

Avis de soutenance

Julie Ben Zenou

soutiendra publiquement ses travaux de thèse intitulés,

Thermal Radiation Effects on Flame Speed and Acceleration in Exhaust-Gases-Diluted Mixtures

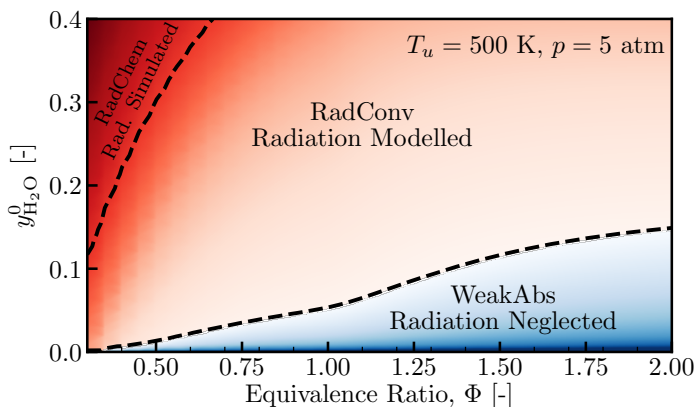
Effets du Rayonnement Thermique sur la Vitesse et l'Accélération de Flamme dans des Mélanges Dilués par des Gaz Brûlés

Le Mardi 27 Mai 2025 à 14h00

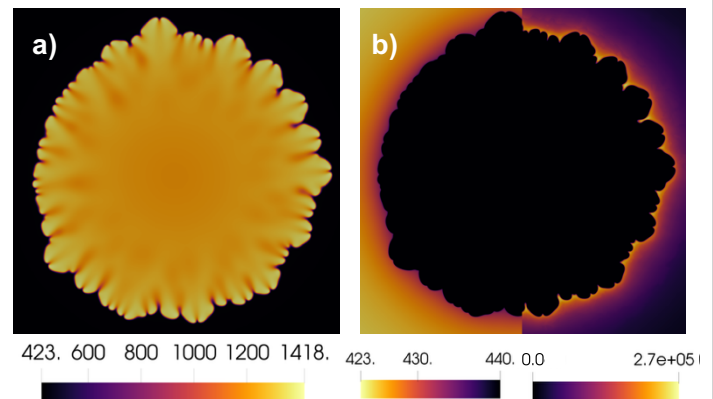
À CentraleSupélec, 3 rue Joliot Curie, 91192 Gif-sur-Yvette
Théâtre Rousseau, Bâtiment Bouygues

[Lien Visio](#)

Thèse dirigée par **Pr. Ronan Vicquelin** et menée au laboratoire EM2C, CNRS, CentraleSupélec, Université de Paris-Saclay



Three regimes for 1D Radiation-Combustion coupling where radiation can be neglected, modelled or needs to be accurately simulated.



Cylindrical lean H₂-Air-H₂O radiative flame. (a) Temperature [K]. (b) Fresh gases temperature [K] and radiative power [W/m³].

Composition du jury

Jean-Louis Consalvi	Maître de Conférences, IUSTI	Rapporteur
Fengshan Liu	Chercheur Senior, NRC Canada	Rapporteur
Nabiha Chaumeix	Directrice de Recherche, ICARE	Examinatrice
Ashwin Chinnayya	Professeur, Institut P'	Examineur
Gilles Parent	Professeur, Université de Lorraine	Examineur
Ronan Vicquelin	Professeur, EM2C	Directeur de thèse

Résumé :

Dans le contexte de la transition énergétique et de la décarbonation, le développement de technologies de combustion plus propres est devenu un défi majeur. La combustion de l'hydrogène et l'oxycombustion du méthane apparaissent comme des procédés prometteurs en raison de leur potentiel d'exploitation neutre en carbone. Cependant, ces technologies sont confrontées à des défis importants liés aux températures de flamme élevées et à l'augmentation possible des émissions de NOx. La dilution des gaz frais par recirculation des gaz brûlés est une solution efficace permettant de modérer les températures de flamme et les émissions polluantes. Au-delà de la modification des propriétés adiabatiques des flammes, la dilution des gaz frais par des espèces radiativement participatives (H₂O, CO₂) soulève d'importantes questions sur les effets du rayonnement thermique — un aspect souvent négligé dans les simulations de flammes libres. Lorsqu'il est pris en compte, le rayonnement se limite généralement à l'émission des gaz brûlés, tandis que l'absorption dans les gaz frais dilués reste largement inexplorée. Cette thèse vise donc à étudier de manière approfondie le couplage entre la combustion et le rayonnement thermique dans deux mélanges dilués d'intérêt particulier : H₂-Air-H₂O et CH₄-O₂-CO₂.

Pour atteindre cet objectif, des simulations couplées combustion-rayonnement de complexité croissante sont réalisées. Des flammes 1D stationnaires, utilisant un cadre numérique combinant chimie et transport détaillés à des propriétés radiatives spectrales précises, sont d'abord considérées pour identifier les phénomènes clés du couplage et déterminer quelles conditions sont les plus significativement affectées par le rayonnement. Des configurations plus complexes, à la fois instationnaires et multidimensionnelles, sont ensuite étudiées avec des simulations numériques directes (DNS) couplées à une méthode Monte Carlo pour le rayonnement. Dans toutes les simulations, les résultats sont systématiquement comparés à des cas adiabatiques équivalents (combustion seule) pour isoler et quantifier les effets spécifiques du couplage rayonnement-combustion.

Les résultats révèlent que le rayonnement thermique impacte significativement les caractéristiques des flammes, particulièrement dans des conditions pauvres et fortement diluées. Deux effets radiatifs principaux sont identifiés : l'émission des gaz brûlés entraîne une réduction de température, tandis que les gaz frais dilués réabsorbent une partie de cette émission, conduisant à leur préchauffage. Ce préchauffage accélère substantiellement la flamme. Pour caractériser ces interactions, des nombres de couplage adimensionnels comparant les échelles de temps de convection, de chimie et de rayonnement sont introduits, permettant de classer les flammes en trois régimes distincts : *WeakAbs*, *RadConv* et *RadChem*. Des modèles prédictifs simplifiés sont développés pour estimer efficacement les effets du rayonnement sans nécessiter de simulations couplées. Dans les configurations instationnaires, le rayonnement provoque des variations continues des vitesses de flamme absolue et de consommation pendant la propagation, remettant en question le concept d'une vitesse de flamme intrinsèque unique. Enfin, dans les flammes cylindriques d'H₂ pauvres, le rayonnement influence également les instabilités thermodiffusives, accélérant leur développement.

Abstract:

In the context of energy transition and decarbonization, the development of cleaner combustion technologies has become a critical challenge. Hydrogen combustion and methane oxycombustion have emerged as promising processes due to their potential for carbon-free or carbon-neutral operation. However, these technologies face significant challenges with high temperatures and possible increase of NO_x emissions. Dilution with exhaust gases (EGR) offers an effective solution by moderating flame temperatures and pollutant emissions. Beyond modifying the adiabatic properties of flames, the dilution of fresh gases by radiatively participating species (H₂O, CO₂) raises important questions about thermal radiation effects — an aspect often neglected in free flame simulations. When considered, radiation is typically limited to emission from burnt gases, while the absorption in diluted fresh gases remains largely unexplored. This thesis thus aims to comprehensively investigate the coupling between combustion and thermal radiation in two diluted mixtures of particular interest: H₂-Air-H₂O and CH₄-O₂-CO₂.

To achieve this objective, detailed coupled combustion-radiation simulations of increasing complexity are performed. One-dimensional steady flames, employing a numerical framework that combines detailed chemistry, transport, and spectrally-resolved radiative properties, are first considered to identify the key phenomena of the coupling and determine which conditions are most significantly affected by radiation. More complex configurations, both unsteady and multi-dimensional, are then considered with Direct Numerical Simulations (DNS) coupled with a Monte Carlo method for radiation. Throughout all simulations, results are systematically compared with equivalent adiabatic cases (combustion-only) to isolate and quantify the specific effects of radiation-combustion coupling.

The results reveal that thermal radiation significantly impacts flame characteristics, particularly in lean and highly diluted conditions. Two primary radiation effects are identified: emission from burnt gases causes temperature reduction, while the diluted fresh gases reabsorb part of this emission, leading to their preheating. This preheating accelerates the flame substantially. To characterize these interactions, non-dimensional coupling numbers comparing the timescales of convection, chemistry, and radiation are introduced, allowing flames to be classified into three distinct regimes: *WeakAbs*, *RadConv*, and *RadChem*. Simplified predictive models are developed to efficiently estimate radiation effects without requiring coupled simulations. In unsteady configurations, radiation causes continuous variations in the absolute and consumption flame speeds during propagation, challenging the concept of a unique intrinsic flame speed. Finally, in lean H₂ cylindrical flames, radiation additionally influences thermodiffusive instabilities, accelerating their development.