

## PROPOSITION DE SUJET DE THESE

**Intitulé :** Quantification de la fraction de mélange locale par fluorescence induite par laser planaire pour l'analyse de flammes décarbonées hydrogène-air appliquée à la combustion aéronautique

Référence : **MFE-DMPE-2026-03**

(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : 10/2026

Date limite de candidature : 15/03/2026

### Mots clés

Combustion, hydrogène, mélange, diagnostic optique, aéronautique

### Profil et compétences recherchées

Ingénieur ou Master en énergétique avec des compétences en mécanique des fluides, transferts thermiques et combustion turbulente. Des compétences en métrologie (laser), en optique ainsi qu'en spectroscopie sont grandement appréciées.

### Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

Le développement de nouvelles motorisations thermiques reste un fort enjeu de recherche. En effet, la combustion reste l'un des principaux vecteurs énergétiques dans l'industrie lourde (métallurgie, industrie, ...) ou dans le secteur des transports. Ces différents secteurs doivent cependant faire face à une raréfaction des ressources d'énergie primaires fossiles, ainsi qu'à un impératif de réduction de leur impact environnemental face à l'accélération du changement climatique. Ces fortes contraintes imposent une nécessité impérative d'innovation et de décarbonation.

Pour le transport aérien, cela passe par le développement de nouvelles motorisations aéronautiques. Ces nouvelles motorisations doivent permettre un changement de carburant, qu'il s'agisse du remplacement du kérozène actuel par des carburants liquides de synthèse durables (CSD, ou SAF en anglais), ou par l'utilisation d'hydrogène. Les CSD sont la solution aujourd'hui privilégiée à court terme ainsi qu'à long terme pour les vols long courrier, tandis que l'hydrogène reste une solution de rupture envisagée à plus long terme, et à destination des vols courts et moyens courriers. Concernant l'hydrogène, l'écart des propriétés physico-chimiques par rapport au kérozène impose des adaptations majeures de l'architecture des chambres de combustion. Le caractère gazeux de l'hydrogène à l'injection permet d'ouvrir la voie à de nouveaux concepts d'injecteurs permettant de fonctionner dans des régimes de combustion jusqu'à présent inatteignables (prémélange, régime d'interaction chimie-turbulence). Ces nouvelles architectures doivent néanmoins toujours satisfaire les besoins opérationnels du moteur : compacité de la flamme, stabilité de fonctionnement sur une large plage de conditions, faibles niveaux d'émission de polluants, ... nécessitant une bonne compréhension des mécanismes de stabilisation de la flamme.

La localisation de la flamme dans la chambre de combustion est dépendante de l'aérodynamique interne (écoulement tourbillonnaire turbulent), ainsi que de la formation d'un mélange entre le carburant et l'air. La rapidité de ce mélange pilote la localisation de la zone réactive et sa structure. L'effet du taux de mélange sur la localisation de la flamme est notamment visible sur une flamme hydrogène canonique étudiée dans le cadre d'une thèse en cours [Touzeau thèse] (Figure 1), correspondant à une injection directe d'hydrogène sous forme de jet droit au centre d'un écoulement d'air swirlé. Des mesures de champ de vitesse et de localisation de la flamme ont permis de mettre en évidence la formation d'une zone de recirculation entre le jet de H<sub>2</sub> et le swirl d'air. Cette zone de recirculation permet la formation d'un mélange de gaz frais, au niveau duquel une flamme peut se stabiliser [Touzeau 2025]. La richesse en carburant au niveau de cette flamme reste néanmoins une donnée manquante, quantité nécessaire pour comprendre les interactions chimie-turbulence influant sur les mécanismes de formation de polluants (monoxyde d'azote, NO) ou de stabilisation (résistance à l'étirement).

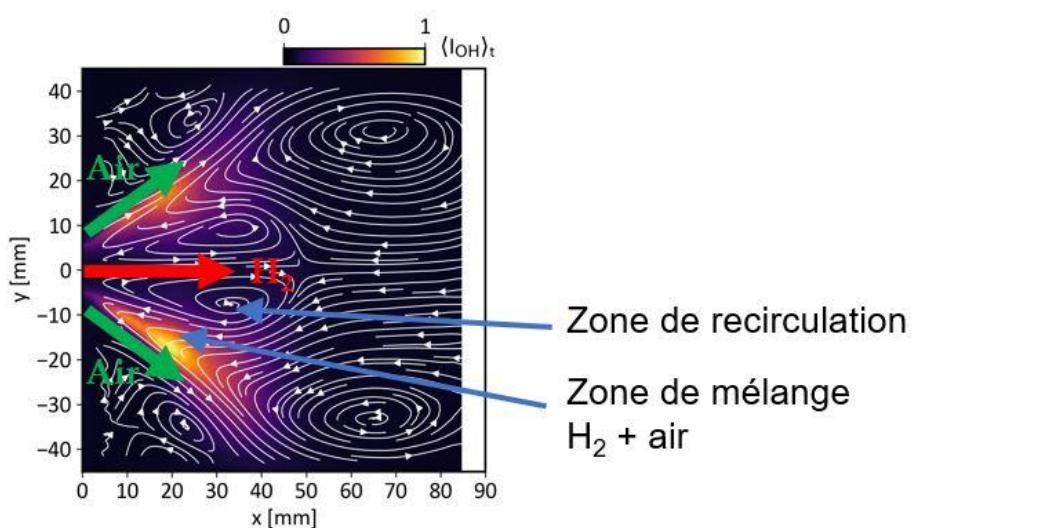


Figure 1 : Champ moyen de PLIF-OH (couleur) et champ de vitesse (ligne de courant) pour une flamme jet  $H_2$ -air dans un écoulement d'air swirlé. ONERA-DGAC HYDROGENE

En raison des forts gradients thermiques, de vitesse et de densité, ou encore de l'hétérogénéité de la composition chimique du milieu, la mesure de la fraction de mélange au voisinage d'un front de flamme est complexe. Une solution consiste à introduire dans l'écoulement un traceur suivi par fluorescence induite par laser planaire (PLIF). La quantification du signal de fluorescence permettrait de remonter à une estimation de la fraction de mélange au voisinage du front de flamme.

Plusieurs traceurs ont été employés en combustion. Un traceur communément employé pour la mesure d'un taux de mélange en combustion est le monoxyde d'azote (NO). Ce traceur a déjà été employé [Greifenstein 2021], et plus récemment au laboratoire CORIA dans le cadre d'une thèse récente [Blaise 2025] pour étudier l'interaction entre une flamme méthane-air et un film d'air de refroidissement pariétal. Bien que l'oxydation du NO soit lente, cette molécule intervient dans les mécanismes réactionnels en étant naturellement produit par la flamme. En particulier, la formation de NO est dépendante de la richesse locale [Meulemans2024]. Ces difficultés rendent complexe le dosage du NO-traceur au voisinage d'une flamme, et sont exacerbées pour une flamme hydrogène, où l'importance relative des différents mécanismes de formation du NO diffère d'une flamme kérósène-air.

Une solution prometteuse avec un récent regain d'intérêt est celle d'employer un traceur alcalin sous forme atomique tel que le potassium (K) ou le sodium (Na). Les atomes présentent l'avantage de posséder des moments de transition plus forts que ceux des molécules, et ainsi gagner en signal. Il est ainsi possible de détecter par PLIF des concentrations de l'ordre de quelques ppm [Zhu2020]. La fluorescence de l'atome Na a déjà été employée sur des écoulements hypersoniques ou réactifs, avec des possibles quantifications au travers d'étalonnage dans des flammes de référence [Grunbok2024, Eyk 2008]. Le sodium apparaît donc comme un candidat prometteur pour être employé comme traceur de l'hydrogène dans une flamme.

Cette thèse se déroulera en partenariat entre l'ONERA de Palaiseau et le CORIA à Rouen. Elle se propose d'étudier l'effet de la fraction de mélange sur la topologie d'une flamme hydrogène-air caractéristique de moteurs aéronautiques au moyen de la fluorescence induite par laser sur le sodium. Cependant, le sodium n'a encore jamais été employé pour mesurer une fraction de mélange. On cherchera donc à développer la PLIF-Na en quantifiant le signal par une phase d'étalonnage, afin de remonter à une fraction de mélange. Préalablement, le développement d'un système d'ensemencement est nécessaire. Cette méthode de diagnostic sera ensuite employée en combinaison avec d'autres mesures optiques maîtrisées pour analyser les effets locaux de la fraction de mélange sur la structure d'une flamme  $H_2$ -air turbulente.

- [Touzeau thèse], Y. Touzeau, "Optimisation de la métrologie optique laser pour la combustion d'hydrogène dans des foyers aéronautiques à haute pression et haute température », Université Paris-Saclay, En préparation
- [Touzeau 2025], Y. Touzeau, S. Petit, C. Irimiea, B. Blaisot, G. Pilla, A. K. Mohamed, "Experimental investigation of a non-premixed H<sub>2</sub>/air swirled flame at elevated pressure using optical diagnostics", Proceedings of ASME Turbo Expo 2025, 2025
- [Greifenstein 2021] M. Greifenstein, A. Dreizler, "Investigation of mixing processes of effusion cooling air and main flow in a single sector model gas turbine combustor at elevated pressure", International Journal of Heat and Fluid Flow, 2021
- [Blaise thèse] A. Blaise, "Analyse de la formation de polluants en proche-paroi au sein de chambres de combustion de turboréacteur", INSA Rouen Normandie, 2025
- [Meulemans 2024], M. Meulemans, A. Durocher, G. Bourque, J. M. Bergthorson "NO measurements in high temperature hydrogen flames: The crucial role of the hydrogen oxidation chemistry for accurate NO predictions", Combustion and Flame, 2024
- [Zhu 2020], K. Zhu, S. J. Barkley, C. E. Dedic, T. R. Sippe, J. B. Michael1, "Two-photon laser-induced fluorescence of sodium in multiphase combustion", Applied Optics, 2020
- [Grunbok 2024] C. J. Grunbok, B. S. Leonov, R. B. Miles, "UV/IR Sodium Planar Laser-Induced Fluorescence in a Flame" AIAA Aviation Forum, Las Vegas, 2024
- [Eyk, 2008], P. J. van Eyk, P. J. Ashman, Z. T. Alwahabi, G. J. Nathan, "Quantitative measurement of atomic sodium in the plume of a single burning coal particle", Combustion and Flame, 2008.

## **Collaborations envisagées ONERA DMPE – ONERA DPHY – CORIA**

### **Laboratoire d'accueil à l'ONERA**

Département : Multi-Physique pour l'Energétique  
Lieu (centre ONERA) : Palaiseau

**Contact :** Sylvain Petit, Email : [sylvain.petit@onera.fr](mailto:sylvain.petit@onera.fr)  
**Contact :** Pradip Xavier, Email : [xavierp@coria.fr](mailto:xavierp@coria.fr)

### **Directeur de thèse**

Nom : Guillaume Pilla, DMPE  
Email : [guillaume.pilla@onera.fr](mailto:guillaume.pilla@onera.fr)

### **Co-directeur de thèse**

Nom : Frédéric Grisch, CORIA  
Email : [grischf@coria.fr](mailto:grischf@coria.fr)

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