi_1(SrO_2/DNAN) \text{ et } \Phi_2(Mg/DNAN)\cdot$$

- Régressions multilinéaires

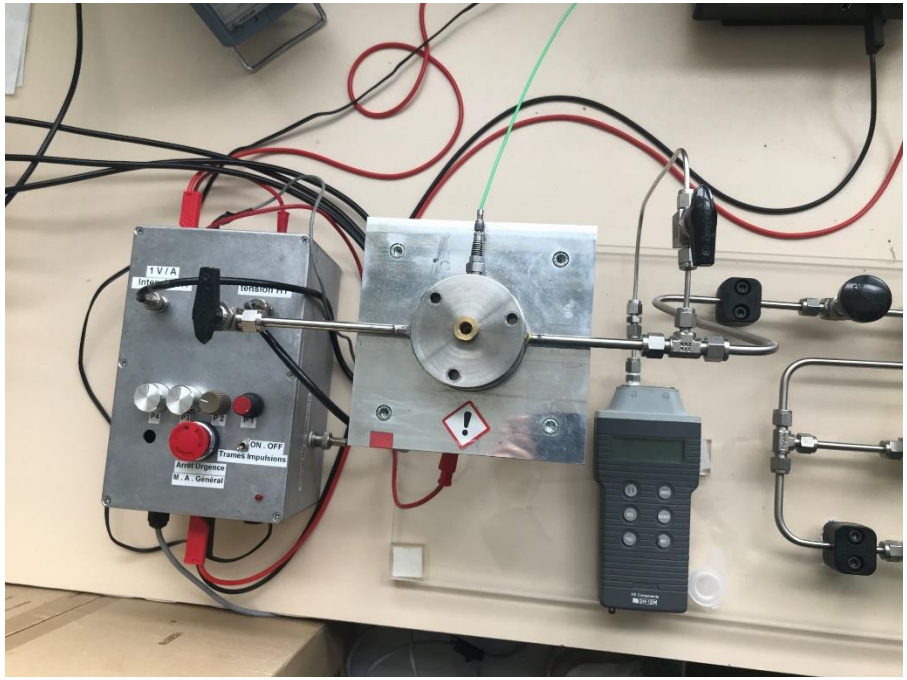
R2		b	N	ρapp/ρth	Φ1	Φ2
0.871	Ni	-7.58790	-0.64441	-13.87073	-1.14322	-0.07072
N1	N			-1.14040	-0.04116	-0.02095
N2	ρapp/ρth				-0.83127	0.18566
N3	Φ1					-0.18079
N4	Φ2					

- Comparaison des vitesses expérimentales et calculées par régression



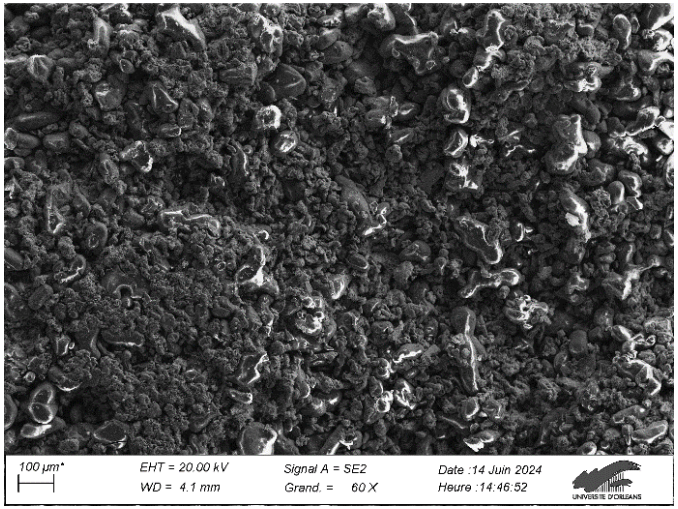
Compositions pyrotechniques (4/7)

- ✓ Nouvelles études sur **composition comprimée**
- ✓ Réacteur (allumage électrique) permettant de contrôler atmosphère et énergie d'allumage
- ✓ En milieu ouvert, possibilité de suivre l'évolution du front de flamme
- ✓ Comprimés : mesures possibles des **propriétés thermiques**

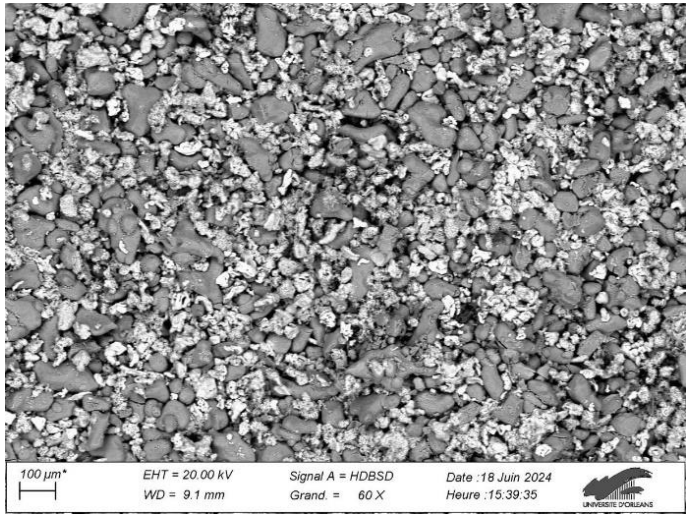


Compositions pyrotechniques (5/7)

- ✓ Travaux récents sur un **code de combustion** des compositions pyrotechniques initialisé par analyse d'images
- ✓ Compositions Fe/$KClO_4$
- ✓ Obtention d'images où il est possible d'identifier 3 constituants (MEB avec 2 détecteurs)



Détecteur d'électrons secondaires



Détecteur d'électrons rétrodiffusés

- ✓ Modélisation de la combustion en phase condensée

Compositions pyrotechniques (6/7)

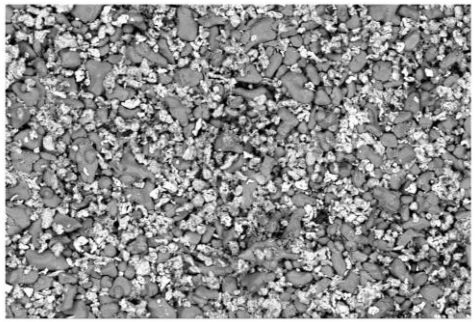
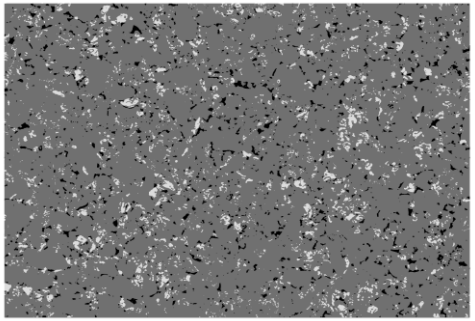
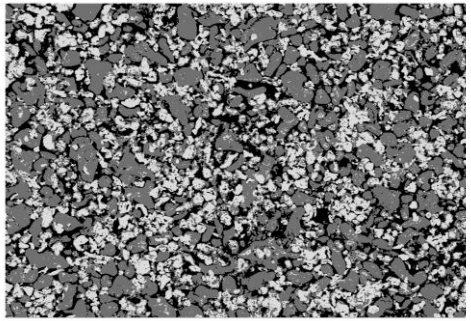


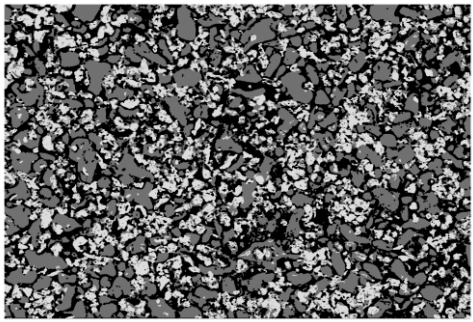
Image MEB



Seuillage



K-means



Reconstruction

- Calcul de diffusivité thermique par simulation numérique :

Différence de température est appliquée entre la face supérieure et la face inférieure du domaine; flux calculé en sortie de l'échantillon ; diffusivité calculée grâce au temps d'inflexion du flux :

$$\alpha_{num} = 0{,}0918 \times \frac{L^2}{t_{infl}}$$

- Mesure de diffusivité par Hotdisk

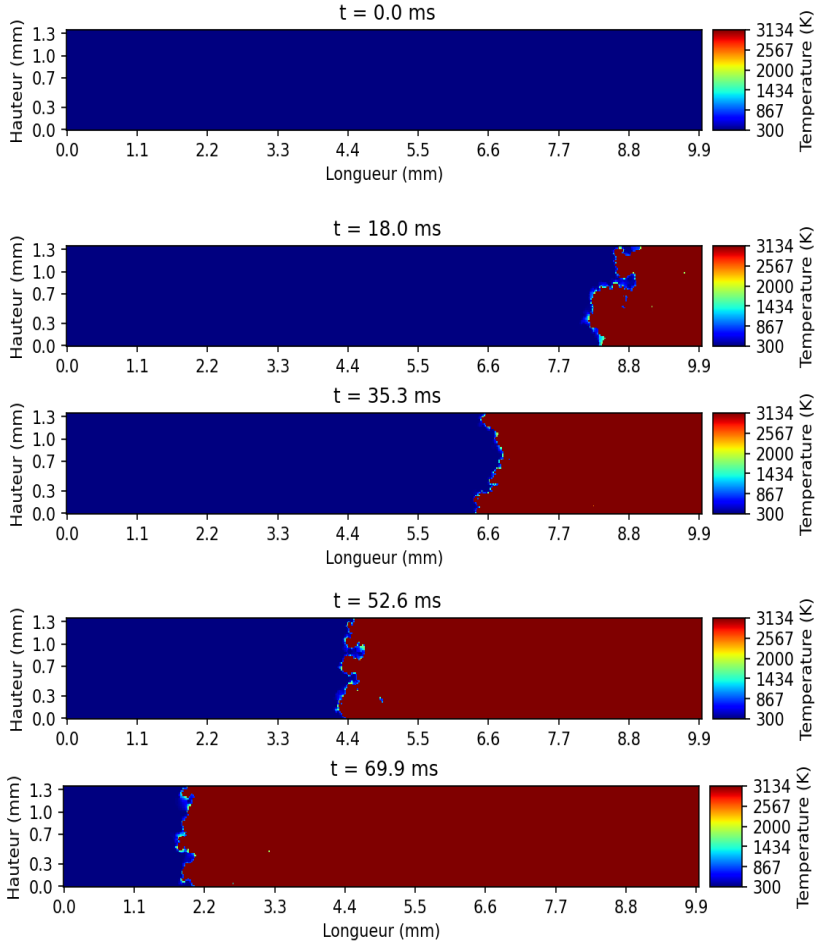
$$\alpha_{mesurée} = 0{,}32 \times 10^{-6}\ m^2.s^{-1}$$

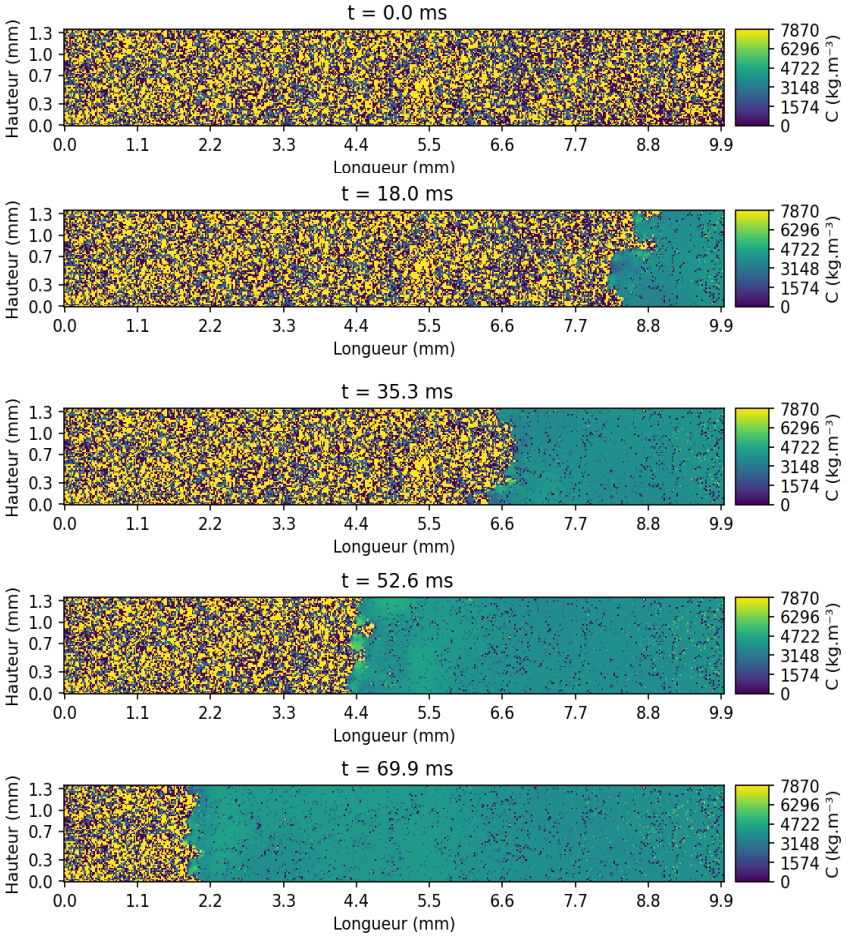
- Diffusivité simulée

$$\alpha_{num} = 0{,}36 \times 10^{-6}\ m^2.s^{-1}$$

Compositions pyrotechniques (7/7)

✓ Résultats de simulation





Explosions de poussières (1/3)

- ✓ **Explosibilité de mélanges réactifs à base de poudres métalliques en suspension dans l'air**
- ✓ Dispositifs expérimentaux : mesure des paramètres de sensibilité et de sévérité
- ✓ Tube de Hartmann : paramètres de **sensibilité** à l'allumage (EMI)
- ✓ Paramètres influents : granulométrie, richesse du mélange
- ✓ Domaine d'application : atelier de fabrication additive

Explosions de poussières (2/3)

✓ Paramètres de sévérité : bombe sphérique de 20 L

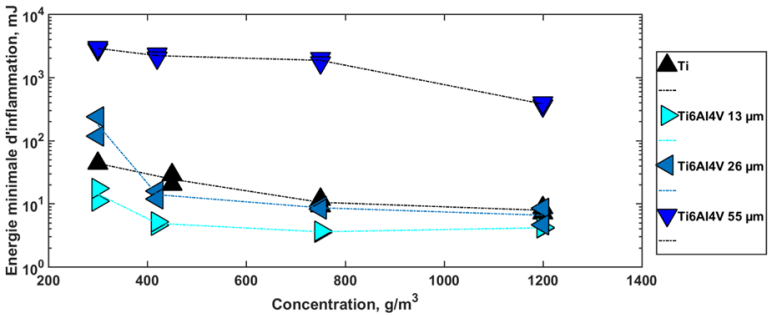
- Pression maximale d'explosion $\mathbf{P_{max}}$
- **Vitesse maximale** de montée en pression $\mathbf{(dP/dt)_{max}}$

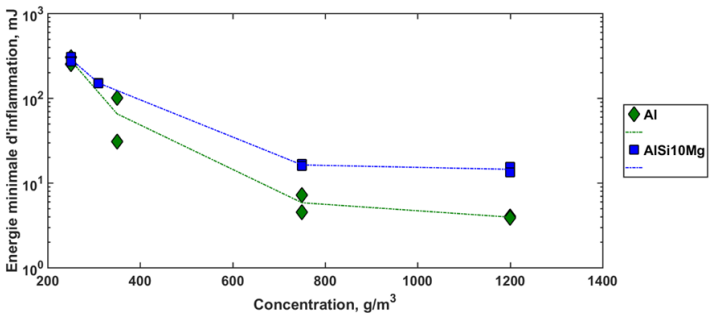
✓ Modélisation numérique d'écoulement diphasique solide-gaz

- Caractérisation de la concentration en particules et de leurs champs de vitesse
- Validation avec les dispositifs expérimentaux
- Paramètres influents : conditions d'injection, nature et taille des particules

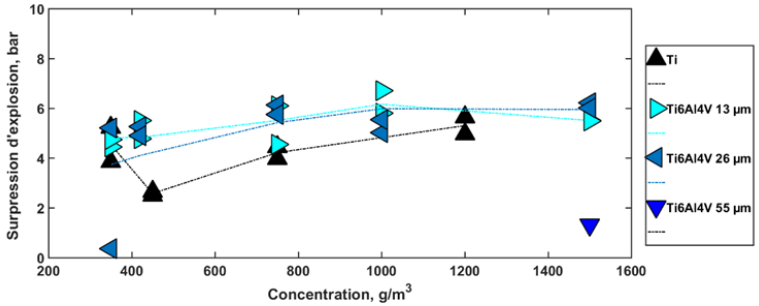
Explosions de poussières (3/3)

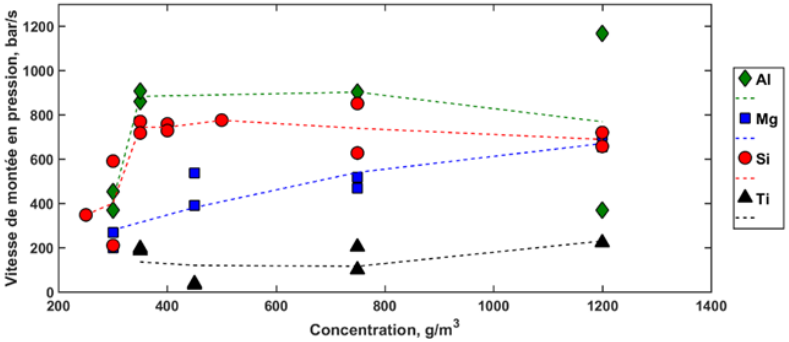
✓ Sensibilité à l'allumage





✓ Sévérité d'explosion

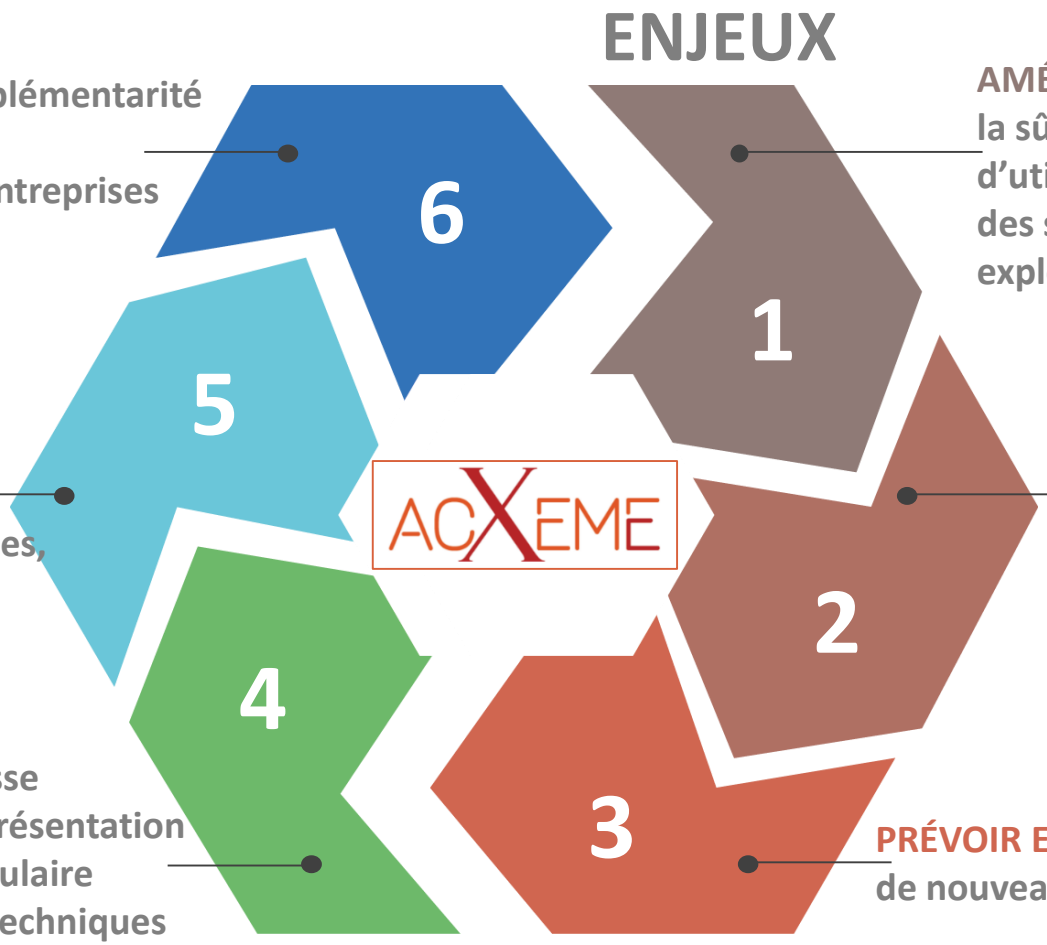




✓ Température de particules par pyrométrie bicolore

Conclusion (1/2)

✓ Chaire industrielle ANR ACXEME : un projet structurant



S'APPUYER sur la complémentarité des expertises monde académique/entreprises depuis 50 ans

AMÉLIORER la sûreté et la fiabilité d'utilisation des systèmes énergétiques, explosifs ou propulsifs

RÉALISER un interfaçage disciplinaire accru entre l'énergétique, la dynamique des systèmes, la vision et les méthodes inverses

PERFECTIONNER la qualité de prédiction de l'allumage et du déroulement de la combustion

AMÉLIORER la finesse et le spectre de représentation de la structure granulaire des mélanges pyrotechniques

PRÉVOIR ET OPTIMISER la recherche de nouveaux matériaux (REACH)

Conclusion (2/2)

- ✓ Recherche **partenariale** mais sur des sujets assez **fondamentaux**
- ✓ Obtention de **nombreuses données** expérimentales => actuellement développement de **modèles** avec des codes commerciaux
- ✓ Elargissement à l'enseignement de ces thématiques avec le **Campus Pyrotechnie du Futur**
- ✓ Ouverture en 2024 d'un **parcours « Pyro »** pour le BUT GMP à l'IUT de Bourges

MERCI POUR VOTRE ATTENTION

leo.courty@univ-orleans.fr

La chaire industrielle ACXEME

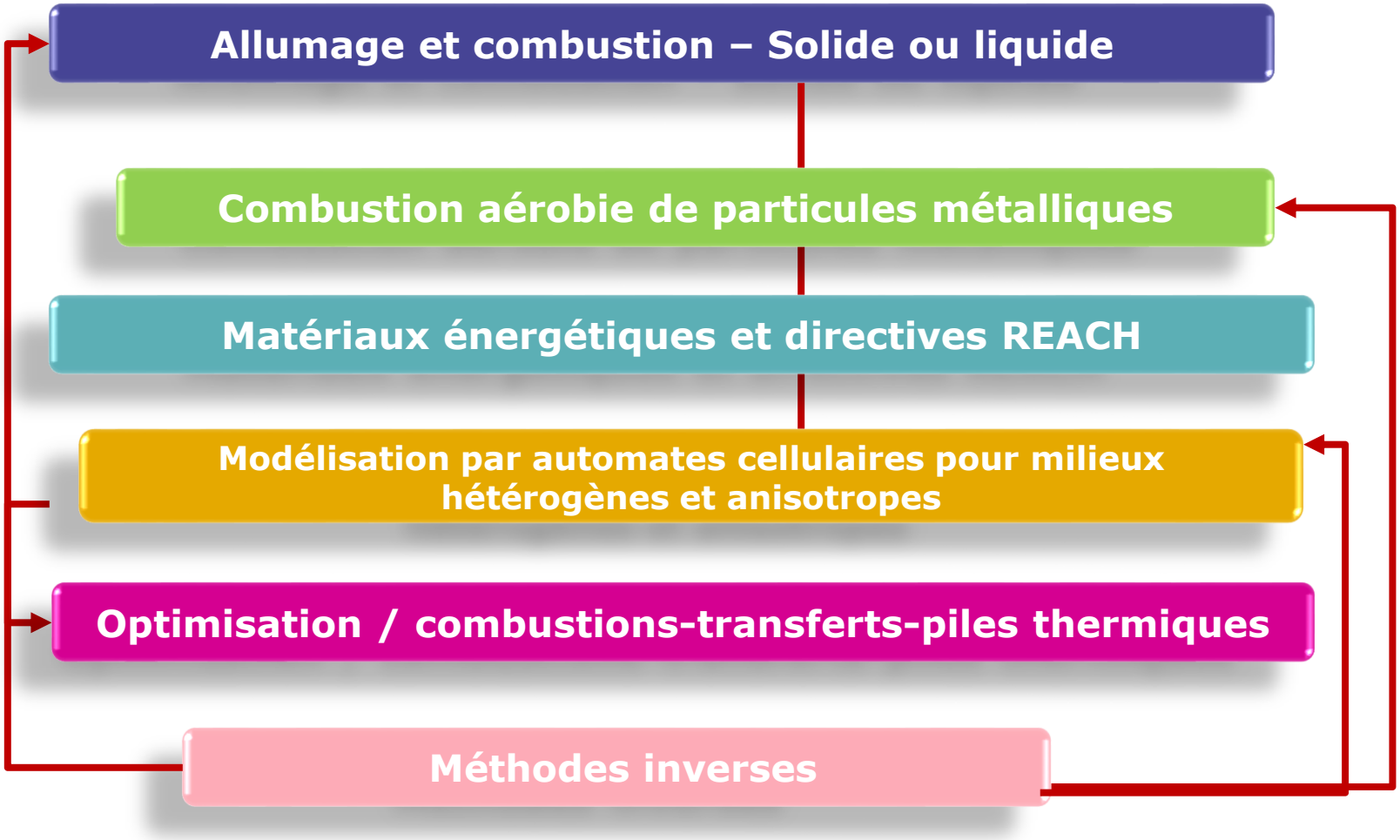
ACXEME

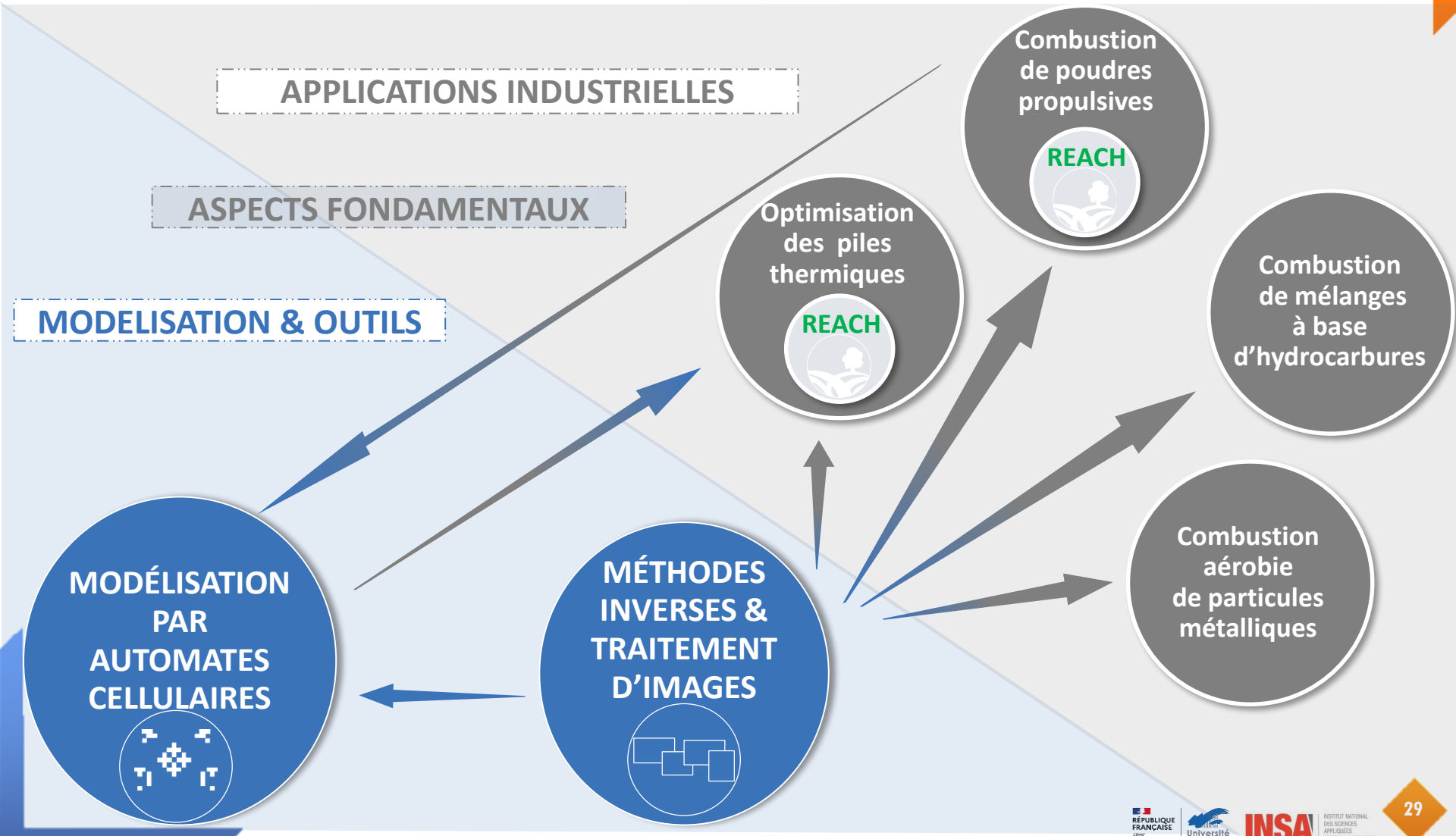
A llumage
C ombustion
E X plosion
E nvironnement &
M atériaux
E nergétiques

- Projet lauréat de l'AAP Chaires industrielles ANR 2019
- Porté par un enseignant-chercheur de l'IUT de Bourges
- Financement à parité entre l'ANR et les trois industriels partenaires

La chaire industrielle ACXEME

✓ Programme scientifique



La chaire industrielle ACXEME

✓ Thématiques et interactions