

Avis de Soutenance

Monsieur Valentin LECHNER

Soutiendra publiquement ses travaux de thèse intitulés

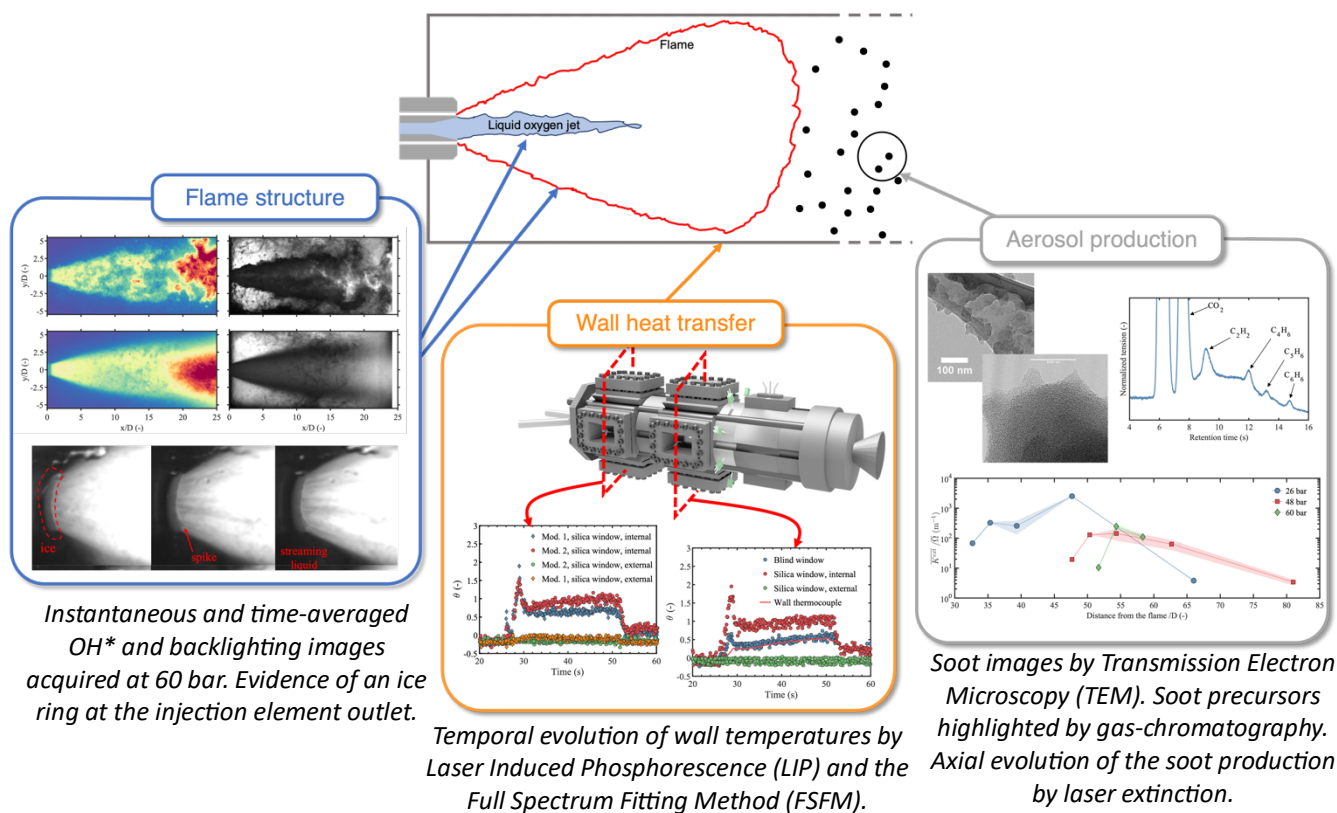
Experimental study of LOX/CH₄ flames in rocket engines

Étude expérimentale des flammes LOX/CH₄ dans les moteurs-fusées

Thèse dirigée par **Sébastien DUCRUIX**, co-encadrée par **Christopher BETRANCOURT**,
Nicolas FDIDA, **Philippe SCOUFLAIRE** et co-supervisée par **Alexandre BARATA**,
Marie ROBCIS et **Marie THERON**

Le mercredi 29 mai 2024 à 14h00

À CentraleSupélec, 3 rue Joliot-Curie, 91192 Gif-Sur-Yvette Cedex
Théâtre Rousseau (Bâtiment Bouygues)



Composition du jury

Dr. Armelle CESSOU
Dr. Laurent SELLE
Dr. Christian CHAUVEAU
Dr. Justin HARDI
Dr. Brian PETERSON
M. Alexandre BARATA
Dr. Marie THERON

Directrice de Recherche CNRS, CORIA
Directeur de Recherche CNRS, IMFT
Directeur de Recherche CNRS, ICARE
Head of Rocket Propulsion Technology, DLR
Senior Lecturer, University of Edinburgh
Ingénieur, ArianeGroup
Docteure-ingénieure, CNES

Rapporteure
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Invité
Invitée

Title: Experimental study of LOX/CH₄ flames in rocket engines

Keywords: Liquid Rocket Engine, liquid oxygen and methane, transcritical combustion, surface thermometry, LIP, soot

Abstract: Using methane as a fuel in rocket engines would have many advantages but the combustion with pure oxygen at high pressure remains poorly understood. From a thermodynamic point of view, methane and oxygen share very similar critical point values, making it challenging to predict propellant mixing, flame anchoring, stability and structure. Moreover, when methane is injected in excess, aerosols can be produced, which can clog the lines, damage the turbine, and reduce the efficiency.

Therefore, a thorough update of the knowledge of LOX/CH₄ combustion is necessary. These challenges are tackled within the consortium composed of EM2C laboratory, ONERA, CNES, and ArianeGroup. Two test campaigns are carried out at the MASCOTTE facility from ONERA, aiming to study three central topics: the flame structure, wall heat transfers, and aerosol production. To this end, various experimental diagnostics are implemented simultaneously during high-pressure hot-fire tests.

Various imaging diagnostics are implemented to analyze the flame structure and the dense liquid jets. Despite the acquisition difficulties encountered in these extreme conditions, the analyses reveal a complex flame structure. In the subcritical regime, atomization and evaporation mechanisms dominate. The flame is much more opened and longer than at higher pressures, where diffusive mixing mechanisms prevail. Characterizing flame anchoring remains a challenge. A water ice ring surrounding, and masking, the flame foot has been identified. Formation mechanisms are proposed, and a growth/destruction temporal cycle is highlighted. Its presence strongly affects flame visu-

alizations, and may lead to misinterpretations of its topology.

Laser-induced phosphorescence (LIP) is implemented for the first time at MASCOTTE. Various LIP methods exist, but they are not well suited to the MASCOTTE conditions: wide temperature range, thermal transients, and two-phase flow environment favoring laser absorption/diffusion. Therefore, a specific method, the Full Spectrum Fitting method (FSF method), has been developed. It exploits the spectral dependence on temperature, enabling instantaneous measurements from 100 to 900 K with a precision of 17 K, with no dependence on the laser excitation energy. A detailed data analysis highlights the predominant wall heat transfer modes, studies the influence of the operating points, and compares the experimental data with a wall heat transfer model, which is particularly well suited for deducing the convective properties of the flow.

Three diagnostics are used to characterize aerosols. An intrusive probe samples particles and burnt gases downstream of the flame. The particles are sampled on TEM grids and analyzed by Transmission Electron Microscopy. Detailed images of the aerosol morphology reveal that the particles are soot. Combustion products are analyzed by gas chromatography. This makes it possible to identify soot precursor molecules such as benzene and acetylene. Soot are quantified temporally by laser extinction. A dedicated post-processing method is developed and various hypotheses are discussed to explain the spatial variations of the soot production downstream of the flame.

Titre : Étude expérimentale des flammes LOX/CH₄ dans les moteurs-fusées

Mots clés : moteur fusée cryotechnique, oxygène et méthane liquides, combustion transcritique, thermométrie de surface, LIP, suies

Résumé : Utiliser le méthane comme carburant dans les moteurs fusées présente beaucoup d'avantages mais la combustion avec de l'oxygène pur à haute pression reste mal comprise. D'un point de vue thermodynamique, le méthane et l'oxygène partagent des valeurs de point critique très similaires, ce qui rend difficile la prédiction du mélange des ergols, l'accrochage, la stabilité et la structure de la flamme. De plus, quand le méthane est injecté en excès, des aérosols peuvent être produits, pouvant obstruer les lignes, endommager la turbine et réduire le rendement.

Une mise à jour approfondie des connaissances sur la combustion LOX/CH₄ est donc nécessaire. Ce défi est relevé au sein du consortium composé du laboratoire EM2C, de l'ONERA, du CNES et d'ArianeGroup. Deux campagnes d'essais sont menées sur le banc MASCOTTE de l'ONERA visant à étudier trois sujets centraux : la structure de la flamme, les transferts thermiques aux parois et la production d'aérosols. Dans ce but, divers diagnostics expérimentaux sont mis en œuvre simultanément pendant des essais à feu à haute pression.

Différents diagnostics d'imagerie sont mis en place pour analyser la structure de la flamme et des jets liquides. Malgré les difficultés d'acquisition rencontrées dans ces conditions extrêmes, les analyses révèlent une structure de flamme complexe. En régime subcritique, les mécanismes d'atomisation et d'évaporation dominant. La flamme est alors bien plus ouverte et plus longue qu'à de plus hautes pressions, où les mécanismes de mélange diffusifs prévalent. Caractériser l'accrochage de la flamme reste un défi. En effet, un anneau de glace, probablement d'eau, entoure et masque le pied de la flamme. Des mécanismes de formation sont proposés et un cycle temporel de crois-

sance/destruction est mis en avant. Sa présence affecte fortement la visualisation de la flamme, et peut conduire à des interprétations erronées de sa topologie.

Pour la première fois à MASCOTTE, la phosphorescence induite par laser (LIP) est mise en place. Diverses méthodes LIP existent mais ne sont pas bien adaptées aux conditions de MASCOTTE : large gamme de températures, transitoires thermiques et environnement diphasique. C'est pourquoi une méthode spécifique a été mise au point (Full Spectrum Fitting method). Elle exploite la dépendance spectrale à la température, permettant des mesures instantanées de 100 à 900 K avec une précision de 17 K, sans dépendance à l'énergie d'excitation laser. Une analyse détaillée des données met en évidence les modes de transfert de chaleur prédominants, étudie l'influence des points de fonctionnement et compare les données expérimentales avec un modèle de transferts thermiques de paroi, particulièrement bien adapté pour déduire les caractéristiques convectives de l'écoulement à la paroi.

Différents diagnostics sont mis en œuvre pour caractériser les aérosols. Une sonde intrusive prélève les particules et les gaz brûlés en aval de la flamme. Les particules sont prélevées sur des grilles adaptées à des analyses par microscopie électronique à transmission (TEM). Les images détaillées de leurs morphologies révèlent qu'il s'agit de suies. Les gaz sont analysés par chromatographie en phase gazeuse. Ceci permet d'identifier des molécules précurseurs des suies comme le benzène et l'acétylène. Les suies sont quantifiées temporellement par extinction laser. Des post-traitements dédiés sont développés et diverses hypothèses sont discutées pour expliquer les variations spatiales de production de suies.