

# MÉTROLOGIE OPTIQUE

## pour l'optimisation de la combustion aéronautique...

### Quel avenir ?

Frédéric GRISCH

Bruno RENOU

Gilles CABOT

Mourad BOUKHALFA

CORIA-UMR 6614

Normandie Université, CNRS-

Université et INSA de Rouen

[frederic.grisch@coria.fr](mailto:frederic.grisch@coria.fr)

Le transport est un des éléments essentiels pour le développement des économies mondiales. Actuellement, les combustibles issus de ressources fossiles restent les sources d'énergie majoritaires pour les transports terrestre et aéronautique. Dans un contexte où ces combustibles sont considérés comme des responsables majeurs de l'augmentation de l'effet de serre, les industriels du domaine du transport se retrouvent soumis à de fortes contraintes, dont le respect doit permettre l'émergence des moteurs, notamment aéronautiques, du futur.

Les contraintes qui pèsent sur les industriels du domaine du transport sont aujourd'hui nombreuses :

- éduction des émissions de gaz à effet de serre afin de limiter le réchauffement climatique. Le domaine du transport est responsable d'environ un quart des émissions de CO<sub>2</sub> dans le monde,
- épuisement à long terme des ressources fossiles, impliquant une diversification des sources de combustible pour les systèmes de propulsion, et la recherche de sources d'énergie alternatives,
- législations de plus en plus contraignantes concernant les émissions d'oxydes d'azote (NOx), du monoxyde de carbone (CO), des suies mais aussi des nuisances sonores,
- maintien, voire accroissement de sa compétitivité dans un secteur concurrentiel soumis à l'émergence de nouveaux acteurs asiatiques à plus bas coût.

Dans le domaine du transport aérien, ces contraintes se matérialisent par la réglementation imposée par la communauté européenne ACARE (Advisory Council for Aeronautics

Research in Europe) destinée à réduire les émissions de CO<sub>2</sub> (-50%), NOx (-80%) et celles du bruit (-50%) à horizon 2020. Les industriels aéronautiques sont alors amenés à proposer de nouvelles chambres de combustion haute pression « propres » fonctionnant en régime pauvre, c'est-à-dire produisant un excès d'air par rapport au carburant injecté, ce dernier étant injecté en spray pour s'évaporer rapidement. Le grand pouvoir de ces régimes de combustion est d'abaisser la température de flamme pour réduire mécaniquement les NOx. En contrepartie, la combustion pauvre présente une stabilité de flamme moins robuste, avec un risque d'extinction de flamme et de possibles remontées de flamme pouvant dégrader de manière irréversible la chambre de combustion. Ces problèmes ont été partiellement résolus avec l'avènement des injecteurs « multipoint ». Ces injecteurs comportent une zone pilote brûlant en continu et une zone périphérique principale dans laquelle des micro-zones d'injection de carburant servent à obtenir un mélange uniforme carburant/air dans la chambre de combustion.

Une autre fonctionnalité de ces chambres de combustion réside dans l'augmentation de la pression pouvant transformer le comportement de l'injection de carburant. Lorsque la pression de fonctionnement est voisine ou supérieure à la pression critique du carburant, une transition de phase d'un état sous-critique à un état supercritique peut s'opérer. Il en résulte une modification des procédés d'atomisation, d'évaporation et de mélange carburant/air et donc du mode de combustion et des émissions de polluants.

Une conception de ces nouvelles chambres de combustion dans des domaines d'opérabilité encore non atteints aujourd'hui requiert donc des réponses détaillées sur les processus physiques suivants :

- injection de carburant,
- évaporation du carburant liquide,
- mélange air/carburant,
- aérodynamique,
- turbulence,
- allumage,
- structure et dynamique de flamme,
- instabilités de combustion,
- interactions flamme/paroi,
- formation de polluants.

Ces analyses détaillées nécessitent des expériences sur des bancs d'essais instrumentés avec des techniques de mesure innovantes permettant un échantillonnage des grandeurs scalaires clés (température, concentration, vitesse...) sans perturbation du milieu et sur des échelles de temps courtes. C'est dans ce contexte que le CORIA a lancé avec le motoriste SAFRAN et l'Agence Nationale de la Recherche, la chaire industrielle PERCEVAL « Préparer l'Avenir pour Rendre les Moteurs Aéronautiques Propres et Efficaces » dans le but d'optimiser les rendements de combustion tout en réduisant les émissions polluantes des nouveaux systèmes d'injection. Ce programme de recherche associe les méthodes et les moyens de la recherche moderne permettant d'aborder des questions de grande complexité comme celles qu'on vient de décrire. Cette recherche s'appuie sur une combinaison des fonctionnalités modélisation, simulation numérique et expérimentation regroupées dans le Centre de Combustion Avancée pour l'Aéronautique du Futur (CCAFA) du CORIA. Elles ont pour vocation de mettre à disposition :

- De multiples bancs d'essai allant de brûleurs académiques jusqu'à des installations de combustion complexes fonctionnant à haute pression. Par la maîtrise de leurs conditions opératoires, les brûleurs académiques servent au développement et à la validation des techniques de mesures optiques et à l'élaboration de bases de données expérimentales relatives

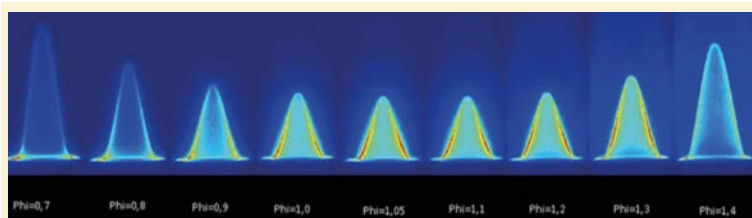
aux procédés fondamentaux gouvernant la combustion. Les chambres de combustion complexes haute pression sont utilisées pour étudier de nouveaux concepts d'injecteur fonctionnant en carburant liquide multi-composant (kérosène, biocarburant...) et obtenir un retour d'expérience pour SAFRAN.

- Une plateforme numérique utilisant les méthodes de calcul de plus en plus performantes tout en profitant des énormes progrès de l'informatique scientifique et moderne.
- Une plateforme métrologique constituée d'un large éventail de techniques de mesures optiques innovantes : PIV (*particle imaging velocimetry*) et LDV (*laser doppler velocimetry*) pour la caractérisation du champ de vitesse, PDPA (*phase Doppler particle analyser*) et GRT (*global rainbow technique*) pour la caractérisation de la distribution de gouttes de carburant, DRASC (*diffusion Raman anti-Stokes cohérente*) pour la mesure de la température et des espèces chimiques majoritaires, PLIF-OH (*planar laser-induced fluorescence* sur le radical OH) et chimiluminescence OH\* pour l'analyse de la structure de flamme, LII (*laser induced incandescence*), PLIF-NO, PLIF-CO (*planar laser-induced fluorescence* sur les molécules de NO et CO) pour la mesure des polluants en flamme. En outre, ces diagnostics optiques peuvent être combinés de manière à acquérir simultanément des corrélations temporelles et spatiales des grandeurs physiques mesurées.

Une illustration du développement de cette métrologie optique est maintenant présentée au travers de plusieurs exemples décrivant les études de certains processus physiques détaillés précédemment.

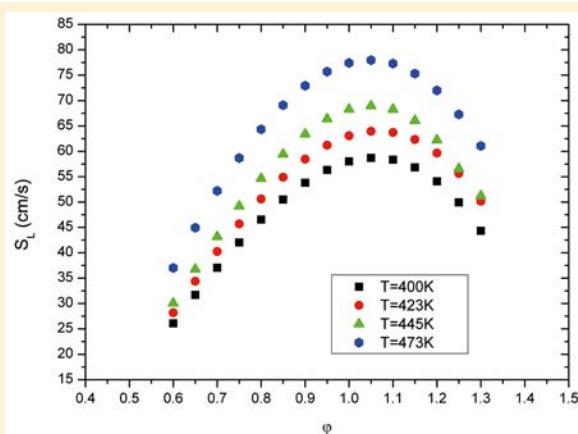
## Vitesse de flamme laminaire

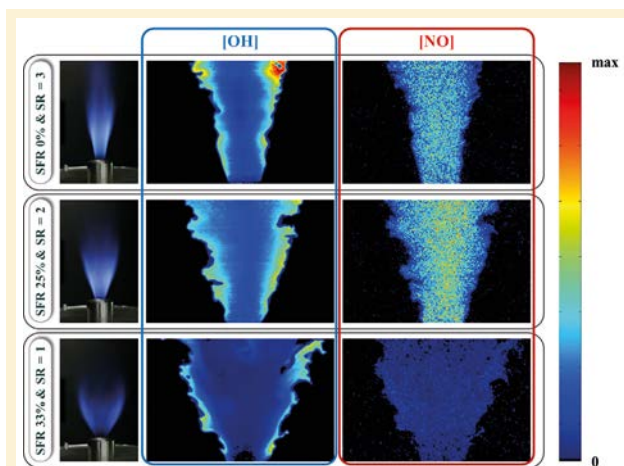
La vitesse de flamme laminaire est une grandeur physique clé car elle fournit des données fondamentales sur la réactivité, la diffusivité et l'exothermicité du carburant. Elle est également un des paramètres utilisés pour valider les mécanismes cinétiques détaillés et la modélisation de la combustion turbulente. Bien que cette grandeur physique ait fait l'objet de nombreuses recherches dans le passé, sa méconnaissance sur des carburants multi-composants dans des conditions haute-pression et haute-température reste d'actualité. La mesure de vitesse de flamme laminaire de carburants multi-composants a été obtenue avec un brûleur haute pression fonctionnant avec un prémélange gazeux combustible/air [1]. La mesure est basée sur la détection du contour de flamme obtenue par imagerie de chimiluminescence OH\*. Pour exemple, la *figure 1* présente des images d'émission OH\* de flammes kérosène/air laminaires à différentes richesses. Pour chaque condition, la mesure de la surface de flamme (représentée par les zones intenses de lumière) associée à la connaissance des vitesses des gaz frais permettent de mesurer la vitesse de flamme laminaire.



△ **Figure 1.** Images instantanées de chimiluminescence OH\* d'une flamme kérosène/air à différentes richesses. Conditions opératoires:  $T = 300\text{ K}$ ,  $P = 0,1\text{ MPa}$ , vitesse des gaz frais  $1,1\text{ m/s}$ ,  $\Phi = 0,7-1,4$ . La distribution des couleurs représente la variation en intensité du signal de chimiluminescence.

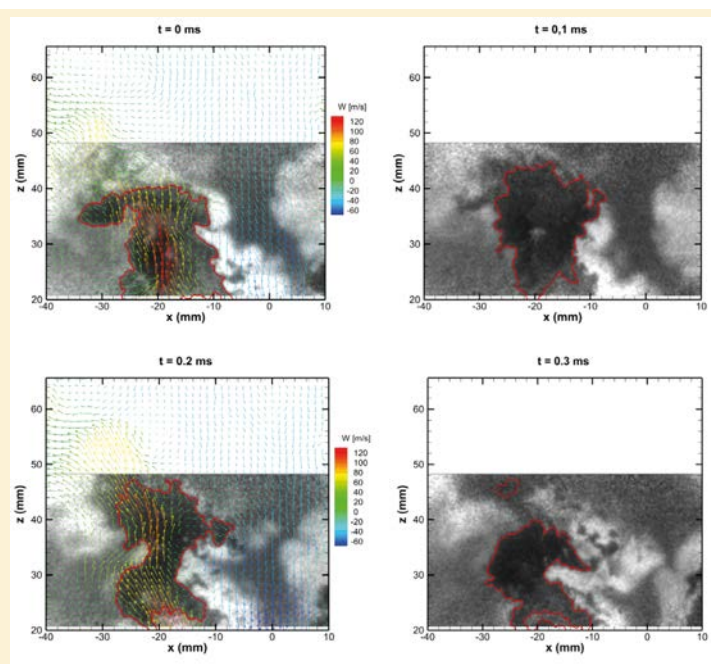
▷ **Figure 2.** Évolution de la vitesse de flamme laminaire d'un mélange Jet A-1/N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> pour différentes températures de préchauffage et richesses.  $P = 0,1\text{ MPa}$ .





△ **Figure 3.** À gauche : photographie des flammes d'intérêts. Au centre : distributions instantanées du radical OH. À droite : distributions instantanées du radical NO.

▷ **Figure 4.** Série d'images successives de distributions de OH couplées aux distributions de vitesse. Trait continu en rouge : contour de la flamme.



Les évolutions de la vitesse de flamme laminaire kérosène/air avec la pression, la température de préchauffage d'air et la richesse, ont ainsi été analysées et comparées avec des simulations numériques utilisant un mécanisme de cinétique chimique détaillé. Pour exemple, la *figure 2* présente les évolutions de la vitesse de flamme laminaire kérosène/air à pression atmosphérique avec la température et la richesse.

### Concentration de NO en flamme stratifiée

Les injecteurs aéronautiques de dernière génération opèrent le plus souvent avec une injection étagée de carburant induisant une combustion turbulente stratifiée, swirlée, et peu polluante. Doser les polluants gazeux dans la flamme repose alors sur l'emploi de la fluorescence induite par laser (LIF). L'exemple présenté à la *figure 3* consiste à mesurer les distributions instantanées de NO à l'état de trace (quelques ppm). L'outil expérimental repose sur un laser à colorant produisant des impulsions ns de 30 mJ à 226 nm. La détection est assurée par une caméra intensifiée emCCD garantissant la collection de très faibles signaux lumineux. Une validation de ce diagnostic a été réalisée en l'associant

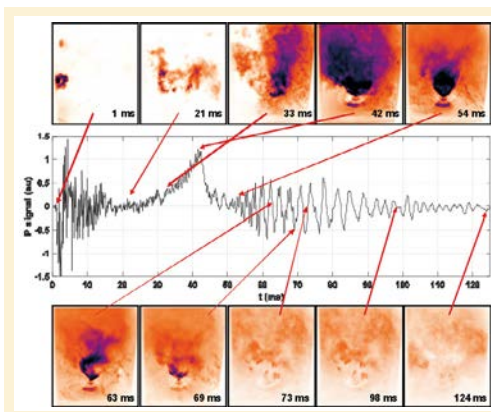
avec la PLIF-OH dans une flamme prémélangée méthane/air stratifiée et swirlée [2]. Les images présentées à la gauche de la *figure 3* représentent la flamme pour plusieurs conditions. La première condition (en haut) correspond à une combustion très stratifiée (rapport de stratification SR=3) non swirlée. La deuxième (au milieu), représente une flamme peu swirlée (intensité du swirl SRF = 25%), avec un SR=2. Le dernier cas (en bas) est une combustion avec un swirl élevé (SRF=33%) sans stratification (SR=1). Comme observé, les flammes sont stabilisées sur le *bluff-body* et l'expansion de la flamme dépend du nombre de swirl. Ces résultats sont corroborés par les images de PLIF-OH présentées en *figure 3*. Les distributions d'OH et NO révèlent que les structures turbulentes observées à la frontière de la zone de présence de NO et les contours de la distribution d'OH sont adjacents suite aux couplages de la zone mince de réaction avec un mécanisme de réaction chimique rapide. La distribution de NO au centre de la flamme reste homogène, indiquant un transport de NO au cœur de l'écoulement sous l'action d'une recirculation de gaz interne. Une corrélation des distributions spatiales instantanées de NO et OH a en outre permis d'illustrer le couplage entre la

formation de NO et le gradient de richesse provoquée par la stratification. L'ensemble de ces mesures contribuera dans le futur à fournir des informations détaillées pour améliorer le concept des systèmes d'injection à faible émission de NOx.

### Dynamique de flamme

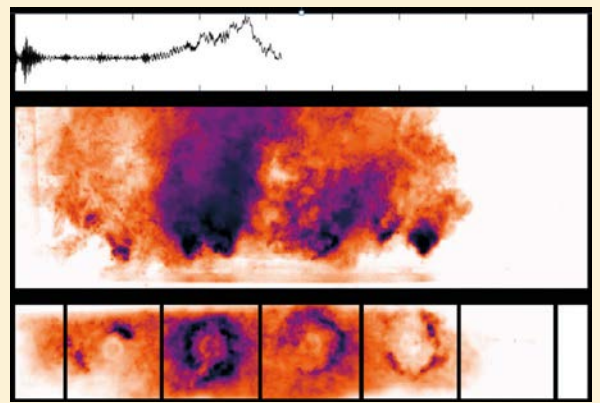
Un système d'injection développé par SAFRAN équipant les moteurs d'hélicoptères a été étudié au moyen de techniques d'imagerie à cadence élevée [3]. Cet injecteur fonctionne sous pression avec du kérosène liquide. Pour les besoins de l'étude, les interactions flamme/turbulence propices à la génération d'instabilités de flamme ont été analysées avec la PIV et la PLIF-OH fonctionnant à cadence élevée (10 kHz). Les images de PIV et de PLIF ont permis de mesurer les champs instantanés de vitesse et d'OH et leurs fluctuations associées. Un exemple est présenté à la *figure 4*. Un post-traitement des images d'OH avec des méthodes de filtrage non-linéaire permet également d'isoler la structure du front de flamme alors que la dynamique du champ aérodynamique est analysée par POD (*proper orthogonal decomposition*) sur les images de PIV. En guise de résultat, la POD des champs de vitesse montre que dans des





**Figure 5.** Enregistrement typique d'un allumage dans un brûleur diphasique swirlé.

**Figure 6.** Instantané de l'acquisition d'un allumage dans la chambre multi-injecteur diphasique. Vues de face et de dessus synchronisées avec le signal de pression chambre.



conditions stables, aucun mode n'est prépondérant. Il est également observé que les images de PIV et PLIF-OH ne sont pas entièrement résolues temporellement à la cadence de 10 kHz, la raison provenant des régimes de vitesse élevés rencontrés dans ce type de flamme. En outre, l'origine des phénomènes d'extinction de flamme est attribuée au large dégagement de chaleur des composés chimiques non brûlés qui est gouverné par l'interaction turbulence/transport des gouttes de carburant dans le milieu.

### Allumage de flammes à faible émission de NO<sub>x</sub>

Les processus d'allumage en conditions aéronautiques requièrent une connaissance précise des étapes suivantes: (i) dépôt d'énergie, (ii) développement et propagation du noyau, (iii) stabilisation de la flamme sur un premier injecteur, (iv) propagation d'injecteur à injecteur pour allumer la chambre de combustion. L'allumage est un procédé par nature instationnaire, se déroulant sur des échelles de temps variant de la microseconde à plusieurs millisecondes, nécessitant des détecteurs à cadence élevée (5-20 kHz) pour son suivi temporel [4].

Un premier exemple illustre l'allumage d'un écoulement diphasique produit par un injecteur de type cône creux alimenté en n-heptane. Après avoir caractérisé l'aérodynamique de l'écoulement, la densité et taille de gouttes de combustible et la fraction massique de vapeur de carburant, l'allumage par un faisceau laser focalisé

dans la chambre de combustion a été analysé avec une caméra rapide enregistrant l'évolution temporelle du noyau de flamme créé. L'enregistrement des images a permis de proposer des scénarios d'allumage et de conditionner la réussite ou l'échec d'allumage en fonction des conditions locales de l'écoulement où l'énergie laser est déposée et des zones traversées par le noyau de flamme. Une illustration d'un enregistrement typique par la caméra rapide est présentée à la *figure 5*.

Le deuxième exemple concerne l'utilisation d'un brûleur composé de cinq injecteurs identiques et dont la distance inter-injecteur est variable. Cette installation permet d'étudier la phase (iv) de l'allumage en évaluant l'impact de la volatilité du carburant sur la vitesse de l'allumage et sur la propagation de la flamme résultante injecteur à injecteur. Ces données sont critiques pour la validation d'outils de simulation LES (large Eddy simulation) des écoulements réactifs et présentent un caractère discriminant

pour la simulation LES. Un exemple d'image enregistrée par la caméra rapide est présenté à la *figure 6* pour un allumage d'un spray de n-heptane.

### Conclusions

Les informations, obtenues à partir des techniques de mesure optiques, dans les expérimentations en combustion aéronautique, permettent d'ores et déjà de connaître en détail les processus physiques mis en jeu lors de mécanismes de combustion en régime pauvre ainsi que d'accroître les données indispensables à la validation de modèles théoriques. L'amélioration future des performances des techniques de mesures optiques en termes de disponibilité de sources lumineuses haute cadence et de haute énergie ainsi que des systèmes de détection rapides et sensibles, sera un atout pour permettre de nouvelles avancées en combustion aéronautique et pour orienter efficacement la conception des nouveaux moteurs aéronautiques.

### RÉFÉRENCES

- [1] Y. Wu, V. Modica, B. Rossow, F. Grisch, *Effects of pressure and preheating temperature on the laminar flame speed of methane/air and acetone/air mixtures*, Fuel, **185**, 577-588 (2016)
- [2] J. Apeloig, P. Gautier, E. Salaün, B. Barviau, G. Godard, S. Hochgreb, F. Grisch, *PLIF Measurements of nitric oxide and hydroxyl radicals distributions in swirled stratified premixed flames*, 18<sup>th</sup> International Symposium on the Application of Laser and Imaging Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, July 4-7, 2016
- [3] E. Salaün, P. Malbois, A. Vandel, G. Godard, F. Grisch, B. Renou, G. Cabot, A.M. Boukhalfa, *Experimental investigation of a spray swirled flame in gas turbine model combustor*, 18<sup>th</sup> International Symposium on the Application of Laser and Imaging Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, July 4-7, 2016
- [4] J. Marrero, A. Verdier, G. Godard, A. Vandel, G. Cabot, M. Boukhalfa, B. Renou, *Experimental study of laser ignition probability, kernel propagation and air and fuel droplet properties in a confined swirled jet-spray burner*, 18<sup>th</sup> International Symposium on the Application of Laser and Imaging Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, July 4-7, 2016