

**PROPOSITION DE SUJET DE THESE**

**Intitulé : Meilleure modélisation de la combustion de l'aluminium en propulsion solide à l'aide d'exploitation de données expérimentales par deep learning**

Référence : **MFE-DMPE-2023-07**  
(à rappeler dans toute correspondance)

**Début de la thèse** : octobre 2023

**Date limite de candidature** : mars 2023

**Mots clés**

Propulsion fusée, propergol solide, aluminium, combustion, analyse d'images, réseau de neurone convolutif, apprentissage profond

**Profil et compétences recherchées**

Connaissances en combustion, écoulements diphasiques, simulation numérique.

Le sujet nécessite un goût prononcé pour le traitement du signal et d'images expérimentales. Ce traitement impliquera l'utilisation d'outils d'apprentissage profond (réseau de neurones convolutif), mis en œuvre à l'aide de scripts Python.

**Présentation du projet doctoral, contexte et objectif**

Pour la propulsion fusée, l'aluminium est inclus dans les compositions de propergol solide composite car il améliore les performances (+10% en poussée). Mais la combustion de l'aluminium peut avoir un impact négatif, comme source d'oscillations de pression dans les propulseurs solides via le phénomène d'instabilité thermo-acoustique (ITHAC), encore mal prédit [1].

Des travaux effectués à l'ONERA ont permis de modéliser la combustion d'une goutte d'aluminium avec des modèles détaillés de transport moléculaire et de cinétique de surface [2]. Il s'agit de la combustion de gouttes liquides binaires (aluminium & calotte d'alumine) dans un environnement gazeux oxydant. Mais seuls des modèles réduits permettent de simuler des propulseurs réels complets. De tels modèles reposent sur des hypothèses fortes qui induisent des incertitudes, comme l'évolution de l'alumine formée en surface. La validation des modèles passe par des comparaisons avec des données expérimentales représentatives, par exemple l'ombroscopie haute cadence utilisée à l'ONERA. L'exploitation des images d'ombroscopie fournit déjà la taille et la vitesse des gouttes d'aluminium [3], mais des phénomènes physiques plus fins concernant le système binaire aluminium / alumine n'ont pas encore été quantifiés.

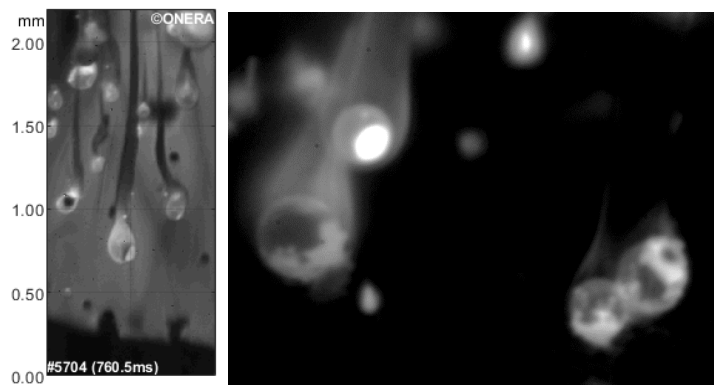


Figure 1. Images expérimentales d'ombroscopie montrant la combustion de gouttes d'aluminium en propulsion solide.

Le présent sujet de thèse vise à mieux caractériser les phénomènes survenant durant la combustion des gouttes d'aluminium en propulsion solide. Il permettra de mettre en place des comparaisons directes entre données expérimentales et simulations numériques. Ces différents aspects doivent permettre d'ajuster les modèles réduits de combustion d'aluminium.

L'exploitation de données expérimentales passera par l'utilisation de réseaux de neurones convolutifs (CNN) entraînés par apprentissage profond. Des outils ont déjà été développés dans des thèses précédentes à l'ONERA, utilisant les réseaux U-NET et MASK R-CNN [4], mais il s'agira

de raffiner les sorties fournies pour caractériser des phénomènes physiques fins. On s'intéressera ainsi à la formation de l'alumine en surface de la goutte ainsi qu'au mouvement propre de rotation de celle-ci au-dessus de la surface. Cela passera par le développement de nouveaux post-traitements des sorties des réseaux et de nouvelles approches d'apprentissage.

Ces nouveaux outils permettront d'estimer les grandeurs physiques d'intérêt à partir des bases de données d'images d'ombroscopie de l'ONERA. Il s'agira de quantifier les grandeurs caractéristiques de l'échauffement initial d'une goutte, de la dynamique de formation de l'alumine ou de la traînée des gouttes proches de la surface. Ces paramètres physiques seront étudiés pour différentes pressions et différentes compositions de propergols solides.

Les analyses conduiront à sélectionner des conditions d'intérêt pour lesquelles simuler la combustion d'une goutte d'aluminium isolée. Cette simulation sera réalisée avec le code CEDRE de l'ONERA avec ses capacités d'utilisation de maillages dynamiques. Cette méthode consiste à définir un maillage de référence fixe au cours du temps (ici, la surface du propergol solide en combustion et l'environnement gazeux), sur lequel s'appliquera le mouvement du corps mobile muni de son propre maillage. Le corps mobile correspondra ici au système binaire aluminium / alumine (goutte et calotte), permettant une évaluation précise du mouvement propre de la goutte, de sa traînée... Cette approche de maillage dynamique n'a été utilisée que récemment pour des gouttes à l'ONERA, et pas encore pour des gouttes binaires ; il permettra une comparaison directe des résultats numériques avec les analyses expérimentales.

Ainsi, en fin de thèse, des recommandations pourront être établies pour l'ajustement des modèles réduits de combustion des gouttes d'aluminium en propulsion solide. Ces recommandations prendront en compte les comparaisons entre calculs et mesures, ainsi que des études de sensibilité des modèles pour considérer les différentes sources d'incertitudes (étude d'erreur expérimentale, incertitude dans l'apprentissage des CNN...).

Ce sujet de thèse permet donc de participer à l'amélioration de modèles de combustion en intervenant sur toutes les étapes d'exploitation, depuis l'analyse de données expérimentales jusqu'à la réalisation de simulations numériques avancées. Le sujet impliquera le développement d'outils d'analyses de données (CNN, Python...) ainsi que l'utilisation de codes scientifiques de pointe pour la simulation numérique (CEDRE et ses solveurs). Ainsi, le sujet permettra une forte interaction avec différentes équipes de l'ONERA de Palaiseau, constituant une riche première expérience de recherche appliquée.

Références :

- [1] Orlandi O. et al. (2019) Aluminium droplets combustion and SRM instabilities, Acta Astronautica, 158, pp. 470-479.
- [2] Muller M. (2019) Modélisation de la combustion de gouttes d'aluminium dans les conditions d'un moteur fusée à propergol solide, Thèse de doctorat, Sorbonne université.
- [3] Devillers, R., et al. (2019). Experimental analysis of aluminum-droplet combustion in solid-propellant conditions using deep learning. In EUCASS 2019.
- [4] He, K., et al. (2017). Mask r-cnn. In Proceedings of the IEEE international conference on computer vision (pp. 2961-2969).

#### Collaborations envisagées

CNES

#### Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : Multi-Physique pour l'Energétique

Lieu (centre ONERA) : Palaiseau

**Contact** : Robin DEVILLERS

Tél. : 0180386037

Email : [robin.devillers@onera.fr](mailto:robin.devillers@onera.fr)

#### Directeur de thèse

Nom : Adrien CHAN-HON-TONG

Laboratoire : ONERA DTIS

Tél. : 0180386591

Email : [adrien.chan\\_hon\\_tong@onera.fr](mailto:adrien.chan_hon_tong@onera.fr)

Pour plus d'informations : <https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche>