

Soutenance de thèse

Thomas DECKER soutiendra sa thèse de doctorat, préparée au sein de l'équipe d'accueil doctoral ISAE-ONERA EDyF et intitulée «*Agglomération de l'aluminium dans les propergols solides: étude des phénomènes physiques associés par ombroscopie et simulation numérique*»

Le 04 avril 2024 à 14H00, 6 chemin de la Vauve aux Granges, Palaiseau

devant le jury composé de

M. Jérôme ANTHOINE	ONERA	Directeur de thèse
M. Robin DEVILLERS	ONERA	Codirecteur de thèse
M. Stany GALLIER	ArianeGroup	Codirecteur de thèse
M. Fabien HALTER	Université d'Orléans	Rapporteur
M. Jean-Bernard BLAISOT	Université de Rouen	Rapporteur
Mme Séverine BARBOSA	Université Aix-Marseille	Examinatrice
M. Filippo MAGGI	Politecnico di Milano	Examineur

Résumé : Les moteurs à propergol solide (MPS) sont couramment employés en propulsion civile et militaire. La plupart incorpore dans leur carburant des particules d'aluminium, sujettes à divers mécanismes physiques générant des agglomérats, gouttes contenant jusqu'à plusieurs centaines de particules initiales. Or, ces gouttes d'aluminium interagissent avec le gaz produit par combustion du propergol solide. Ces interactions peuvent réduire les performances ou induire des instabilités, néfastes pour la bonne utilisation du moteur. Ces interactions dépendent au premier ordre de la taille initiale des gouttes, il est donc primordial de prédire l'agglomération des particules d'aluminium dans les MPS. Les phénomènes physiques associés à l'agglomération sont peu compris et mal maîtrisés. Les modèles de la littérature sont simplifiés et incomplets par manque de caractérisations expérimentales des mécanismes causant l'agglomération, et des phénomènes physiques la limitant. Cette thèse vise à observer ces phénomènes physiques d'agglomération par des diagnostics expérimentaux précis et à les caractériser par des outils d'analyse d'images avancés. Le but est par ailleurs d'explicitier l'influence de paramètres comme la pression ou la granulométrie sur les mécanismes et phénomènes physiques impliqués. L'objectif final est la réalisation d'un modèle capable de prédire l'agglomération avec précision. Des compositions de propergol à particules inertes sont étudiées en premier lieu, car plus simples à étudier et permettant l'analyse précise de phénomènes physiques spécifiques tels que la formation d'agrégats. Pour cela, des mesures haute cadence d'ombroscopie sont réalisées. L'agrégation des particules inertes lors de la combustion du propergol solide est visualisée en détail, et analysée par de nouveaux algorithmes performants d'analyse d'image développés pour l'occasion. Il est montré que la taille des grains oxydants du propergol solide influence au premier ordre le mécanisme de formation d'agrégats au niveau de la surface du propergol. L'analyse des agrégats formés est réalisée dans le gaz, elle montre la forte influence de la pression sur l'intensité de l'agglomération des particules inertes, avec un maximum d'agglomération à des pressions modérées de 4 à 6 bars. De façon similaire, l'agrégation des particules d'aluminium et leur coalescence en agglomérats sont observées par des mesures de visualisation haute cadence, pouvant monter jusqu'à 77 kHz. L'importance de plusieurs mécanismes physiques complexes est démontrée, tels que la coalescence de multiples agrégats/agglomérats nommée super-fusion, l'oxydation des agglomérats encore attachés à la surface, ou la prépondérance des phénomènes physiques qui limitent l'agglomération. La mesure de la taille des

gouttes d'aluminium formées est réalisée par des outils d'analyse d'images précis reposant sur l'apprentissage profond, confirmant les paramètres fondamentaux déterminant l'agglomération : la granulométrie des grains oxydants du propergol et la pression. Un modèle d'agglomération est développé à partir de ces analyses expérimentales. Un premier modèle est réalisé pour les particules inertes, en modélisant les forces d'adhésion et de traînée analysées expérimentalement par ombroscopie. Les premières simulations montrent des résultats encourageants, mais la reproduction de l'agglomération observée expérimentalement est limitée, montrant la complexité des phénomènes physiques impliqués. Un second modèle est réalisé pour les particules d'aluminium, en incluant un critère d'allumage ou de super-fusion des agrégats, critères développés à partir des observations expérimentales. Il est montré que les grandeurs expérimentales sont très bien reproduites par simulation numérique pour des propergols de composition différente à plusieurs pressions, montrant la capacité du modèle à prédire correctement l'agglomération pour les propergols testés.

Mots-clés : Agglomération, Modélisation, Analyse d'image, Propergols solides, Aluminium, Mesures expérimentales

Summary: Aluminum is included in solid-propellant compositions to enhance thrust performances for civil and military launchers. However the aluminum phase is also source of various negative phenomena such as two-phase losses or combustion instabilities. All phenomena are highly dependent on the aluminum-droplet diameter in the flow. Droplet size results from agglomeration phenomenon on the burning propellant surface, for which physics is not well described at the moment. The present PhD work aims at complement physical modelling for aluminum agglomeration by combining two approaches: physical modelling and shadowgraphy measurement on a solid-propellant test chamber. Experimental measurements will be performed at ONERA in a high-pressure combustion chamber for solid-propellant research compositions that will be defined as part of the PhD work. The diagnostic provide high-speed visualisation of the burning propellant surface. Advanced image analysis methods will be used to automatically detect agglomeration patterns and characterize their evolution over time. Moreover, modelling and simulation work will be carried to improve the physical description of agglomeration phenomena taking place on the solid-propellant surface. The various driving physical parameters will be quantified from the statistical analysis of the experimental data. The resulting physical models will be included in numerical simulation codes that are used to study solid-propellant combustion, such as COSMETIC from ArianeGroup. Propellant combustion and aluminium agglomeration will then be studied numerically for the solid-propellant composition that will be tested experimentally, enabling direct comparison between measurements and numerical results.

Keywords: Agglomeration, Modelling, Image analysis, Solid propellant, Aluminium, Experimental measure

