

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Modélisation de l'atomisation LOX/méthane dans les moteurs-fusées par description morphologique combinant expérimentation et simulation

Référence : **MFE-DMPE-2025-01**
 (à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : 01/10/2025

Date limite de candidature : 03/2025

Mots clés : Moteurs-fusées, écoulements diphasiques, atomisation, machine learning, exploitation expérimentale, simulations numériques, description multi-échelle.

Profil et compétences recherchées

Ecole d'ingénieurs et/ou Master 2 avec une spécialité en mécanique des fluides, énergétique ou machine learning.

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

Le développement de moteurs-fusées à propergol liquide qui équiperont les futurs lanceurs nécessite des modèles numériques détaillés pour reproduire les processus physiques impliqués dans le fonctionnement du moteur. Le développement du jet dans la chambre de combustion est soumis à de nombreuses interactions avec l'aérothermochimie de la flamme : atomisation, évaporation, mélange, combustion... Pendant les phases transitoires ou de faible poussée du moteur, l'atomisation contribue de manière significative à l'efficacité et à la stabilité du processus de combustion. Les propergols cryogéniques sont injectés dans la chambre de combustion dans un état sous-critique, c'est-à-dire que leur pression ou leur température sont inférieurs à leur point critique. Dans le cas de l'atomisation assistée coaxiale typique d'un tel moteur-fusée, un jet cylindrique d'oxygène liquide est atomisé par un écoulement co-courant gazeux haute vitesse tel que le méthane.

L'ONERA et le CORIA, en association avec le CNES, ont mené des expériences et des simulations numériques sur l'atomisation coaxiale, dans des conditions non réactives [1,2], mais aussi dans des conditions de combustion représentatives du moteur-fusée [3], produisant une vaste base de données sur l'atomisation coaxiale. Pour tirer parti des simulations et des expériences, il est nécessaire d'appliquer et de combiner les récents outils et bases de données communs décrivant les écoulements diphasiques réactifs.

Tout d'abord, l'analyse multi-échelle décrit les ligaments produits à l'interface liquide gaz du jet et un modèle permettant d'évaluer la distribution en taille de certaines des gouttes qu'ils sont sur le point de produire est maintenant disponible [4]. L'application de ce modèle à des images expérimentales d'un cas d'essai réactif sur le banc d'essai MASCOTTE a permis de constater une évolution de la taille des éléments liquides en fonction de la distance à l'injecteur.

Deuxièmement, la combustion à haute pression est caractérisée par une densité optique élevée, ce qui complique l'utilisation et l'interprétation des diagnostics optiques. Des progrès récents dans l'analyse des données relatives à la propulsion solide ont montré le potentiel de l'apprentissage automatique et des réseaux neuronaux convolutifs (CNN) pour détecter et estimer la taille des gouttelettes sur des images expérimentales telles que celle de la Figure 1 à gauche [2]. Une approche similaire a été transposée aux images de spray en utilisant des simulations numériques directes (DNS) comme données d'entraînement [2] : le réseau est entraîné à fournir des informations sur le volume des particules de fluide produites par un jet de liquide atomisant (Figure 1 au centre). Le spray généré par DNS, similaire au spray expérimental, est illustré sur la Figure 1 à droite.

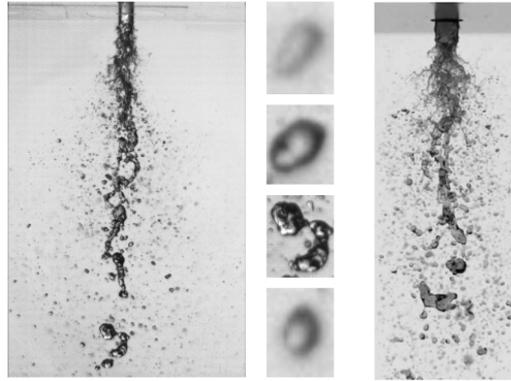


Figure 1 : Spray produit par injection coaxiale : expérimental (gauche), structures liquides (centre) et généré par DNS (droite).

Ainsi, la combinaison d'une approche d'apprentissage automatique pour estimer le volume ou la surface des particules liquides pourrait valider et compléter le modèle dérivé de l'analyse multi-échelle des ligaments se développant à l'interface du jet pour des cas d'atomisation coaxiale.

A l'interface entre les équipes numériques et expérimentales de l'ONERA et du CORIA, cette thèse vise à mesurer et comparer les mesures de taille de gouttelettes obtenues par imagerie et par simulation numérique. En particulier, la transposition d'images numériques 3D en images expérimentales 2D est un phénomène qui sera abordé par apprentissage automatique. De plus, le CNN sera utilisé avec des approches d'apprentissage profond pour estimer le volume ou la surface de structures liquides complexes telles que les ligaments dans les images expérimentales. Pour évaluer la précision et la robustesse des modèles CNN appliqués aux images expérimentales, des images obtenues à partir d'une calibration expérimentale mais aussi des données DNS seront utilisées.

La première application comparera la taille des particules obtenue à partir d'images expérimentales et de résultats numériques sur le même cas d'application d'atomisation coaxiale [1]. Ce cas étudié est non réactif, ce qui permet de développer une approche de traitement complète pour comparer les données expérimentales et numériques, en tenant compte des effets de projection 2D. Deuxièmement, le processus sera appliqué à des cas plus complexes de réaction LOX/méthane de la base de données MASCOTTE, en ajustant les paramètres du CNN d'apprentissage. En combinaison avec l'analyse multi-échelle, des modèles ou des corrélations de la distribution de la taille des particules produites par l'atomisation coaxiale dans ces cas d'études pourraient être obtenus de l'approche d'apprentissage automatique.

Ce travail de doctorat implique de travailler avec différents outils, notamment des scripts d'apprentissage profond basés sur Python, une base de données d'images expérimentales, des résultats de simulations numériques telles que DNS et LES, etc. Le doctorant interagira avec différents spécialistes de ces domaines et sera donc confronté à différentes problématiques liées à l'atomisation des jets coaxiaux.

Références

- [1] A. Ficuciello et al., Investigation of air-assisted sprays submitted to high frequency transverse acoustic fields: Droplet clustering. *Physics of Fluids*, 2017, <https://hal.science/hal-01611183v1>
- [2] F. Granger et al., Volume estimation of liquid structures on shadowgraphy images using deep learning and high-fidelity simulations, *EUCASS 2023*, <https://onera.hal.science/hal-04204662v1>
- [3] M. Théron, et al., Experimental and numerical investigation of LOX/Methane Cryogenic Combustion at low mixture ratio 8th *EUCASS*, 2019
- [4] L. Geiger et al., Experimental description of primary breakup of turbulent rocket engine liquid jet flames, 16th *ICLASS*, 2024, <https://onera.hal.science/hal-04650002v1>

Collaborations envisagées

Université de Rouen Normandie,

Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : Multi-Physique pour l'Energétique

Lieu (centre ONERA) : Palaiseau

Contact : Robin Devilliers – Nicolas Fdida – Jean-christophe Hoarau

Email : robin.devillers@onera.fr - Nicolas.Fdida@onera.fr - jean-christophe.hoarau@onera.fr

Directeur de thèse

Nom : Dumouchel Christophe

Laboratoire : CORIA UMR 6614

Tél. :

Email : christophe.dumouchel@coria.fr

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