

## Avis de soutenance

### Monsieur Samuel DILLON

soutiendra publiquement, sous réserve de l'accord des rapporteurs,  
ses travaux de thèse intitulés,

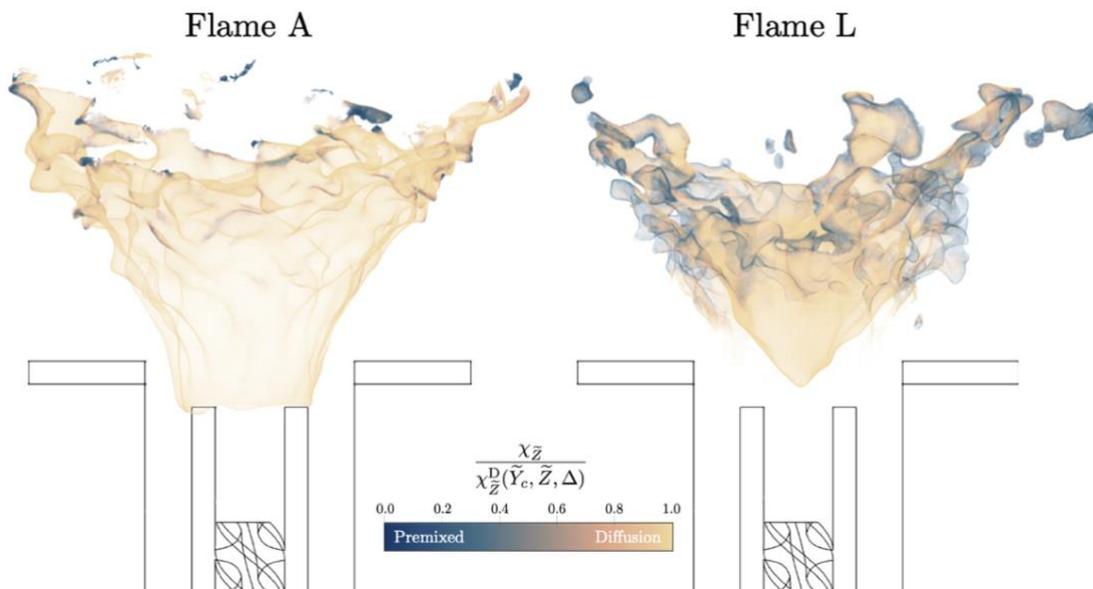
### ***Modelling and simulation of H<sub>2</sub>/air combustion in aeronautical combustion chambers***

*Modélisation et simulation de la combustion  
H<sub>2</sub>/air dans les foyers aéronautiques*  
([lien](#))

Thèse dirigée par Benoît FIORINA et co-encadrée par Renaud MERCIER,  
menée au laboratoire EM2C (CNRS) de CentraleSupélec, Université de Paris-Saclay

**Le mardi 24 juin 2025 à 14h00**

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



**Figure 1:** Structures de flamme sur HYLON avec le modèle F-TACLES multi-régime

### Composition du jury

<b>Thierry POINSOT</b>	Directeur de Recherche, CNRS, Université de Toulouse, IMFT	Rapporteur
<b>Matthias IHME</b>	Professor, Stanford University	Rapporteur
<b>Karine TRUFFIN</b>	Ingénieure de recherche, IFP Energies Nouvelles	Examinatrice
<b>Arnaud MURA</b>	Directeur de Recherche, CNRS, ISAE ENSMA	Examineur
<b>Pasquale Eduardo LAPENNA</b>	Assistant Professor, Sapienza Università di Roma	Examineur

**Titre :** Modélisation et simulation de la combustion  $H_2$ /air dans les foyers aéronautiques

**Mots clés :** Combustion turbulente, LES, HPC, modélisation

**Résumé :** La crise environnementale actuelle a conduit à une forte mobilisation pour décarboniser l'industrie aéronautique. La recherche de carburants alternatifs, tels que l'hydrogène ou les carburants aéronautiques durables (SAF), a engendré de nouveaux défis en ce qui concerne la modélisation. Parmi les nombreux enjeux, la simulation des écoulements réactifs dans les nouvelles chambres de combustion, dans lesquelles de multiples structures de flammes différentes peuvent coexister. La structure interne et la propagation de ces flammes ont un impact significatif sur les mécanismes de stabilisation de flamme et la compréhension de ces phénomènes joue un rôle important dans la conception des chambres de combustion aéronautiques. Les approches de type flamelet dans les simulations des écoulements réactifs restent largement utilisées en raison de leur faible coût de calcul. Parmi les nombreuses approches de type flamelet, les tabulations de flamelets multi-régimes sont apparues comme une solution intéressante pour capturer les structures de flammes partiellement prémélangées. Les deux principaux défis associés à la tabulation de flamelets multi-régimes sont la distinction des différents régimes de combustion et le couplage avec les simulations des grands échelles (LES), où seules les grandes structures turbulentes sont résolues et les structures de flammes fines ne sont souvent pas résolues à l'échelle de la maille. La simulation LES nécessite une modélisation qui tienne compte de la turbulence à l'échelle du sous-maille et des interactions entre la flamme et la turbulence. Bien que les modèles géométriques tels que le modèle de flamme épaissie (TFLES) ou la chimie tabulée filtrée pour LES (F-TACLES) soient bien adaptés aux conditions rencontrées dans les chambres de combustion aéronautiques (régime de flamelet), les efforts de modélisation restent concentrés sur les régimes purement prémélangés. Le formalisme F-TACLES est basé sur une approche de filtrage conservative et peut théoriquement être appliqué aux flammes multi-régimes. Le but de cette thèse est d'étendre le formalisme F-TACLES pour capturer la combustion multi-régime. Le modèle F-TACLES est formellement étendu à la combustion multi-régime en incorporant la stratégie de tabulation partiellement prémélangée 2PFT. Le nouveau modèle utilise des coordonnées de la fraction de mélange filtrée, de la

variable filtrée et du taux de dissipation scalaire résolu. En outre, dans les brûleurs multi-régimes, il existe des zones de diffusion pour lesquelles les épaisseurs de flamme dépendent largement des taux d'étirement locaux. Une nouvelle approche visant à contrôler l'épaisseur réactive filtrée est également proposée, indépendamment des taux d'étirement locaux et de la taille des mailles. Pour garantir une utilisation robuste en LES, une nouvelle fermeture par loi de gradient pour la fraction de mélange est développée dans ce cadre. Ces nouveaux développements sont testés sur une série de cas tests. Des études a posteriori ont été réalisées sur l'injecteur coaxial turbulent HYLON (Hydrogen Low-NOx) développé à l'IMFT Toulouse. Cet injecteur a deux points de fonctionnement qui sont étudiés dans le cadre du workshop TNF, une flamme de diffusion attachée (A) et une flamme partiellement prémélangée liftée (L). Les deux flammes présentent de grandes variations d'étirement locale et ont des mécanismes de stabilisation de la flamme différents, ce qui représente donc un bon candidat pour la validation du modèle. Les modèles F-TACLES actuels et le nouveau modèle sont testés sur les deux points de fonctionnement. La validation multi-régimes est centrée sur la prédiction des structures de flammes partiellement prémélangées, de sorte que les flammes canoniques 1D et 2D sont également étudiées. Une configuration industrielle à haute pression est également étudiée pour tester le modèle dans des conditions où le front de flamme laminaire est fortement sous-résolu sur la grille LES, ce qui est représentatif des simulations de combustion industrielle.

**Title :** Modelling and simulation of H<sub>2</sub>/air combustion in aeronautical combustion chambers

**Keywords :** Turbulent combustion, LES, HPC, Modeling

**Résumé :** The current environmental crisis has led to a strong push towards the decarbonization of the aviation industry. Research into alternative fuels, such as hydrogen or SAF (sustainable aviation fuels) has resulted in new modelling challenges for engineers. Of the many challenges, is the simulation of reactive flows within novel combustion chambers, in which multiple different flame structures can coexist. The inner structure and propagation of such flames has a significant impact on flame stabilization mechanisms and the understanding of such phenomena plays an important role in aeronautical combustor design. Flamelet-type approaches in reactive flow simulations remain popular due to their low CPU cost. Of the many flamelet-type approaches, multi-regime flamelet tabulations have emerged as an attractive solution for capturing partially-premixed flame structures. Two key challenges associated with multi-regime flamelet tabulation are correctly distinguishing between different combustion regimes and the coupling with Large-eddy-simulations (LES), where only large turbulent structures are resolved, and the thin flame structures are often unresolved at the mesh scale. The simulation of turbulent reactive flows using LES requires modelling to account for sub-filter turbulence and flame-turbulent interactions. Despite geometric models such as the thickened flame model (TFLES) or filtered tabulated chemistry for LES (F-TACLES) being well adapted under conditions found in aeronautical combustion chambers (flamelet regime), modelling efforts remain focused on purely premixed regimes. The F-TACLES formalism is based on a conservative filtering approach and can theoretically be applied to multi-regime flames. The aim of this thesis is to extend the F-TACLES formalism to capture multi-regime combustion. The F-TACLES model is formally extended to multi-regime combustion by incorporating the partially-premixed tabulation strategy 2PFT. This new F-TACLES model utilizes the

tabulation coordinates of filtered mixture fraction, filtered progress variable and the resolved scalar dissipation rate of the mixture fraction. Moreover, within multi-regime burners exist diffusion zones for which flame thicknesses are largely dependent on local strain rates. A novel approach which aims at controlling the filtered reactive layer thickness is also proposed, irrespective of the local strain rates and mesh sizes. To ensure a robust application in LES, a new gradient-law closure for the mixture fraction is developed in this framework. These new developments are tested on a range of test cases. A posteriori tests were performed on the 3-D turbulent coaxial HYLON (Hydrogen Low-NO<sub>x</sub>) injector developed at IMFT Toulouse. This injector has two operating conditions which are investigated in the framework of the TNF workshop, an attached diffusion flame (A) and a lifted partially-premixed flame (L). Both flames exhibit large variations in local strain rate and have differing flame stabilization mechanisms and is therefore a good candidate for model validation. The current state of the art F-TACLES models and the newly developed model are tested on both operating conditions. A focus of multi-regime validation is placed on capturing correctly the partially-premixed flame structures, therefore 1D and 2D canonical flames are also investigated. A perspective industrial configuration at high pressure is also investigated to test the model under conditions where the flame front is highly unresolved on the LES grid, representative of industrial combustion simulations.