

## **Local extinction mechanisms analysis of spray jet flame using high speed diagnostics**

A. Verdier, J. Marrero-Santiago, A. Vandel, G. Godard, G. Cabot, and B. Renou

*CORIA-UMR6614 Normandie Université, CNRS, INSA et Université de Rouen  
76800 Saint Etienne du Rouvray  
France*

Spray combustion involves many complex physical phenomena including atomisation, dispersion, evaporation and combustion, which generally take place simultaneously or within very small regions in the combustion chambers. The interconnection of these phenomena is analysed in a spray jet flame which presents the essential feature of very well defined boundary conditions. Flame structure, flow topology and local transient phenomena such as extinction mechanisms of an *n*-heptane spray jet flame are experimentally analysed. The experimental set-up is composed of an annular non-swirled air co-flow that surrounds a central hollow-cone spray injector, leading to a stable jet-spray flame. The carrier and disperse phases are characterized by PDA, leading to size-conditioned velocity data as well as spatial size distribution of fuel droplet diameter. High Speed Planar Laser Induced Fluorescence of OH (HS-OH-PLIF) at 10 kHz and High Speed Particle Image Velocimetry (HS-PIV) at 5 kHz are simultaneously implemented in order to investigate the interactions between the chemistry, the turbulence and the fuel droplets.

The polydisperse spray distribution yields small droplets along the centreline axis while the majority of the mass is situated as big droplets along the spray borders. The flame structure presents a classical shape, with an inner wrinkled partially premixed flame front and an outer diffusion flame front. Although the High Speed HS-OH-PLIF images are only qualitative, they are found to be of sufficient spatial and temporal resolution to relay the dynamics of extinction events when they are coupled with HS-PIV images. Coupling advanced OH-PLIF image processing and the velocity fields interactions with the flame front, allows three different extinction mechanisms to be identified. In the inner reaction zone, the large turbulence structures generated by the shear layer induced by the air co-flow play a significant role in the dynamics of the inner flame front extinctions. It is found that the frequency at which the inner flame front is locally extinguished is related to the shear-layer structure. At the flame leading edge, large droplets can cross the flame reaction zone and locally extinguish the flame. These large inertial droplets can also reach the burned gases, between the two reactions zones, where they evaporate rapidly. They can also disturb the outer reaction zone due to the low droplet temperature and the rich mixture in the wake of droplet.

## Transition à la détonation dans un canal confiné

Les incidents d'explosions intervenant sur les sites industriels sont souvent accompagnés de dégâts matériels et humains importants. Afin de créer et appliquer des réglementations d'une part, et de réduire les risques d'explosion jugés inacceptables d'autre part, il est nécessaire de comprendre les phénomènes mis en jeu et de prédire les risques liés à ces explosions. C'est dans ce contexte de sécurité industrielle que s'inscrit ce grand défi.

Les explosions sont des phénomènes multi-physiques et multi-échelles complexes: elles mettent en jeu des réactions chimiques, des transports d'espèces et de chaleur, de la turbulence, des instabilités thermo-dynamiques, de l'interaction flamme/obstacle et flamme/choc, de l'acoustique, etc ... Deux types d'explosions peuvent être distingués de par leur mode de propagation: les déflagrations et les détonations. Une déflagration peut être vue comme un mode de propagation subsonique d'une onde de réaction alors qu'une détonation est une propagation supersonique d'une zone de combustion couplée à un complexe d'ondes de choc. Dans un contexte de sécurité industrielle, il est important de signaler que le régime de détonation est bien plus dévastateur que le régime de déflagration, puisqu'il associe des vitesses de propagation pouvant dépasser les 2000 m/s et des surpressions de l'ordre de la centaine de bar. Si une déflagration peut engendrer des dégâts humains et matériels importants dans l'environnement immédiat d'un bâtiment, les dommages associés à une détonation peuvent être enregistrés sur un rayon beaucoup plus grand du fait de la propagation des ondes de choc qui lui sont liés. Lors d'une explosion, il est donc primordial de comprendre quel type de phénomènes est en jeu, déflagration ou détonation, et d'être capable de prédire la transition éventuelle entre ces deux régimes de propagation, i.e. la transition déflagration détonation (DDT).

Bien que les études expérimentales soient nombreuses, elles ne permettent pas d'identifier clairement les raisons de la transition entre ces deux régimes. Des études théoriques ont permis d'identifier des pistes pouvant expliquer ce passage du subsonique au supersonique. La théorie de Chapman-Jouguet [D. L. Chapman , 1889 – E. Jouguet , 1904,1905] sur la vitesse de détonation, les études de Zeldovich Von Neumann et Döring [B. Zeldovich , 1940 – J. Neumann , 1942 – W. Döring , 1943] sur la structure de la détonation ainsi que Lee [J. H. S. Lee The Detonation Phenomenon, 2008] ont permis de mettre le doigt sur un phénomène de couplage entre ondes de combustion et ondes de choc qui permettrait de faire passer brutalement la flamme vers un régime détonant. En parallèle aux expériences, la CFD est également un outil puissant pour mieux comprendre les événements qui précèdent la transition à la détonation.

La configuration sur laquelle se basent nos simulations numériques est la configuration "Gravent explosion channel" proposée par l'université de Munich TUM [L. R. Boeck et. al. S.W. 2016, P. Katzy et. al. P.ofl.C.onN.E. 2016, R. Ettner et. al. J.C. 2014]. Il s'agit d'un canal fermé avec obstacles de 5.4 m de long rempli d'un mélange d'hydrogène et d'air à condition standards de température et pression. Une rangée de 7 obstacles est placée en haut et en bas du canal. Les obstacles permettent d'accélérer la flamme en augmentant sa surface à travers le plissement de son front. La simulation en LES d'un canal d'aussi grandes dimensions est un challenge en lui-même.

Une LES d'une explosion d'un mélange non détonant sera d'abord exposé pour mettre en valeur les mécanismes d'accélération de flamme qui accompagne la propagation d'une déflagration dans un canal avec obstacle. Ensuite une attention particulière sera portée sur la phase de transition à la détonation dans un cas détonnant à l'aide d'une approche DNS.

# Sensibilité des paramètres spectraux Raman à l'évolution physico-chimique d'analogues de suies d'avion en fonction de l'irradiation laser

R. Ikhenazene\*<sup>1</sup>, C. Pirim<sup>1</sup>, Y. Carpentier<sup>1</sup>, C.Focsa<sup>1</sup>, B.Chazallon<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univ. Lille, CNRS, UMR 8523 – PhLAM- Physique des Lasers Atomes et Molécules, F-59000 Lille, France

Le secteur du transport aérien est en plein essor avec des retombées économiques importantes mais cette croissance n'est pas sans conséquence sur l'environnement. En effet, certaines particules solides telles que les suies issues des moteurs d'avion peuvent avoir un effet direct ou indirect sur le climat en ayant un impact sur le forçage radiatif atmosphérique, la formation des nuages et leur durée de vie [1]. De nombreuses études ont été menées pour caractériser ces particules de suie qui sont impliquées dans plusieurs processus physico-chimiques dans l'atmosphère [2]. Ainsi une analyse plus détaillée des propriétés physico-chimiques de ces particules semble nécessaire afin d'approfondir nos connaissances sur leurs rôles dans ces processus atmosphériques.

Dans cette étude, l'analyse Raman a été effectuée avec différentes irradiances sur les échantillons de suies produites par un brûleur CAST (Combustion Aerosol Standard) approvisionné avec différents rapports de mélange propane-air afin de varier le contenu en carbone organique par rapport au carbone total (OC / TC) dans les échantillons. Le spectre Raman de ces échantillons possède deux contribution principales autour de 1380 cm<sup>-1</sup> et 1600 cm<sup>-1</sup> (Raman au premier ordre) qui peuvent être déconvoluées selon le modèle proposé par Sadezky et al (2005) [3] utilisant une combinaison de plusieurs bandes : la bande G qui correspond au graphite idéal (de symétrie E<sub>2g</sub>), la bande D1 qui correspond au graphite désordonné (contribution des bords, de symétrie A<sub>1g</sub>), la bande D2 qui correspond au graphite désordonné (contribution de la surface, de symétrie E<sub>2g</sub>), la bande D3 qui correspond au carbone amorphe, et la bande D4 qui correspond au graphite désordonné (de symétrie A<sub>1g</sub>) ou à des polyènes.

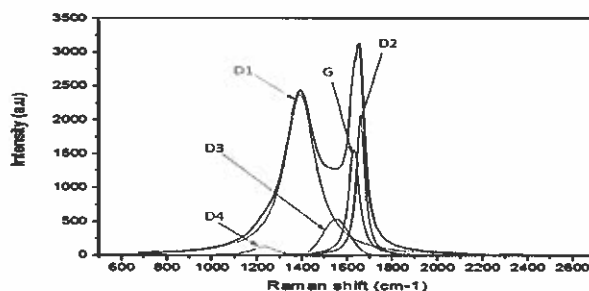


Figure 1. déconvolution d'un spectre Raman d'un échantillon de suie suivant le modèle de sadezky.

Certains paramètres spectraux obtenus par déconvolution peuvent être associés aux propriétés physico-chimiques (structure, composition chimique) des suies [4,5]. Dans nos échantillons, nous avons pu déterminer quels paramètres spectraux (position, largeur à mi-hauteur, rapport des aires des bandes) possèdent une corrélation avec les modifications de structure et de composition chimique des échantillons de suies après expositions à différentes irradiances.

[1]Lee et al. (2010) *Atmos. Environ.* **44**,37, 4678-4734.

[2]Hoose et al. (2012) *Atmos. Chem. Phys.* **12**,20, 9817-9854.

[3]Sadezky et al. (2005) *Carbon*, **43**,8, 1731-1742.

[4] Lapuerta et al. (2011) *Combustion Science and Technology*. **183**,11, 1203-1220.

[5]Ivleva et al. (2007) *Environmental science and Technology* . **41**,10, 3702-3707.

Remerciements: F-X. Ouf (IRSN) and D. Ferry (CINAM) pour la production des analogues de suies d'avion à partir de brûleurs CAST et l'analyse par Microscopie électronique en transmission dans le cadre du projet MERMOSE

This work was supported by the CORACMERMOSE project, funded by French Civil Aviation Authority (DGAC) and by the French National Research Agency (ANR) through the PIA Programme d'Investissement d'Avenir under contract ANR-10-LABX-005 (LABEX CaPPA-Chemical and Physical Properties of the Atmosphere).

## Caractérisation des interactions flamme-vortex

C. Bariki<sup>a</sup>, F. Thiesset<sup>a</sup>, N. Mazellier<sup>b</sup>, C. Chauveau<sup>a</sup>, F. Halter<sup>a</sup>

<sup>a</sup>CNRS-ICARE, Avenue de la Recherche Scientifique, 45072 Orléans Cedex 2 France

<sup>b</sup>Université d'Orléans, INSA de Bourges, PRISME, EA 4229, 45072 Orléans, France

### Résumé

Comprendre et prédire les différents mécanismes en jeu dans les flammes prémélangées turbulentes est un enjeu crucial pour le dimensionnement ou l'optimisation de nombreux systèmes de combustion. Ce défi étant extrêmement difficile à relever, l'étude préalable des interactions entre une flamme et une structure tourbillonnaire fournit un cadre canonique idéal pour mieux appréhender et comprendre les mécanismes physiques à l'œuvre. Dans cette perspective, des études expérimentales ont été réalisées utilisant un brûleur à jet impactant alimenté par un prémélange (méthane et propane). En combinant tomographie rapide et Vélocimétrie par Images de Particules (PIV), nous avons pu caractériser finement les interactions entre une flamme de prémélange et une structure tourbillonnaire toroïdale dont l'axe de rotation est parallèle à celui de la flamme. Le suivi temporel de l'interaction a permis d'extraire différentes informations telles que la dynamique de la surface de flamme, de l'étirement et de la courbure du front de flamme. Le plan d'expérience réalisé balaye une large gamme de paramètres de contrôle en modifiant à la fois la richesse et la composition du mélange réactif ainsi que l'intensité du vortex. Les résultats présentés lors de cette journée seront extraits de cette base de données.

# Etude expérimentale d'une flamme turbulente non-prémélangée CH<sub>4</sub>-air-O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> stabilisée par un swirler

H. Zaidaoui<sup>1,\*</sup>, T. Boushaki<sup>1,2,\*</sup>, C. Chauveau<sup>1</sup>, I. Gökalp<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ICARE CNRS, 1C Avenue de la Recherche Scientifique, 45071 Orléans Cedex 2, France

<sup>2</sup> Université d'Orléans, GTE, IUT, 45067 Orléans cedex 2, France

\*Contact:

[hajar.zaidaoui@cnrs-orleans.fr](mailto:hajar.zaidaoui@cnrs-orleans.fr)

[toufik.boushaki@cnrs-orleans.fr](mailto:toufik.boushaki@cnrs-orleans.fr)

## Résumé

Les effets de l'enrichissement en oxygène et de la dilution en CO<sub>2</sub> sur le comportement d'une flamme non pré-mélangée méthane-air dans un brûleur coaxial à swirler ont été étudiés. La présentation du poster porte plus particulièrement sur les émissions polluantes telles que les NO<sub>x</sub>, le CO<sub>2</sub> et CO, la structure et la stabilité de la flamme. La configuration du brûleur se compose de deux tubes concentriques et un swirler placé dans la partie annulaire permettant la rotation de l'oxydant. Les expériences sont conduites dans une chambre de combustion de 25 kW, d'une forme parallélépipédique, d'1 m de hauteur et de 0,5 m de largeur, refroidie par une circulation d'eau à l'extérieur et isolée par un réfractaire à l'intérieur. Des mesures de chimiluminescence sur OH\* sont effectuées pour décrire la structure et la stabilité de la flamme fournissant ainsi les longueurs et les hauteurs d'accrochage de la flamme. Les mesures sont effectuées pour des concentrations d'oxygène allant de 21% à 35% (en volume), une concentration de CO<sub>2</sub> allant de 0 à 20%. Trois nombre de swirl sont utilisés (0.8, 1.1 et 1.4) avec différentes valeurs de richesse globale (de 0,5 à 1,1). Les hauteurs d'accrochage, les fluctuations de la base de la flamme et les longueurs de flamme sont déterminées en fonction de ces paramètres. Les résultats montrent que l'addition d'oxygène stabilise la flamme, favorise la formation de NO<sub>x</sub> et de CO<sub>2</sub> et diminue la formation de CO. L'addition du CO<sub>2</sub> modifie significativement la forme et le comportement de la flamme. En effet, la flamme devient plus longue, moins intense et moins stable. La dilution du CO<sub>2</sub> réduit la température de la flamme, impliquant ainsi la réduction des NO<sub>x</sub>, et augmente les concentrations de CO<sub>2</sub> et de CO dans les fumées.

**Mots clés :** flamme turbulente, flamme swirlée, enrichissement en oxygène, dilution en CO<sub>2</sub>, émissions polluantes, chimiluminescence.

## Effects of heat losses on the chemiluminescence of burner-stabilized premixed laminar flames

Flame chemiluminescence offers a potential simple and non-intrusive solution to monitor the combustion process. Many studies have already been carried out on different industrial combustion systems and considerable knowledge has been gained on effects of various combustion parameters. The present study intends to evaluate the possibility of using the chemiluminescence signal to monitor a laminar domestic burner used in household gas boilers. One particularity of this burner is a strong heat transfer between the flame and the solid elements leading also to preheating of the gases. Effects of heat losses on the chemiluminescence are experimentally studied in three different configurations, a conical flame burner where combustion can be considered nearly adiabatic, a porous plug burner with flames stabilized by heat losses but with moderate preheating of the reactants, and finally a cylindrical multi-perforated burner used in domestic boilers. In this latter case, effects of heat losses and preheating are predominant. In addition, we perform a numerical study with a 1-D burner-stabilized flame model, to provide a theoretical support for the experimental results. Simulations are performed using GRI 3.0 reaction mechanism augmented with chemiluminescence reactions including  $\text{CH}^*$  and  $\text{OH}^*$ . It is found that the linear relationship between the chemiluminescence intensities of  $\text{CH}^*$ ,  $\text{OH}^*$ ,  $\text{CO}_2^*$  radicals and the mixture flowrate is no longer valid when flames are closely attached to the burner surface with sizable heat losses. The transition between the two regimes takes place when the bulk injection velocity falls below the adiabatic burning velocity. Below this threshold, simulations of burner-stabilized flames with the detailed reaction mechanism allow to capture the nonlinear evolution of the chemiluminescence signal with the flowrate.

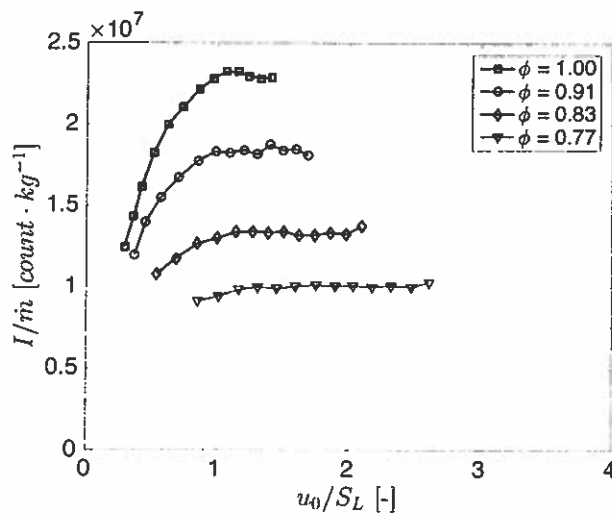


Figure 1 flowrate normalized  $\text{OH}^*$  intensity of a porous plug burner

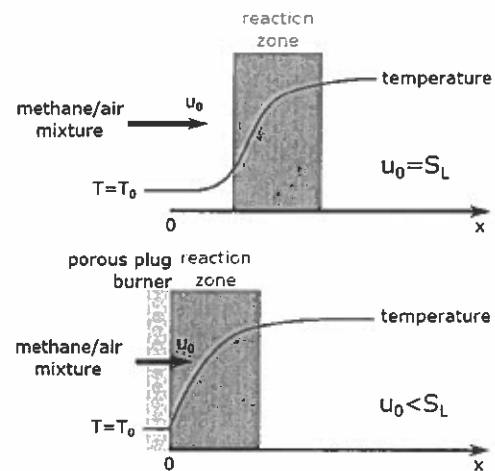


Figure 2 Model of 1-D freely-propagating (top) and burner-stabilized (bottom) flames

# Pulverized coal devolatilization and oxidation in strained methane/air flames

Meng Xia, Diego Zabrodiec, Philippe Scouflaire, Benoît Fiorina, Nasser Darabiha

Laboratoire EM2C, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, Châtenay-Malabry, France

## Abstract:

With the growing demand of more reliable and cleaner energy supply, effectively reducing pollution from coal combustion is significant for traditional coal-fired power plants to limit greenhouse gases and respect air pollutant emission standards. Also, in order to characterize the behavior of pulverized coal flames such as the flame structure, stability and pollutant formation, both experimental techniques and numerical simulations are essential to get a better understanding of the complex physical and chemical processes of coal combustion. The objective of the present work is to study experimentally and numerically the combustion of pulverized coal in a mixture of methane/air reactive flow and to investigate the impact of coal pyrolysis sub-models on flame structure and pollutant formation.

The target configuration is a laminar methane/air in a strained-flow burner fed by coal particles. The injected coal/methane/air mixture is impinging a wall surface to enhance stabilization. The inlet fresh gas boundary conditions are well characterized in the experiments in terms of gas velocity but also number of coal particles and mean particle diameter. Coal particles reactions take place in the hot region located between the flame front and the wall. Visualization of OH\*, CH\* and C<sub>2</sub>\* chemiluminescence, Laser Induced Fluorescence measurements of OH radical and flame emission spectroscopy in the ultraviolet-visible region are performed to identify the chemical flame structure and species concentration. Emission spectra related to coal particle conversion are examined for the quantification of intermediate species during the combustion process.

Numerical investigations are performed, where the governing equations are fully coupled between gas and particle phase. Detailed kinetic mechanisms, NO<sub>x</sub> chemistry and OH\*, CH\*, C<sub>2</sub>\* sub-mechanisms are considered for gas-phase kinetics. Coal devolatilization sub-models are challenged on this configuration for describing particle conversion. The analysis of obtained results confirms that the presence of heavier hydrocarbons released by coal pyrolysis has a significant influence on the concentration of free radicals in the post-flame region. Finally, the effects of volatile matter composition, strain rate and particle size on pollutant formation are studied. These studies help to a better understanding of the local flame structure of the pulverized coal combustion.

## **Dynamics of a transcritical coaxial flame submitted to fuel injection-rate modulations**

Robin Nez<sup>1,2</sup>, Thomas Schmitt<sup>1</sup>, Sébastien Ducruix<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Laboratoire EM2C, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, Grande Voie des Vignes, 92295 Châtenay-Malabry, France*

<sup>2</sup> *CNES DLA, 52 Rue Jacques Hillairet, 75612 Paris Cedex, France*

The present study is motivated by the need for improved understanding and modeling capabilities for high-frequency combustion instabilities in liquid-rocket engines. In the course of qualifying a new engine, manufacturers indeed still rely on extensive hot fire test campaigns. On the other hand, while having recently demonstrated its capabilities at predicting the dynamics of transcritical flames, large-eddy simulation (LES) of full-scale engines remains out of reach for the aerospace industry. This work employs another strategy, using large-eddy simulations of a much more canonical configuration in order to characterize thermoacoustic coupling mechanisms that can be at play in liquid-rocket engines. These coupling mechanisms can possibly trigger combustion instabilities. The objective will subsequently be to propose low-order models for these mechanisms, models that will contribute to a low-order stability analysis tool.

In particular, it is established that acoustic pressure fluctuations within the combustion chamber or the engine's feeding system can induce temporal modulations of the propellants injection velocities. The dynamic response of a transcritical coaxial flame to such velocity modulations is here investigated through large-eddy simulation. The annular fuel stream is acoustically modulated at several frequencies. It is shown that the heat-release rate distribution is highly correlated to the flame stretch rate perturbations induced by the modulation. The temporal response of the total heat-release rate strongly depends on the modulation frequency and a classical low-pass behavior is observed for the response amplitude. The phase-lag proves to evolve linearly with the modulation frequency. The thermoacoustic contribution to the acoustic energy budget depending largely on the phase-lag between heat-release and pressure fields, this mechanism's phase-lag is then one of the key parameters for the prediction of combustion instabilities.



# ETUDE EXPÉRIMENTALE DU BRUIT GÉNÉRÉ PAR UNE FLAMME DE PRÉMÉLANGE SWIRLÉE CONFINÉE

R. Gaudron<sup>†</sup>, M. Gatti<sup>†</sup>, C. Mirat<sup>†</sup>, T. Schuller<sup>†</sup>

<sup>†</sup>Laboratoire EM2C, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, Grande Voie des Vignes, 92295 Chatenay-Malabry cedex, France

E-mail: [renaud.gaudron@centralesupelec.fr](mailto:renaud.gaudron@centralesupelec.fr)

Le niveau sonore dans les chambre de combustion et sa distribution spectrale sont des éléments difficiles à déterminer lors de la phase de conception. Des tests sont souvent menés sur des prototypes pour déterminer si les niveaux de bruit atteints sont acceptables et si l'appareil peut être utilisé de façon sûre. Pour développer des méthodes de prévision de ces phénomènes, un foyer équipé de systèmes de modulation de l'écoulement en amont et en aval a été développé au laboratoire EM2C. Enregistrer la réponse des flammes soumises à des modulations contrôlées en amont et en aval permet de déterminer les différentes composantes du spectre des fluctuations de pression dans le foyer. Ces premiers travaux montrent comment identifier la partie cohérente du spectre de pression. Le foyer développé permet de stabiliser par swirl des flammes méthane/air prémélangées et confinées. Différents actuateurs et éléments géométriques peuvent être ajoutés. On étudie ici comment le spectre de pression est modifié lorsque des tubes en acier de différentes longueurs sont ajoutés au-dessus de la chambre de combustion. Des situations stables et avec des instabilités thermo-acoustiques sont identifiées. Ces modes sont étudiés expérimentalement à l'aide de microphones, d'un fil chaud dans l'injecteur, d'un photomultiplicateur et d'une caméra ICCD. Lorsque le foyer est stable, on montre comment à partir de la fonction descriptive de flamme (FDF) on peut retrouver la fréquence et le niveau du mode naturellement instable.

# Etude des modèles de déconvolution pour la prédiction de la propagation et de la structure de flammes pré-mélangées filtrées

Cédric Mehl <sup>a, \*</sup>, Jérôme Idier <sup>b</sup> and Benoît Fiorina <sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Laboratoire EM2C, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay,  
Grande Voie des Vignes, 92295 Châtenay-Malabry cedex, France*

<sup>b</sup> *IRCCyN, 1 rue de la Noe, Nantes, 44321 France*

Les échelles d'espace et de temps dans les écoulements turbulents réactifs couvrent une large gamme. Cela implique une discrétisation numérique très fine, et donc un temps de calcul prohibitif pour des configurations ayant un intérêt pratique. Une technique couramment utilisée pour maintenir le coût de calcul à des niveaux raisonnables est la simulation aux grandes échelles (en anglais : LES). Celle-ci consiste à résoudre des équations de conservation filtrées. L'un des problèmes fondamentaux de cette approche concerne la fermeture de ces équations. Cela concerne par exemple les taux de réactions chimiques, dont la fermeture est au cœur de la majorité des études numériques en combustion turbulente. La plupart des modèles actuellement utilisés reposent sur des hypothèses fortes concernant le type d'écoulement et le type d'interactions entre les flammes et la turbulence. Une approche récemment envisagée et pouvant potentiellement permettre une fermeture plus universelle des équations est de déconvoluer les scalaires transportés. En inversant le filtre LES, des scalaires comme les fractions massiques d'espèces peuvent être ainsi reconstruites afin de calculer les termes non-fermés des équations de transport, notamment les taux de réaction filtrés. L'opération de déconvolution est cependant mal-posée au sens de Hadamard et est, dans sa version discrète, très sensible aux perturbations. L'objectif de la présente étude est d'évaluer la capacité de modèles basés sur la déconvolution à simuler la propagation d'une flamme laminaire pré-mélangée. Ce cas pourtant très simple permet d'étudier de manière approfondie le comportement de la déconvolution quand elle est confrontée à un phénomène très localisé en espace. Pour cela, quatre modèles de déconvolution sont testés et comparés : la méthode de déconvolution approximative utilisant la méthode de déconvolution de Van Cittert et très répandue pour la simulation d'écoulements non réactifs, une méthode basée sur une décomposition de Taylor d'un filtre Gaussien, une méthode basée sur la résolution d'un critère quadratique pénalisé, et enfin une méthode combinant les itérations de Van Cittert avec un modèle paramétrique pour récupérer de l'information en sous-maille. Les tests proposés analysent l'aptitude de ces modèles à récupérer la bonne vitesse de propagation de la flamme et sa structure. Les résultats montrent qu'il est nécessaire d'ajouter de l'information sur les petites échelles afin d'avoir une propagation stable de la flamme. Les méthodes permettent de récupérer la bonne structure de flamme lorsque la taille de filtre est faible mais ne sont pas très robustes dès lors que la taille de filtre atteint une valeur critique.

---

\*Corresponding author. Email : [cedric.mehl@centralesupelec.fr](mailto:cedric.mehl@centralesupelec.fr)

# Instabilités de flammes de prémélange dans un brûleur de Hele-Shaw

*Elias AL SARRAF*

*Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, IRPHE, Marseille, France*

Les simulations de combustion turbulente sont utilisées pour dimensionner les systèmes de combustion et réduire les émissions polluantes. Elles font généralement appel à des techniques comme les méthodes de Large Eddy simulation, les méthodes statistiques (RANS) ou la simulation numérique directe (DNS). Pour des flammes fortement instables (flammes auto-turbulentes) il est possible d'utiliser une équation modèle d'évolution de front de flamme (l'équation de Sivashinsky) qui permet de calculer beaucoup plus rapidement des propriétés statistiques de ces flammes. Cependant cette équation nécessite de connaître le taux de croissance de l'instabilité en fonction du vecteur d'onde qui est de la forme :

$$\sigma \propto K \left(1 - \frac{K}{K_c}\right), \quad (1)$$

L'objectif du travail est d'évaluer  $K_c$ , le vecteur d'onde de coupure dans un brûleur de Hele-Shaw formé par deux plaques de verre (150x50cm) très rapprochées pour que la propagation de flamme soit quasi-2D. Grâce à un système de forçage constitué par des plaques modulées spatialement avec différentes longueurs d'onde, le taux de croissance linéaire de ces perturbations peut être mesuré même en présence du développement spontané de l'instabilité avec la longueur d'onde la plus instable. Les valeurs mesurées de  $\sigma(K)$  pour différentes flammes de propane sont ensuite ajustées pour évaluer les paramètres de la relation de dispersion de la théorie linéaire. A richesse constante et pour des valeurs croissantes de la dilution en oxygène  $\delta = O_2/(O_2 + N_2)$ , le vecteur d'onde de coupure  $K_c$  augmente avec la vitesse de flamme ; il augmente également lorsqu'on augmente la richesse à vitesse constante en relation avec l'évolution des effets thermo-diffusifs quand l'oxygène limite la réaction.

## Dynamique non-linéaire des flammes de prémélange : expérience et modélisation

B. RADISSON<sup>1</sup>, C. ALMARCHA<sup>1</sup>, E. AL-SARRAF<sup>1</sup>, J. QUINARD<sup>1</sup>, E. VILLERMAUX<sup>1</sup>, et B. DENET<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Aix-Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, IRPHÉ, UMR 7342, 13384 Marseille, France

Les flammes de prémélanges sont sujettes à des instabilités intrinsèques résultant d'une compétition entre effets hydrodynamiques et thermo-diffusifs [1, 2]. En conséquence, la surface du front se plisse, formant ainsi des motifs cellulaires. Le front de flamme est alors le siège d'une dynamique non linéaire complexe. La simulation numérique directe d'écoulements réactifs, pour des domaines d'étude de grande taille (i.e largeur de flamme  $L \gg \lambda$  la longueur caractéristique de l'instabilité) restant difficile, la compréhension fine de ces mécanismes passe par le développement de modèles simplifiés. Pour les flammes thermo-diffusivement stables, le rapport de densité entre les gaz amont et aval  $\theta$  est le seul paramètre déstabilisant. Sivashinsky propose donc d'étudier la dynamique faiblement non linéaire et obtient une équation décrivant la dynamique du front [3] :

$$\phi_t + \frac{u_L}{2} a \phi_x^2 = u_L \Omega \left( \frac{\phi_{xx}}{k_c} + I(\phi, x) \right) \quad (1)$$

où  $\phi(x, t)$  est la hauteur du front par rapport à sa position moyenne,  $u_L$  la vitesse laminaire de flamme,  $k_c$  le nombre d'onde de coupure,  $a$  et  $\Omega$  des paramètres dépendant de  $\theta$  et  $I(\phi, x)$  un opérateur qui correspond à la multiplication par  $k$  dans l'espace de Fourier. Plus tard Thual et al. [4] ont montré que (1) possède des solutions analytiques sous la forme de solutions en pôles dans le plan complexe. Dans cette étude on cherche à comparer la dynamique décrite par le modèle de Sivashinsky avec l'expérience.

Le dispositif expérimental est constitué de deux plaques de verre verticales de 150 cm de haut, 50 cm de large et distantes de 5 mm l'une de l'autre (brûleur de Hele-Shaw [6]). Le brûleur est initialement rempli (par le bas) d'un prémélange air-propane de richesse 0.8, la flamme est alors initiée sur le haut de la cellule comme une flamme de bec Bunsen. Lorsque l'écoulement de gaz frais est arrêté, la flamme commence sa propagation vers le bas, puis se déstabilise sous l'effet de l'écoulement à travers le front, révélant une dynamique non-linéaire complexe que l'on enregistre à l'aide d'une caméra rapide. Le modèle de Sivashinsky est intégré à partir d'une condition initiale issue de cette expérience, et l'évolution obtenue est comparée à celle observée expérimentalement. L'accord est excellent sur une durée d'environ 10 fois le temps caractéristique de l'instabilité. En revanche, quand les non-linéarités deviennent trop importantes (i.e pente trop forte) le front ne peut plus être décrit comme une fonction de  $x$  et la comparaison Sivashinsky/Expérience n'est alors plus possible. Cependant, si l'on étudie la dynamique du front d'un point de vue statistique (ici statistique des tailles de cellules), on remarque que le modèle de Sivashinsky reste en très bon accord avec l'expérience, y compris aux temps longs, et ce pour une large gamme de richesse (0.8 à 1.3). De plus, on montre que cette statistique concorde bien, avec la statistique théorique caractéristique des phénomènes d'agrégation [7] — ce qui est en accord avec une description en pôles s'agréant entre eux — excepté pour les grandes tailles de cellules pour lesquelles les effets de gravité introduisent une longueur de coupure. Le rôle de ces derniers sera également discuté dans cette présentation.

### Références

- [1] Landau, L. D. (1944). On the theory of slow combustion. *Acta physicochim. URSS*, 19(1), 77-85.
- [2] Markstein, G. H. (1964). Perturbation analysis of stability and response of plane flame fronts (Perturbation analysis of stability and response of plane flame fronts). 1964., 15-74.
- [3] Sivashinsky, G.I. "Nonlinear Analysis of Hydrodynamic Instability in Laminar flames—I. Derivation of Basic Equations." *Acta Astronautica* 4, no. 11-12 (November 1977) : 1177-1206. doi :10.1016/0094-5765(77)90096-0.
- [4] O. Thual, U. Frisch, and M. Henon. "Application of Pole Decomposition to an Equation Governing the Dynamics of Wrinkled Flame Fronts." *Journal de Physique* 46, no. 9 (1985) : 1485-94. doi :10.1051/jphys :019850046090148500.
- [5] Michelson, D. M., & Sivashinsky, G. I. (1977). Nonlinear analysis of hydrodynamic instability in laminar flames—II. Numerical experiments. *Acta Astronautica*, 4(11-12), 1207-1221.
- [6] Abid, M., Sharif, J., & Ronney, P. D. (1998). Propagating fronts in Hele-Shaw cells : effects of buoyancy and thermal expansion. In *Spring Technical Meeting of the Western States Section of the Combustion Institute*.
- [7] Vledouts, A., Vandenberghe, N., & Villermaux, E. (2015, December). Fragmentation as an aggregation process. In *Proc. R. Soc. A (Vol. 471, No. 2184, p. 20150678)*. The Royal Society.

## Mesures multi-scalaires instantanées 1D dans les flammes turbulentes : Diffusion Raman Spontanée du CO<sub>2</sub>

La compréhension approfondie des phénomènes de combustion, motivée par des raisons économiques comme écologiques, a justifié le développement de diagnostics optiques de plus en plus sophistiqués au cours des dernières années. Plus particulièrement, les modèles de combustion théoriques et numériques nécessitent des valeurs précises de grandeurs scalaires et de gradients pour être validés. La Diffusion Raman Spontanée (DRS) se révèle être une réponse originale et percutante à ces besoins de mesures multi-scalaires en flammes. Grâce à un système laser sur-mesure (impulsion laser 1J produite par un laser Nd: YAG à 532 nm) et un système de collection atypique (obturateur électro-optique ultra-rapide et spectrographe basse résolution), des mesures sont effectuées in-situ dans les flammes à de haute résolution temporelle et spatiale (310ns et 300 $\mu$ m). Malgré un rapport signal sur bruit assez faible qui peut limiter parfois la précision ou la détectabilité de certaines espèces en mesure mono-coup, il est possible d'effectuer ces mesures multi-espèces simultanées dans des flammes turbulentes.

La température est déterminée à partir de spectres DRS par une procédure de minimisation qui compare les spectres expérimentaux et synthétiques. Cette méthode par ajustement présente l'avantage de fournir des valeurs de température absolue, sans étalonnage. Cependant, une connaissance avancée des spectres Raman des molécules étudiées est requise pour construire correctement les spectres synthétiques. La densité moléculaire est quant à elle obtenue à partir de l'aire mesurée du spectre Raman synthétique de chaque molécule à la température préalablement déterminée. Jusqu'à présent, ces mesures étaient principalement limitées à l'étude de N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> et CO, c'est-à-dire des molécules diatomiques, en raison de leurs spectres Raman simples et de données spectroscopiques bien connues.

Dans le cas des molécules polyatomiques, il n'existe finalement que peu bases de données spectroscopiques dans la littérature, en particulier pour les températures élevées. Cependant, l'introduction récente d'un modèle théorique du spectre DRS de CO<sub>2</sub> dans la procédure de minimisation étend les mesures de température et de densité à cette molécule polyatomique majeure.

Les premières étapes de validation des mesures de CO<sub>2</sub> dans des environnements simplifiés sont présentées. Des spectres Raman moyens et instantanés de CO<sub>2</sub> ont été traités par la procédure de minimisation de spectres, donnant lieu à des mesures moyennes ou mono-coup de température et de concentration de CO<sub>2</sub>. La précision et la sensibilité de ces mesures ont été analysées dans des flux chauffés électriquement et dans des flammes laminares pour différentes richesses. Ceci montre le potentiel du nouveau modèle théorique de DRS du CO<sub>2</sub> pour le diagnostic optique de combustion.

**Doctorant :** Frangieh Nicolas

**Directeur de thèse :** Morvan Dominique

**Sujet de thèse :** Physique & Modélisation du comportement des feux de forêt.

**Laboratoire :** *M2P2 de Mécanique, Modélisation & Procédés Propres (M2P2)  
UMR 7340 Aix-Marseille Université, CNRS, Ecole Centrale de Marseille.*

**Résumé et contexte général du sujet de thèse :**

L'objectif du sujet proposé est d'étudier par simulation numérique le comportement de feux se propageant librement à travers un couvert végétal homogène ou hétérogène. Ce problème multi-échelle très complexe, associant différents phénomènes non-linéaires, tels que la turbulence, la combustion, le rayonnement, peut être modélisé à partir d'une formulation multiphasique, pour laquelle le système couplé formé par la strate de végétation et l'atmosphère ambiante est représenté comme un milieu poreux peu dense immergé dans une phase gazeuse. L'évolution dans le temps des variables décrivant l'état de ce système (vecteurs vitesse, température, composition chimique de l'atmosphère ...) est calculée à partir de la résolution d'équations de conservation (masse, quantité de mouvement, énergie ...) incluant des termes supplémentaires représentant les interactions multiples entre les phases solides (la végétation) et la phase gazeuse (l'atmosphère). Les simulations numériques seront réalisées à partir du code FIRESTAR3D, dont le développement a démarré avec le programme européen FIREPARADOX, sur les machines parallèles du centre de calcul de l'AMU (Equip@Meso).

Ces travaux se situent dans la continuité de ceux réalisés depuis plus de dix ans à travers notre participation aux 4 programmes européens suivants sur les feux de forêt : EFAISTOS (4e PCRD), FIRESTAR, EUFILAB (5e PCRD), FIREPARADOX (6e PCRD). Différents aspects pourraient être abordés au cours de cette thèse, tels que : les effets du vent et de la pente sur le comportement (vitesse de propagation, intensité) des feux, l'étude des mécanismes de transition entre un feu de surface et un feu de cime, l'impact d'un brûlage dirigé conduit en zone boisée, sur le sol (et les banques de graines) et sur le feuillage des arbres, l'interaction entre deux fronts d'incendie et l'optimisation des conditions de mise en œuvre d'un contre-feu. Les travaux seraient réalisés en étroite collaboration avec le département de Génie Mécanique de l'Université Libanaise (Prof. Gilbert ACCARY) et l'Université de Toulon (Doc. Sofiane MEARADJI). Sur le plan international, nous sommes en constante relation avec l'ensemble de la communauté scientifique qui travaille sur la problématique des feux de forêt aux Etats-Unis (l'Université du Maryland, US Forest Service ...), en Australie (le CSIRO, l'Université Victoria ...) en Europe et en France (l'Université d'Edinbourg, l'INRA Avignon, CEMAGREF Aix-en-Provence, l'Université de Corse ...).

Ce sujet se situe à l'interface entre deux écoles doctorales : l'ED Sciences de l'Environnement et ED Mécanique, Physique, Micro & Nanoélectronique. Le laboratoire M2P2 est localisé dans les locaux de l'Ecole Centrale de Marseille, au sein du technopôle de Château Gombert (Marseille).

[Nicolas.frangieh1@hotmail.com](mailto:Nicolas.frangieh1@hotmail.com)

Tél : (+33) 0609185309

## **Compétition mélange/propagation/auto-inflammation dans les flammes non-prémélangées**

L'étude concerne les phénomènes de transport et d'inflammation dans des régimes de combustion non prémélangée. L'auto-inflammation se produit lorsque la température et la pression d'un mélange sont suffisamment importantes pour qu'il puisse s'allumer spontanément sans apport extérieur d'énergie [1]. Trois temps caractéristiques: le temps de mélange, le temps d'auto-inflammation et le temps chimique caractéristique de la propagation (flamme laminaire de prémélange) sont introduits pour analyser la compétition entre ces différents mécanismes. Pour cela, trois variables permettant d'étudier ces mécanismes sont introduites: une fraction de mélange (moyenne et variance), une variable propagative (variable de progrès moyen) et le temps de résidence des particules fluides.

La configuration de Dally [2] est composée de trois entrées débitantes: un jet de combustible, un écoulement annulaire co-courant d'air vicié chaud et un écoulement externe d'air froid. La température élevée du co-courant permet l'auto-inflammation du mélange. Une flamme "décrochée" est alors observée. Deux outils de calcul nécessaires aux travaux: CFD (logiciel libre Code\_saturne), cinétique chimique (logiciel libre Cantera) sont utilisés pour réaliser des études paramétriques qui servent à étudier la compétition entre la propagation de cette flamme et l'auto-inflammation. Le résultat du calcul permet de positionner la flamme combustible/air chaud dans l'écoulement.

[1] E. Mastorakos, 2009, Ignition of turbulent non-premixed flames, *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 35, n°1, p. 57-97

[2] B.B. Dally, A.N. Karpetis, R.S. Barlow, 2002, Structure of turbulent non-premixed jet flames in a diluted hot coflow, *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 29, n°1, p. 1147-1154