



# Développement des techniques optiques pour la caractérisation in-situ de la suie dans des foyers de combustion à haute pression

-----

Development of optical techniques for in-situ  
characterization of soot in high-pressure combustors

Soutenance de thèse de doctorat - Jean Pierre DUFITUMUKIZA  
**14 mars 2023 à 10h00**

Salle Marcel Pierre / ONERA  
6 Chemin de la Vauve aux Granges, 91120 Palaiseau

## Devant le jury composé de :

Iain Stewart BURNS	Professeur, Université de Strathclyde Glasgow	Rapporteur
Mario COMMODO	Directeur de Recherche, CNR Napoli	Rapporteur
Eric THERSSEN	Professeur, Université de Lille, PC2A	Examineur
Benedetta FRANZELLI	Chargée de Recherche CNRS, EM2C	Examinatrice
Jérôme YON	Professeur, INSA-Rouen, CORIA	Examineur
Xavier MERCIER	Directeur de Recherche CNRS, PC2A	Directeur de thèse
Cornelia IRIMIEA	Ingénieure de Recherche, ONERA	Co-encadrante de thèse
Nicolas FDIDA	Ingénieur de Recherche, ONERA	Co-encadrant de thèse
Axel VINCENT RANDONNIER	Ingénieur de Recherche, ONERA	Membre invité

\*\*\*\*\*

## Abstract

The growth of air traffic urges the combustion research community to get a detailed understanding of the physical and chemical processes occurring in the aircraft engine, with two main objectives: first, to improve the combustion process and second, to lower gaseous and particulate emissions. A solution to the first issue lies in the combustion at higher pressure and temperature, but this can impact the second issue, particularly concerning the production of soot and NO<sub>x</sub> emissions. The solution relies on the development of suitable experimental tools for representative combustion conditions of those encountered in aircraft engines to capture their characteristic complex phenomena.

As a result, during this research, coupled optical techniques were developed and implemented for characterizing soot particles in aeronautical engine-relevant combustors. Laser Induced Incandescence (LII) is the primary technique on which efforts are directed due to its high sensitivity for detecting soot particles and flexibility to be implemented around semi-industrial combustion installations. In addition, the coupling of LII with other optical techniques presents a high interest in understanding the mechanisms and parameters leading to soot formation. First, Laser Induced Fluorescence (LIF) is added as a complementary technique to detect soot precursors known as polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). The development of LII/LIF was made in accordance with the application on test rigs and they were first tested on a CH<sub>4</sub>/air laminar diffusion flame. The main findings are related to the planar configuration of the LII/LIF systems regarding the correction factors for the use of a laser sheet plane to scan a large region of interest during the measurement. Additionally, two optical configurations (imaging and spectral) proposed for the LII technique were studied to evaluate the uncertainty induced in the conversion step from the recorded LII signal to soot volume fraction.

These studies allowed the application of planar LII/LIF and complementary optical techniques on a semi-industrial test rig representative of combustion conditions identified in aircraft combustors. Particle image velocimetry and Mie scattering are used as complementary techniques to LII/LIF. Six operating conditions of the test rig are characterized by the coupled optical techniques to identify the main parameters that affect soot formation in such environment. An exhaustive characterization of the various OC and their correlation with the Landing/Take-Off (LTO) Cycle is proposed. This work narrows down three OC of interest for in-depth studies with sustainable aviation fuels (SAF). These applications are subject to studies on the effect of SAF on soot formation that were evaluated with LII, OH\* and scattering. A matrix of three fuels (Jet A-1, 50:50% vol. Jet A-1: Alcohol-to-Jet (ATJ) and ATJ) was selected to evaluate the fuel impact on soot production for the three selected OC. High-frequency techniques (OH\* and scattering) were implemented to obtain information about the spray dynamics and flame front inside the combustor. The coupled optical techniques identify the parameters leading to soot formation and relate them to the operating conditions or fuel properties.

**Keywords:** Combustion, soot, optical metrology, laser-induced incandescence/fluorescence, light scattering, particle image velocimetry, OH\* chemiluminescence, semi-industrial aeronautic combustor.

## Résumé

La croissance du trafic aérien pousse la communauté de recherche sur la combustion à vouloir une compréhension détaillée des processus physiques et chimiques qui ont lieu dans un moteur d'avion, avec deux objectifs principaux : premièrement, améliorer le processus de combustion et deuxièmement, réduire les émissions gazeuses et particulaires. Une solution au premier problème réside dans la combustion à une pression et une température plus élevées, mais cela peut avoir un impact sur la seconde problématique, notamment en ce qui concerne la production de suie et les émissions de  $\text{NO}_x$ . La solution repose sur le développement d'outils expérimentaux appropriés pour des conditions de combustion représentatives de celles rencontrées dans les moteurs d'avion afin de capturer leurs phénomènes complexes caractéristiques. Ainsi, au cours de cette recherche, des techniques optiques couplées ont été développées et mises en œuvre pour caractériser les particules de suie dans des chambres de combustion similaires à celles des moteurs aéronautiques. L'incandescence induite par laser (LII) est la principale technique sur laquelle les efforts sont dirigés en raison de sa haute sensibilité pour la détection des particules de suie et de sa flexibilité de mise en œuvre autour des installations de combustion semi-industrielles. De plus, le couplage de la LII avec d'autres techniques optiques présente un grand intérêt pour la compréhension des mécanismes et des paramètres conduisant à la formation de la suie. Tout d'abord, la fluorescence induite par laser (LIF) est ajoutée comme technique complémentaire pour détecter les précurseurs de suie connus sous le nom d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Le développement de la LII/LIF a été fait en fonction de l'application sur des bancs d'essai et a été testé pour la première fois sur une flamme à diffusion laminaire  $\text{CH}_4/\text{air}$ . Les principaux résultats sont liés à la configuration planaire des systèmes LII/LIF concernant les facteurs de correction pour l'utilisation d'une nappe laser afin d'analyser une grande région d'intérêt pendant la mesure. De plus, deux configurations optiques (imagerie et spectrale) proposées pour la technique LII ont été étudiées pour évaluer l'incertitude induite par l'étape de conversion du signal LII enregistré en fraction de volume de suie. Ces études ont permis l'application des techniques LII/LIF planaires ainsi que des techniques optiques complémentaires sur un banc d'essai semi-industriel représentatif des conditions de combustion identifiées dans les chambres de combustion aéronautiques. La vélocimétrie par image de particules et la diffusion de Mie sont utilisées comme techniques complémentaires au couple LII/LIF. Six points de fonctionnement du banc d'essai sont caractérisés par les techniques optiques couplées afin d'identifier les principaux paramètres qui affectent la formation de suie dans un tel environnement. Une caractérisation exhaustive des différents points de fonctionnement et leur corrélation avec le cycle normalisé d'atterrissage/décollage (LTO) est proposée. Ce travail permet d'identifier trois points de fonctionnement d'intérêt pour des études approfondies avec les carburants aéronautiques durables (SAF). Ces applications font l'objet d'études sur l'effet des SAF sur la formation de suie qui ont été évaluées avec LII, chemiluminescence  $\text{OH}^*$  et par diffusion. Une matrice de trois carburants (Jet A-1, 50:50% vol. Jet A-1: Alcohol-to-Jet (ATJ) et ATJ) a été sélectionnée pour évaluer l'impact du carburant sur la production de suie pour les trois points de fonctionnement sélectionnés. Des techniques à haute cadence ( $\text{OH}^*$  et diffusion) ont été mises en œuvre pour obtenir des informations sur la dynamique du spray et le front de flamme à l'intérieur de la chambre de combustion. Les techniques optiques couplées permettent d'identifier les paramètres conduisant à la formation de suie et les relient aux conditions de fonctionnement ou aux propriétés du combustible.

**Mots-clés** : Combustion, suie, métrologie optique, incandescence/fluorescence induite par laser, diffusion de la lumière, vélocimétrie par imagerie de particules, chimiluminescence  $\text{OH}^*$ , chambre de combustion aéronautique semi-industrielle.