

## PROPOSITION DE SUJET DE THESE

**Intitulé :** Modélisation et simulation des suies pour la combustion LOx/méthane dans les moteurs-fusées

Référence : **MFE-DMPE-2026-34**  
(à rappeler dans toute correspondance)

**Début de la thèse :** Octobre 2026

**Date limite de candidature :** 1<sup>er</sup> mars 2026

**Mots clés** Suies - Simulation numérique - RANS – LES – Moteur-fusée – Propulsion liquide – Méthane – Conditions bi-transcritiques - LOx/CH<sub>4</sub>

### Profil et compétences recherchées

Ingénieur grande école et/ou master 2 recherche en mécanique des fluides et énergétique

À l'ère d'une concurrence spatiale mondiale sans précédent, marquée par l'émergence de acteurs privés (SpaceX, Blue Origin) et la montée en puissance des programmes nationaux (Chine, Russie, Inde), l'Europe doit repenser sa stratégie de propulsion pour garantir son autonomie d'accès à l'espace. Dans ce paysage ultra-compétitif, où le coût et la réutilisabilité des lanceurs deviennent des critères décisifs, le développement de moteurs cryogéniques à très bas coût s'impose comme une priorité absolue. Parmi les options de propulsion liquide, le méthane (CH<sub>4</sub>) émerge comme le candidat idéal pour les futurs lanceurs européens. Ses avantages sont multiples : le méthane est plus facile à manipuler que l'hydrogène (moins de risques de fuites, meilleure densité), il permet des cycles de préparation plus courts et une logistique allégée. Contrairement à l'hydrogène, le méthane peut être stocké à des températures moins extrêmes, réduisant les contraintes sur les réservoirs et les infrastructures au sol. Son rapport poussée/masse avantageux en font un carburant de choix pour les lanceurs réutilisables tels que Prometheus [1], un impératif pour réduire les coûts de mise en orbite. Cependant, l'utilisation du méthane dans les moteurs-fusées à combustion cryogénique peut conduire à la formation de suies, qui peuvent affecter le fonctionnement des différents éléments du moteur. Ainsi, le générateur de gaz (GG) peut être encrassé par les suies. Les premiers essais avec le méthane ont également montré un déficit de température dans la chambre qui peut être dû à la présence de ces suies [2][3]. Du côté de la chambre de combustion (CC), les suies peuvent augmenter les transferts radiatifs et altérer les performances du moteur [4]. Enfin, le circuit régénératif (CR) peut également être obstrué par les suies par des phénomènes de cokéfaction, limitant la réutilisation du moteur.

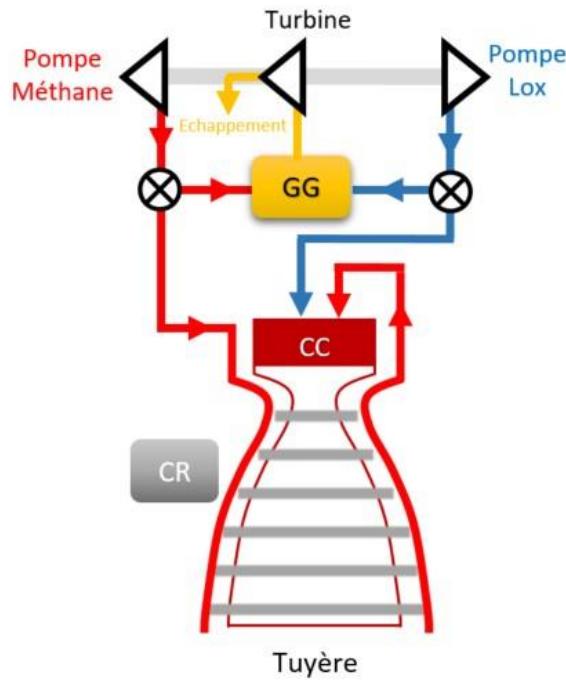


Figure 1 : représentation schématique d'un moteur-fusée

Au sein d'un programme d'intérêt commun, le CNES et l'ONERA mènent des recherches sur la combustion oxygène/méthane aussi bien sur le terrain expérimental à l'aide de campagnes de tirs réalisées sur le banc MASCOTTE - banc de l'ONERA pour l'étude des moteurs cryogéniques - que du côté de la modélisation et des simulations numériques [6]. Plusieurs campagnes expérimentales en LOx/méthane ont donc été menées sur des configurations représentatives, aussi bien du fonctionnement du générateur de gaz [7] que de celui de la chambre de combustion [8]. Ces campagnes ont, entre autres, démontré la présence de suies dans ces différents dispositifs et ont permis de constituer des bases de données pour la validation des outils numériques. Des campagnes expérimentales sur la combustion LOx/CH4 à bas rapports de mélange ont été menées en 2023 et 2024 à l'ONERA, avec de nombreux diagnostics de caractérisation de la combustion et des suies, comme l'incandescence induite par laser (LII), la fluorescence induite par laser (LIF) sur les précurseurs de suies (PAH) et le radical OH, la morphologie des suies et la composition des gaz. Ces campagnes viendront compléter la base de données de cas-tests de validation. En parallèle, des simulations numériques de type RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) ont été réalisées à l'aide de CEDRE, le code de simulation multi-physiques compressible pour l'énergétique et la propulsion de l'ONERA [9]. Ces simulations ont permis de mettre en place une méthodologie adaptée aux différents points de fonctionnement, posant les premiers jalons d'un travail plus avancé, vers la simulation aux grandes échelles, dans lequel s'inscrit ce travail de thèse [10].

Cette thèse a ainsi pour objectif principal la mise au point d'une modélisation CFD LES (Large Eddy Simulation) à partir de briques de modélisation existantes et à développer, permettant à terme de réaliser une simulation numérique d'un mono-injecteur LOX/CH4 sur un point de fonctionnement représentatif de conditions générateur de gaz, à savoir à un rapport de mélange très riche en combustible et à haute pression. Le doctorant s'appuiera sur la base de données expérimentales mise en place lors d'une campagne dédiée qui a permis de quantifier les fractions volumiques de suies pour des tirs avec un point de fonctionnement à bas rapport de mélange [7][11][12] pour différentes pressions. Afin d'être représentatifs des conditions d'injection du moteur réel, les ergols sont injectés à très basse température, conduisant à des écoulements bi liquides ou bi-transcritiques. Le doctorant s'attachera uniquement aux écoulements bi-transcritiques dans le cadre de sa thèse. Cela signifie que le méthane et l'oxygène sont tous deux injectés à froid à des pressions supercritiques et lorsqu'ils s'échauffent, passent de l'état liquide à l'état supercritique.

Mener à bien cette simulation bi-transcritique sera le premier défi de cette thèse auquel s'ajoutera la modélisation des suies. Après un état de l'art sur cette modélisation des suies en s'appuyant sur les travaux réalisés par la communauté internationale et à l'ONERA en particulier pour la combustion dans les foyers aéronautiques [13][14][15][16], le doctorant développera des modèles adaptés aux organes de combustion utilisés en propulsion spatiale, pour lesquels la prise en compte des suies n'en est qu'à ses débuts [4]. Une étape préalable sera la validation des modèles sur des flammes élémentaires à haute pression, comme celles présentées dans [17], avant de simuler un tir MASCOTTE. Un effort important devra porter sur la définition d'une cinétique chimique adéquate, en utilisant les travaux existants [18]. Plusieurs stratégies seront évaluées pour réduire les modèles détaillés afin d'être utilisable dans un code de simulations numériques comme CEDRE, tout en étant suffisamment précise pour prédire la présence des précurseurs des suies. Des méthodes classiques de réduction pourront être utilisées mais le doctorant s'intéressera également aux méthodes basées sur l'intelligence artificielle en cours de développement à l'ONERA ou aux flammes virtuelles [19][20]. En adaptant les méthodologies déjà éprouvées à l'ONERA, le doctorant réalisera ensuite des simulations totalement innovantes pour les moteurs-fusées permettant d'évaluer les compositions des suies dans des conditions représentatives d'un générateur de gaz, et d'en tirer des premiers critères quantitatifs pour établir des spécifications permettant de s'assurer du bon fonctionnement des turbopompes avec le méthane.

Ce sujet de thèse se positionne entre une problématique scientifique inédite, la simulation des suies n'ayant pas été réalisée jusqu'ici en propulsion spatiale, et une problématique industrielle avec des réponses concrètes à apporter sur l'influence des suies sur le fonctionnement des moteurs. Le doctorant aura ainsi des opportunités multiples de publications, de participations à des conférences scientifiques ainsi qu'à des échanges avec les acteurs scientifiques et industriels du monde du spatial, lui permettant d'établir des contacts pour la suite de sa carrière.

- [1] Iannetti, N. Girard, D. Tchou-kien, C. Bonhomme, N. Ravier, E. Edeline Prometheus a Lox/CH<sub>4</sub> reusable rocket engine – 7th European Conference For Aeronautics And Space Sciences (EUCASS) – Milan (Italy) – (2017)
- [2] S. Zurbach, J.L. Thomas, M. Sion, T. Kachler, L. Vingert and M. Habiballah Recent Advances on LOX/Methane Combustion for Liquid Rocket Engine injector - AIAA 2002-4321 - 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit Indianapolis, Indiana (2002)
- [3] M. Théron, M. Martin Benito, B. Vieille, L. Vingert, N. Fdida, Y. Mauriot, R. Blouquin, C. Seitan, M. Onori, L. Lequette Experimental and numerical investigation of LOX/Methane Cryogenic Combustion at low mixture ratio – 8th European Conference For Aeronautics And Space Sciences (EUCASS) – Madrid (Spain) – (2019)
- [4] S. Soller, C. Maeding, N. Rackemann, R. Blasi, B. Kniesner, A. Preuss Characterisation of a LOXLCH<sub>4</sub> Gas Generator – Space Propulsion – Cologne (Germany) (2014).
- [5] D. Byun, S. Wook Baek, Numerical investigation of combustion with non-gray thermal radiation and soot formation effect in a liquid rocket engine - International Journal of Heat and Mass Transfer Volume 50, Issues 3–4 (2007)
- [6] L. Vingert , G. Ordonneau , N. Fdida , P. Grenard , A rocket engine under a magnifying glass, Aerospace- Lab 11 (2016)
- [7] V. Lechner, C. Betrancourt, S. Ducruix, P. Scouflaire, N. Fdida, L. Vingert, M. Theron, A. Barata, M. Robcis Investigations of Lox/CH<sub>4</sub> flames at very low mixture ratio and high pressure in rocket engine operating conditions – 8th Space Propulsion Conference – Estoril (Portugal) (2022)
- [8] S. Boulal, N. Fdida, L. Matuszewski, L. Vingert, M. Martin-Benito Flame dynamics of a subscale rocket combustor operating with gaseous methane and gaseous, subcritical or transcritical oxygen - Combustion and Flame, Volume 242 (2022)

- [9] A. Refloch, B. Courbet, A. Murrone, P. Villedieu, C. Laurent, P. Gilbank, J. Troyes, L. Tessé, G. Chaineray, J.B. Dargaud, E. Quémerais, F. Vuillot CEDRE Software - Aerospace Lab, vol. 2. (2011)
- [10] A. Nicole and L.H. Dorey REST HF10 test case: Simulation of combustion instabilities induced by flow rate modulations with diffuse interface modelling – 9th European Conference For Aeronautics And Space Sciences (EUCASS) – Lille (France) (2022)
- [11] L. Vingert, N. Fdida, Y. Mauriot Experimental Investigations of Liquid Oxygen/Methane Combustion at Very Low Mixture Ratio at the Mascotte Test Facility - 32nd ISTS & 9th NSAT Joint Symposium. (2019)
- [12] V. Lechner, C. Betrancourt, P. Scouflaire, L. Vingert, S. Ducruix Dynamic characterization of wall temperature in LOX/CH<sub>4</sub> rocket engine operating conditions using phosphor thermometry - Proceedings of the Combustion Institute (2022)
- [13] L.H. Dorey Modélisation des phénomènes couples combustion-formation des suies-transferts radiatifs dans les chambres de combustion de turbine à gaz - Thèse de doctorat Energétique Châtenay-Malabry, Ecole centrale de Paris (2012)
- [14] L.H. Dorey, N. Bertier, L. Tessé, F. Dupoirieux Soot and radiation modeling in laminar ethylene flames with tabulated detailed chemistry - Comptes Rendus Mécanique, (2011)
- [15] N. Dellinger Modélisation de la formation et de l'évolution des particules de suie en approche hybride Euler-Lagrange pour la simulation de foyers aéronautiques - Thèse de doctorat Mécanique Sorbonne université (2019)
- [16] N. Dellinger, N. Bertier, F. Dupoirieux, G. Legros Hybrid Eulerian-Lagrangian method for soot modelling applied to ethylene-air premixed flames - Energy, Vol. 194, (2020)
- [17] Hyun I. Joo, Ömer L. Gülder, Soot formation and temperature structure in small methane–oxygen diffusion flames at subcritical and supercritical pressures - Combustion and Flame, Volume 157, Issue 6 (2010)
- [18] M. Keller, T. de Bruin, M. Matrat, A. Nicolle, L. Catoire A Theoretical Multiscale Approach to Study the Initial Steps Involved in the Chemical Reactivity of Soot Precursors - Energy & Fuels 33 (10), 10255-10266 (2019)
- [19] Mélody Cailler, Nasser Darabiha, Benoît Fiorina, Development of a virtual optimized chemistry method. Application to hydrocarbon/air combustion, Combustion and Flame, Volume 211, 2020, Pages 281-302
- [20] Hernando Maldonado Colmán, Alberto Cuoci, Nasser Darabiha, Benoît Fiorina, A virtual chemistry model for soot prediction in flames including radiative heat transfer, Combustion and Flame, Volume 238, 2022.

### Collaborations envisagées

Laboratoire d'accueil à l'ONERA	Directeur de thèse
Département : Département Multi-physiques pour l'énergétique	Nom : Nicolas BERTIER
Lieu (centre ONERA) : Toulouse	Laboratoire : ONERA
<b>Contact :</b> Nicolas BERTIER - Aurélie NICOLE	Tél. : 0562252503
Tél. : 01 80 38 60 38 Email : nicolas.bertier@onera.fr	Email : nicolas.bertier@onera.fr

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