

## Avis de Soutenance

Arthur DEGENEVE

Soutiendra publiquement ses travaux de thèse intitulés

### *Stabilisation, structure et comportement thermique des oxy-flammes avec un niveau de swirl variable*

dirigés par Thierry Schuller, Clément Mirat, et Ronan Vicquelin

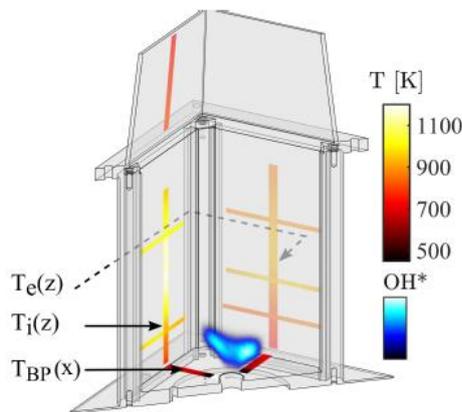
Thèse CIFRE réalisée à l'Université Paris-Saclay, Chaire ANR Oxytec entre Air Liquide et le CNRS.

Soutenance prévue le **vendredi 23 octobre 2020** à 14h00

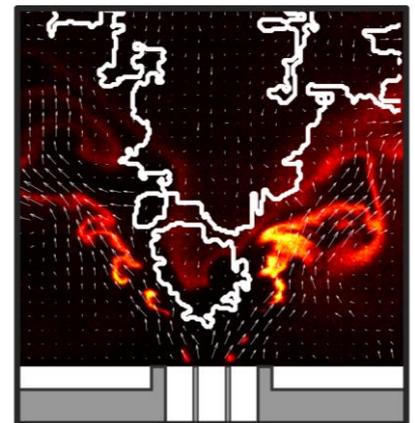
Lieu : Théâtre Rousseau, CentraleSupélec, 3 rue Joliot-Curie, 91192 Gif-sur-Yvette Cedex



*Diffusion de Mie d'un jet turbulent ensemencé et émission visible d'une flamme liftée.*



*Cartographie des températures aux parois mesurées par phosphorescence induite par laser.*



*Champ de vitesse et émission OH obtenues par mesure OH-PLIF/PIV synchronisée.*

Composition du jury proposée :

Prof. Christian Oliver Paschereit  
Prof. Luc Vervisch  
Dr. Gilles Bruneaux  
Dr. Dany Escudé  
Dr. Thierry Poinso  
Prof. Thierry Schuller  
Dr. Clément Mirat  
Prof. Ronan Vicquelin  
Dr. Jean Caudal

TU Berlin  
INSA Rouen, IUF  
IFPEN  
CNRS, CETHIL  
CNRS, IMFT  
Université Paul Sabatier  
CentraleSupélec - CNRS (EM2C)  
CentraleSupélec - CNRS (EM2C)  
Air Liquide, R&D

Rapporteur  
Rapporteur  
Examinateur  
Examinatrice  
Examinateur  
Directeur de thèse  
Encadrant  
Codirecteur  
Invité

## **Titre :** *Stabilisation, structure et comportement thermique des oxy-flammes avec un niveau de swirl variable*

**Mots clés :** Oxy-combustion, Swirl, Turbulence, Diagnostics optiques, Rayonnement, Jets coaxiaux

**Résumé :** Ce travail porte sur la stabilisation, la structure et le comportement thermique d'oxy-flammes turbulentes opérées avec du méthane comme combustible. L'étude recouvre des flammes fonctionnant dans des conditions prémélangées et non prémélangées, avec et sans swirl, et avec un oxydant dont la concentration d'oxygène est variable. Ces flammes sont étudiées sous une large gamme de conditions de fonctionnement grâce à une chambre de combustion polyvalente, et à des diagnostics laser et des outils de calcul haute-fidélité. L'objectif de cette thèse est de répondre à la question suivante. Si un changement de composition du combustible ou de l'oxydant, de la puissance thermique ou une légère modification de l'injecteur est effectué, est-il possible d'ajuster le swirl conféré aux réactifs afin de retrouver la même structure de flamme et le même régime de stabilisation ? Plus de 3000 conditions de fonctionnement sont étudiées, d'abord en condition de prémélange, puis en non prémélangées. L'impact de l'angle d'ouverture d'un divergent placé en sortie d'injecteur sur l'écoulement est étudié sous un angle à la fois théorique et expérimental au moyen de diagnostics optiques. Un modèle est développé pour prédire la position de la zone de recirculation centrale lorsque cet angle varie. Les effets d'une modification de la composition de l'oxydant sur la structure de flamme sont ensuite étudiés lorsque la flamme passe d'une dilution en N<sub>2</sub> à une dilution en CO<sub>2</sub>. Il est démontré que le swirl a un impact considérable sur la structure de la flamme. Les effets d'une dilution en CO<sub>2</sub> se révèlent quant à eux limités. La température et la distribution du transfert thermique sont ensuite caractérisées expérimentalement le long des parois latérales de la chambre de combustion. Un modèle de premier ordre est développé pour expliquer les changements de transferts thermiques observés entre les flammes diluées en N<sub>2</sub> et en CO<sub>2</sub>. Le comportement thermique de la chambre de combustion Oxytec est ensuite étudié à l'aide de la simulation numérique aux grandes échelles couplée à un solveur de rayonnement

Monte Carlo. La prise en compte détaillée du rayonnement thermique modifie faiblement la position de la flamme et la structure de l'écoulement, mais a un impact considérable sur la température des gaz brûlés et sur la distribution du flux thermique à l'intérieur de la chambre de combustion. Un modèle permettant de prédire la température moyenne du gaz et la distribution du transfert thermique des parois lors du passage d'une simulation non couplée à une simulation couplée est finalement proposé.

La suite de l'étude est consacrée à la caractérisation expérimentale des effets du swirl sur la structure et les modes de stabilisation des oxy-flammes en condition non prémélangées et opérées avec un injecteur coaxial dans lequel les deux jets peuvent être swirlés. Une analyse paramétrique est menée en couvrant une large gamme de rapports de flux de moments axiaux et de fractions massiques d'O<sub>2</sub>, et aboutit sur un modèle qui prédit la longueur d'oxy-flammes coaxiales avec et sans swirl. Il est ensuite montré qu'une augmentation du swirl interne peut détacher la flamme des lèvres de l'injecteur. L'origine des différentes structures de flamme et d'écoulement qui en résultent est étudiée plus en détail à l'aide de mesures couplées OH-PLIF / PIV. Il apparaît que le phénomène de détachement de la flamme hors de l'injecteur central est provoqué par un blocage partiel du jet de méthane central lorsque le swirl interne augmente. De plus, la température mesurée à la surface de l'injecteur lorsque la flamme est détachée est considérablement plus faible que lorsque la flamme est accrochée. Enfin, la structure des oxy-flammes coaxiales non prémélangées est étudiée lorsque les swirls centraux et annulaires sont injectés de manière co- et contrarotatives. Il est prouvé qu'un swirl contra-rotatif diminue la recirculation du gaz tandis qu'un swirl co-rotatif l'améliore. Cette analyse aboutit à un modèle prédisant l'évolution de la position du pied d'une flamme lorsqu'elle est décrochée de l'injecteur.

## **Title:** *Stabilization, structure and thermal behavior of oxy-flames with a variable swirl level*

**Keywords:** Oxy-combustion, Swirl, Turbulence, Optical diagnostics, Radiation, Coaxial jets

**Abstract:** The thesis deals with the stabilization, structure, and thermal behavior of turbulent oxy-flames burning methane. It covers flames operated in premixed and non-premixed conditions, with and without swirl conferred to the flow, and with a variable concentration of oxygen in the oxidizer stream. These flames are investigated over a broad range of operating conditions on a versatile lab-scale combustor with laser diagnostics and high-fidelity computational tools. The objective is to answer the following question. If a change of fuel or oxidizer composition, thermal power, or a slight modification of the injector nozzle is made, can the swirl motion conferred to the reactants be adjusted to retrieve the same flame structure and stabilization regime before the modification? The work relies both on parametrical analysis conducted on a large set of experiments and a thorough investigation of selected flames. More than 3000 operating conditions are investigated. Swirled premixed flames are investigated first. The impact on the flow pattern of a diverging cup at the nozzle outlet is investigated both theoretically and experimentally with optical diagnostics. Expressions for the evolution of the swirl level through this diffuser are derived. A model is then developed to predict the position of the central recirculation zone as the swirl angle varies. The study proceeds by assessing effects of a change in the oxidizer composition when switching from N<sub>2</sub>- to CO<sub>2</sub>-dilution on the structure of swirled flames. A new post-processing procedure is presented based on OH-PLIF images to infer the flame surface density and the flame wrinkling factor. It is found that the swirl has a considerable impact on the flame structure, and two flame wrinkling processes are identified depending on the swirl level. Effects of CO<sub>2</sub>-dilution are, in turn, shown to be limited. An experimental characterization of the temperature and heat flux distribution along the combustor sidewalls is then conducted. A low-order model is derived to explain changes of the heat flux distributions for the N<sub>2</sub>- and CO<sub>2</sub>-diluted flames. The thermal behavior of the Oxytec combustor is then investigated with

large-eddy simulations coupled with a Monte Carlo radiative heat transfer solver. It is found that a detailed description of the thermal radiation barely alters the flame and flow position, but has a tremendous impact on the burned gas temperature and the heat flux distribution inside the combustor. A model which enables to predict the global gas temperature and wall heat flux distribution when switching from a non-coupled simulation to a coupled-simulation is finally proposed.

An experimental characterization of the effects of swirl on the structure and stabilization modes of non-premixed oxygen-enriched flames above a coaxial injector in which the two streams are eventually swirled is carried out. A parametric analysis is first conducted over a broad range of momentum flux ratios between the fuel and the oxidizer streams and O<sub>2</sub> mass fraction in the outer stream to derive a model that predicts the length of coaxial oxy-flames with and without swirl. It is found that increasing the inner swirl level detaches the flame from the nozzle rim and lowers the flame liftoff distance. Varying the swirl opening angle or the oxygen concentration in the annular oxidizer stream also enables to control the flame liftoff height. The origin of the different flame and flow patterns is further investigated with the help of coupled OH-PLIF/PIV experiments. It is shown that flame detachment from the internal nozzle is caused by a partial blockage of the inner fuel stream by an intense central recirculation zone when the inner swirl increases. The temperature measured at the nozzle rim of the injector is in this case drastically reduced compared to attached flames. The structure of non-premixed co-axial oxy-flames is finally investigated for co- and counter-rotating operations. It is found that counter-swirl cancels gas recirculation along the burner axis while co-swirl enhances it. This allows to separate effects occurring at the outlet of the injector from swirl dissipation taking place further downstream after the coaxial jets have merged. This analysis has resulted in a model for the evolution of the flame root position and validated for about 200 lifted flames.

