

Avis de soutenance

Monsieur Stéphane WANG

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

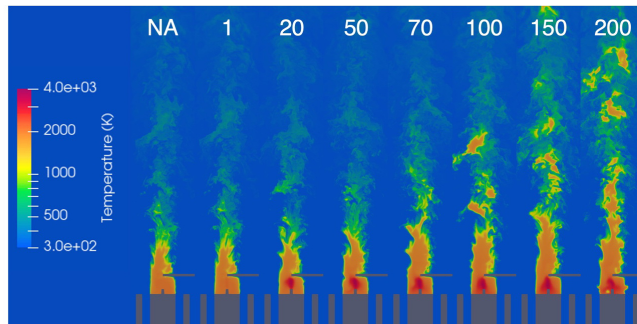
Modeling of Plasma-Assisted Turbulent Combustion for Predicting Flame Stabilization and Pollutant Emissions: From Reduced-Order Models to High-Fidelity Simulations

Modélisation de la combustion turbulente assistée par plasma
pour la prédiction de la stabilisation des flammes et des émissions
polluantes : Des modèles d'ordre réduit aux simulations haute fidélité
([lien](#))

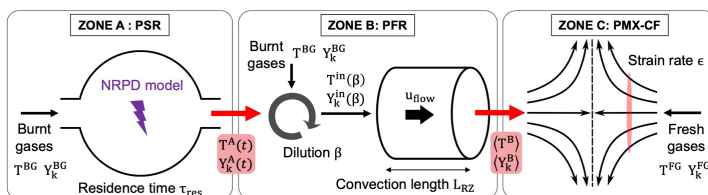
Thèse dirigée par **Benoît FIORINA** et **Christophe LAUX**, et co-encadrée par **Nasser DARABIHA**, menée au laboratoire EM2C (CNRS) de CentraleSupélec, Université Paris-Saclay

Le lundi 11 mai 2026 à 14h00

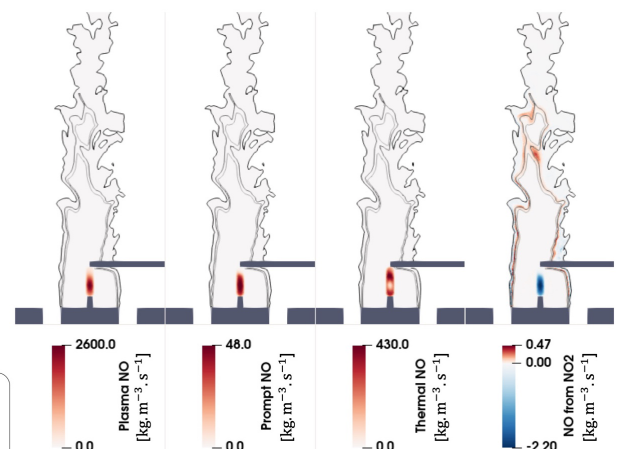
À CentraleSupélec, 3 rue Joliot Curie, 91190 Gif-sur-Yvette
Théâtre Rousseau (Bâtiment Bouygues)



Turbulent premixed methane-air bluff-body flame
stabilized by NRPDs / LES with Blanchard's model



Reduced-order model for turbulent flame enhancement by NRPDs



NO net production rate per formation pathway during
a pulse for a plasma-assisted turbulent premixed
methane-air flame / LES with Blanchard's model

Composition du jury

Laurent SELLE Directeur de Recherche, IFMT-CNRS
Nicolas NOIRAY Associate Professor, ETH Zürich
Aurélié BELLEMANS Associate Professor, VU Brussel
Deanna LACOSTE Associate Professor, KAUST
Bénédicte CUENOT Ingénieur de Recherche, SAFRAN

Rapporteur & Examinateur
Rapporteur & Examinateur
Examinatrice
Examinatrice
Invitée

Titre : Modélisation de la combustion turbulente assistée par plasma pour la prédiction de la stabilisation des flammes et des émissions polluantes : Des modèles d'ordre réduit aux simulations haute fidélité

Mots clés : Combustion assistée par plasma, Décharges nanosecondes répétitives pulsées, Flamme turbulente prémélangée, Simulations aux Grandes Échelles, Modélisation bas-ordre

Résumé : La réduction des émissions polluantes est un enjeu majeur pour les systèmes de combustion propre afin de répondre au changement climatique, protéger la santé humaine et se conformer à des réglementations sur la qualité de l'air de plus en plus strictes. Une solution consiste à diminuer la richesse du mélange, limitant ainsi la température dans la chambre de combustion. Si cela réduit fortement la production d'oxydes d'azote (NO_x), les températures plus basses entraînent des réactions chimiques plus lentes et conduisent souvent à une combustion incomplète. De telles flammes sont donc sujettes à des instabilités et à l'extinction, soulevant des préoccupations de fonctionnement et de sécurité.

La Combustion Assistée par Plasma (CAP) offre une solution prometteuse pour stabiliser les flammes dans des régimes pauvres, pour un large spectre d'applications de combustion. Elle repose sur l'application de décharges électriques à la base de la flamme, générant un plasma qui interagit localement avec les processus de combustion. Parmi les différents types, les décharges Nanosecondes Répétitives Pulsées (NRP) sont particulièrement efficaces énergétiquement. Expérimentalement, dans diverses configurations académiques et semi-industrielles, la CAP utilisant des décharges NRP a démontré sa capacité à prévenir les instabilités, améliorer l'efficacité de combustion et étendre la limite d'extinction pauvres, tout en nécessitant une puissance plasma généralement inférieure à 1% de la puissance théorique de la flamme. Néanmoins, ses effets sur la formation de polluants restent encore peu compris.

Des outils numériques fiables et abordables, complémentaires aux expériences, sont nécessaires aux scientifiques pour élucider les aspects fondamentaux des interactions plasma-combustion, et aux ingénieurs pour concevoir et optimiser les systèmes de CAP. À ce titre, plusieurs simulations 3D de Mécanique des Fluides Numérique (MFN) de CAP turbulente dans des configurations pratiques ont été menées avec succès dans la littérature, démontrant une bonne précision. Ces simulations combinent un modèle phénoménologique de décharges NRP à faible coût CPU et une chimie détaillée de combustion. Cependant, des défis subsistent concernant à la fois la fidélité de la modélisation des décharges plasma et le coût de calcul des simulations 3D complètes de MFN.

Dans cette thèse, un modèle phénoménologique amélioré de décharges NRP, récemment développé par Blanchard et al. (2023), est implémenté dans le code MFN bas-Mach YALES2, afin de réaliser des Simulations aux Grandes Échelles (SGE) en 3D de la CAP dans le brûleur Mini-PAC étudié au EM2C-CNRS. L'impact de la modélisation du plasma sur la stabilisation des flammes turbulentes par décharges NRP, ainsi que les mécanismes physico-chimiques de formation des NO_x, sont investigués. En exploitant les données SGE, une stratégie de modélisation d'ordre réduit pour la stabilisation de flammes assistées par plasma est identifiée, dans le but de développer une alternative à faible coût CPU aux simulations 3D complètes de MFN.

Title: Modeling of Plasma-Assisted Turbulent Combustion for Predicting Flame Stabilization and Pollutant Emissions: From Reduced-Order Models to High-Fidelity Simulations

Keywords: Plasma-assisted combustion, Nanosecond repetitively pulsed discharges, Turbulent premixed flame, Large-eddy simulations, Reduced-order modeling

Abstract: Mitigating pollutant emissions is a major challenge for clean combustion systems to address climate change, protect human health, and comply with increasingly stringent air pollution regulations. One solution consists in decreasing the mixture equivalence ratio, thereby limiting the temperature in the combustion chamber. While this strongly reduces the production of nitrogen oxides (NO_x), the lower temperatures result in slower chemical reactions and often lead to incomplete combustion. Such flames are thus prone to instabilities and extinction, raising operational and safety concerns.

Plasma-Assisted Combustion (PAC) has emerged as a promising solution to stabilize flames in lean regimes, for a wide range of combustion applications. It relies on applying electrical discharges at the flame base, generating a plasma that locally interacts with combustion processes. Among the different types, Nanosecond Repetitively Pulsed (NRP) discharges are particularly energy-efficient. Experimentally, in various academic and semi-industrial configurations, PAC using NRP discharges has demonstrated its ability to prevent instabilities, improve combustion efficiency, and extend the lean blowout limit, while requiring plasma power typically less than 1% of the theoretical flame power. Nevertheless, its effects on pollutant formation remain poorly understood.

Reliable and affordable numerical tools, complementary to experiments, are required by scientists to elucidate the fundamental aspects of plasma-combustion interactions, and by engineers to design and optimize PAC systems. Accordingly, several 3-D Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations of turbulent PAC in practical configurations have been successfully conducted in the literature, demonstrating good accuracy. These simulations combine a low-CPU-cost phenomenological model of NRP discharges with detailed combustion chemistry. However, challenges remain regarding both the fidelity of plasma discharge modeling and the computational cost of full 3-D CFD simulations.

Throughout this thesis, an improved phenomenological NRP discharge model, recently developed by Blanchard et al. (2023), is implemented in the low-Mach number CFD code YALES2 to perform 3-D Large-Eddy Simulations (LES) of PAC in the Mini-PAC burner studied at EM2C-CNRS. The impact of plasma modeling on turbulent flame stabilization by NRP discharges, as well as the physico-chemical mechanisms of NO_x formation, are investigated. Leveraging LES data, a reduced-order modeling strategy for plasma-assisted flame stabilization is identified, with the aim of developing a low-CPU cost alternative to full 3-D CFD simulations.