



HAL
open science

Étude de l'interaction flamme/paroi : influence de la multiperforation sur le front de la flamme

Sebastian Milu-Vaidesegan, Mikael Orain, Pierre Doublet, Marc Bellenoue,
Pierre Millan

► **To cite this version:**

Sebastian Milu-Vaidesegan, Mikael Orain, Pierre Doublet, Marc Bellenoue, Pierre Millan. Étude de l'interaction flamme/paroi : influence de la multiperforation sur le front de la flamme. Congrès Francophone de Techniques Laser, CFTL 2022, Sep 2022, Leuven, Belgique. hal-03811244

HAL Id: hal-03811244

<https://hal.science/hal-03811244v1>

Submitted on 13 Oct 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ETUDE DE L'INTERACTION FLAMME/PAROI :

INFLUENCE DE LA MULTIPERFORATION SUR LE FRONT DE FLAMME

Sebastian Milu-Vaidesezan^{a,*}, Mikael Orain^a, Pierre Doublet^a, Marc Bellenoue^b, Pierre Millan^a

(a) ONERA, Centre Midi-Pyrénées, Fauga-Mauzac, FRANCE

(b) Institut PPRIME, CNRS-ENSMA-Université de Poitiers, Poitiers, France, 86961

*Correspondant: sebastian.milu_vaidesezan@onera.fr

Résumé : Depuis plusieurs années, les motoristes doivent faire face à des normes de plus en plus strictes sur les émissions polluantes. L'étude de l'interaction flamme/paroi est capitale pour contrôler ces émissions et prolonger la durée de vie des chambres de combustion. Une contrainte inhérente aux foyers aéronautiques réside dans le fait que les parois sont refroidies par des écoulements d'air frais introduits dans la chambre soit sous la forme de films pariétaux soit sous la forme de multi-perforation. Le problème est que cette injection d'air froid perturbe les réactions d'oxydation du carburant soit en les figeant, ce qui entraîne l'émission de quantités importantes de CO, d'UHC et de suies, soit en apportant de l'air frais dans les zones riches, ce qui favorise la formation de NO_x. L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence de paramètres tels que le débit de gaz frais, le débit de refroidissement et la richesse sur la zone de réaction. Des essais ont été menés avec une plaque multi-perforée placée au-dessus d'un brûleur à flamme plate pour simuler l'interaction frontale entre un injecteur aéronautique et une paroi refroidie. Les résultats montrent que pour des mélanges riches, un front de flamme partiellement pré-mélangé se forme entre 3 et 8 mm en aval de la plaque refroidie. En augmentant le débit de gaz frais, la flamme s'élargit horizontalement du fait de la dilatation des gaz chauds qui ne peuvent se convecter vers le haut du fait de la présence de la plaque. Les images montrent la formation d'une série de flammelettes parallèles au voisinage de la plaque refroidie qui indique la poursuite de l'oxydation du combustible restant dans les gaz brûlés en se mélangeant aux jets d'air de refroidissement.

1 Introduction

1.1 Contexte

Depuis plusieurs années, le marché international de l'aéronautique doit faire face aux problématiques liées à l'augmentation du trafic aérien, à la réduction des émissions polluantes et au changement climatique [1]. Dans ce contexte, les motoristes doivent concevoir des moteurs consommant moins de carburant et répondant à des normes de plus en plus drastiques sur les émissions polluantes.

Parmi les polluants émis lors de la combustion (Figure 1), les oxydes d'azote (NO_x), le monoxyde de carbone (CO) et les particules fines (PM) ont un effet néfaste sur la santé et le dioxyde de carbone est qualifié de gaz à effet de serre. Un effort particulier doit être fait pour réduire la quantité de ces polluants rejetés dans l'atmosphère. Pour cette raison, il est nécessaire de comprendre et de pouvoir modéliser leur formation afin d'optimiser l'efficacité de la combustion.

Une contrainte inhérente aux foyers aéronautiques réside dans le fait que les parois sont refroidies par des écoulements d'air frais introduits dans la chambre soit sous la forme de films pariétaux soit sous la forme de multi-perforation. Ces écoulements

d'air peuvent influencer les réactions chimiques d'oxydation du carburant :

- soit en les figeant, ce qui contribue à augmenter la production de CO, imbrûlés et particules de suie ;
- soit en apportant de l'air frais aux zones sur-riches, ce qui peut favoriser la production de NO_x thermique.

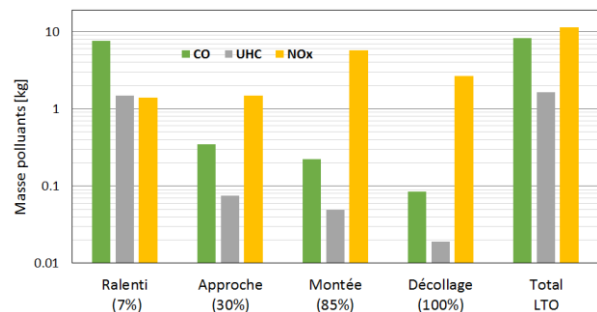


Figure 1: Masse de polluants émis par un Airbus A320 avec une motorisation CFM56 - 5B pendant les différentes phases du cycle LTO standard. [2]

La compréhension des mécanismes physiques liés à la formation des polluants dans les flammes est un point crucial pour l'amélioration des technologies des chambres de combustion aéronautiques, ainsi que la prédictibilité des simulations numériques et de leurs

modèles associés. L'étude de l'interaction flamme/paroi est donc capitale pour les motoristes d'un point de vue de la maîtrise des émissions polluantes et de la durée de vie des chambres de combustion. Cependant, la réalisation de ces améliorations, qu'elles soient technologiques ou numériques, repose sur la capacité d'obtenir une information préalable, si possible quantitative, sur les paramètres physiques d'intérêt.

1.2 Bibliographie

Les diagnostics optiques sont bien adaptés pour effectuer des mesures in situ dans les chambres de combustion. Ces méthodes de mesures ont été développées et appliquées depuis plusieurs décennies. Lange et al. [3] ont appliqués des techniques d'imagerie laser à un flux réactif dans une chambre de combustion à haute pression. Ils ont étudié l'interaction entre une flamme pauvre pré-mélangée et le film de refroidissement près de la paroi à une pression de 5 bars et une température d'air de 450 K. Pour cela, différentes techniques de mesure ont été utilisées telles que l'imagerie de fluorescence induite par laser du radical OH (PLIF-OH) pour étudier le mélange des gaz de combustion avec le film de refroidissement ainsi que la vélocimétrie par images de particules (PIV) pour quantifier le champ de vitesse et visualiser les zones de recirculation. D'un point de vue technique, la faisabilité de mesures simultanées a été démontrée avec succès. Des vues rapprochées ont mis en évidence la présence de petits jets d'air sortant des trous de la paroi multi-perforée. Cependant, à des distances inférieures à 2 mm, la réflexion de l'émission du radical OH par la paroi rend la mesure de la concentration de OH impossible.

Plus récemment, Voigt et al. [4] ont utilisé le même banc d'essai fonctionnant avec un mélange d'air et de gaz naturel pour mesurer la distribution de la concentration de CO par imagerie de fluorescence induite par laser. La technique PLIF-OH a également été appliquée pour mesurer la concentration en OH à partir de laquelle les auteurs ont déduit la distribution spatiale de température. Cette mesure a permis de corriger le signal PLIF-CO et de fournir des mesures quantitatives de cette espèce à différentes positions le long du front de flamme. L'objectif était d'améliorer encore les connaissances sur la distribution du CO en tant que produit de combustion intermédiaire afin de mieux comprendre l'influence de l'air de refroidissement sur la combustion. Les auteurs ont conclu que dans la zone de recirculation, où des quantités mesurables de CO ont été trouvées, l'oxydation a été ralentie presque jusqu'à l'arrêt en raison de la basse température des gaz de combustion dilués par de l'air de refroidissement.

Jainsky et al. [5] ont étudié l'interaction d'une flamme laminaire pré-mélangée méthane/air avec une paroi à pression atmosphérique en utilisant plusieurs méthodes de diagnostic laser. Le processus d'interaction flamme/paroi a été étudié pour plusieurs richesses ($\phi = 0.83, 1.0$ et 1.2) où une branche d'une flamme en V interagissait avec une paroi en acier inoxydable refroidie à l'eau, correspondant à une configuration de coincement latérale (i.e side-wall quenching). Les champs de vitesse et les emplacements des fronts de flamme ont été mesurés simultanément par PIV à deux composantes et par PLIF-OH. La diffusion cohérente anti-Stokes Raman (CARS) et la PLIF-CO à deux photons ont été utilisés pour déterminer la température des gaz brûlés et les concentrations de CO. La distance d'extinction des flammes a été déterminée à partir des résultats de la mesure PLIF-OH. En fonction de la richesse, il a été constaté que les distances de coincement variaient de 250 à 400 μm et étaient négativement corrélées à la vitesse de la flamme laminaire. A l'approche de la zone d'interaction flamme-paroi et à proximité de la paroi, les températures des gaz et les gradients de température normaux à la paroi augmentent. Cela s'accompagne d'une augmentation des pertes de chaleur. Simultanément, la zone des concentrations maximales de CO se déplace vers la paroi.

Greifenstein et al. [6] ont étudié l'interaction flamme/air de refroidissement par des mesures de température de paroi (thermographique au phosphore en 2D), de la température de la phase gazeuse (CARS), de la structure de la flamme (PLIF-OH) et du champ de vitesses (PIV) dans un chambre de combustion refroidie par multi-perforation. Le banc d'essai a fonctionné dans des conditions proches de la réalité avec une température d'entrée de la chambre de combustion de 623 K et une pression du système de 2.5 bar. Des variations de paramètres d'importance tels que le débit d'air swirlé et le débit d'air introduit par multi-perforation ont été menées pour étudier leur effet sur l'efficacité totale du refroidissement par film. La température maximale de la paroi variait jusqu'à 150 K au cours des différentes variations paramétriques et jusqu'à 200 K dans la direction axiale pour une condition donnée. Des variations notables de 10 à 34% dans l'efficacité totale du refroidissement ont été observées entre la zone d'interaction flamme/air de refroidissement et la zone post-flamme.

L'étude bibliographique montre que la PLIF-OH est l'une des techniques les plus pertinentes pour mener des investigations sur l'interaction flamme/paroi. Cette mesure peut être utilisée soit pour identifier la zone de réaction et donc pour mesurer la distance d'extinction de la flamme, soit pour déduire la température d'écoulement à partir de la

concentration quantitative en OH, permettant ainsi de corriger d'autres mesures de fluorescence des espèces (i.e. PLIF-CO). Cependant, les travaux antérieurs se sont concentrés sur le coincement latéral qui se produit dans les chambres de combustion annulaires conventionnelles où l'axe d'injection de carburant est parallèle au flux d'air. Néanmoins, certains fabricants de moteurs aéronautiques ont choisi de s'éloigner de cette architecture traditionnelle pour tenter de réduire davantage la taille du moteur et donc le coût d'exploitation pour le client. Dans ce cas, l'injection de carburant se fait vers la paroi refroidie par multi-perforation et l'interaction flamme/paroi se produit de manière frontale.

Ce travail s'intéresse plus particulièrement à l'effet de l'interaction flamme/paroi sur la zone de réaction. L'objectif est de caractériser l'influence de certains paramètres clés tels que la richesse et le débit d'air de refroidissement sur le front de flamme et sa répartition spatiale à proximité d'une paroi multi-perforée. L'imagerie de fluorescence induite par laser (PLIF) appliquée au radical OH a été mise en place. Des essais ont été menés sur un brûleur à flamme plate qui nous ont permis de définir les meilleures stratégies d'excitation laser et les domaines spectraux de collecte de fluorescence les plus adaptés, de calibrer la technique et également de s'intéresser aux problèmes de mesures en proche paroi. La concentration en radicaux OH augmente de manière significative dans la zone de réaction, par conséquent, la position du front de flamme peut être extraite des images PLIF-OH au moyen de gradients et de techniques de filtrage.

2 Matériels et méthodes

2.1 Banc d'essai

Le banc d'essais est constitué d'un brûleur à flamme plate refroidi par eau (Holthuis & Associates) conçu pour un mélange méthane/air. Avant d'atteindre la zone de réaction, les gaz frais traversent un milieu poreux qui assure une répartition homogène du mélange combustible/comburant sur toute la surface du brûleur à faible vitesse, conduisant à une flamme laminaire très stable. Ce brûleur est également pourvu d'un trou central permettant à l'utilisateur d'injecter un combustible secondaire au centre de la zone de réaction et d'observer son influence sur les émissions polluantes ou les instabilités de flamme. Cependant, au cours de ces essais, le tube central a été bouché pour empêcher toute aspiration d'air par le bas.

Une plaque multi-perforée avec 365 trous de 0.4 mm de diamètre perforés en quinconce est placée au-dessus du brûleur. La plaque est fabriquée à partir d'un alliage nickel-chrome-molybdène hautement résistant à la chaleur. Un panier est conçu autour de

celle-ci pour permettre l'injection d'air simulant ainsi le processus de refroidissement d'une chambre de combustion aéronautique. Un thermocouple de type K est soudé, en face arrière, au centre de la plaque multi-perforée afin de suivre les variations de température au cours des essais. La distance entre la base du brûleur et la plaque perforée est ajustable (Figure 2).

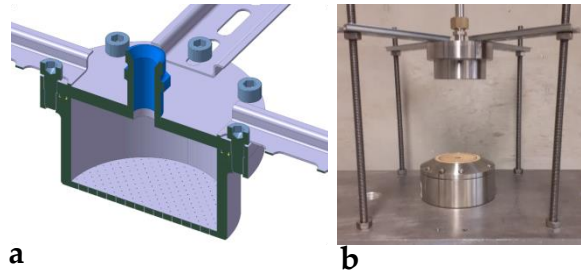


Figure 2: Conception 3D du panier multi-perforé avec son support (a); panier multi-perforé placé au-dessus du brûleur à flamme plate (b).

Les débits des différents gaz sont suivis et régulés par des régulateurs de débit massique (EL-FLOW Prestige et EL-FLOW Select de Bronkhorst). Le débit de méthane est limité à 5 Ln/min, le débit d'air du brûleur peut atteindre 50 Ln/min et le débit d'air de refroidissement a une capacité maximale de 100 Ln/min. En aval des débitmètres, un raccord en T permet de mélanger de manière homogène le combustible et le comburant avant d'être injectés dans le plénum du brûleur.

2.2 Technique de mesure

Les mesures à proximité d'une paroi multi-perforée nécessitent l'utilisation d'une technique non intrusive afin d'éviter la perturbation de l'écoulement. De plus, la technique doit être chimiquement sélective, afin de sonder une seule espèce. Ainsi, la fluorescence induite par laser semble être une méthode très appropriée pour détecter les molécules de OH dans un milieu réactif.

Cette méthode repose sur l'excitation des molécules par l'absorption de photons générés par une source laser qui est accordée sur une longueur d'onde spécifique des niveaux d'énergie des molécules. Une fois excitées, les molécules chercheront à retourner à leur état d'énergie fondamentale en libérant une partie de leur énergie excédentaire sous forme de lumière, appelée fluorescence. Dans le cas du radical OH, une excitation à environ 283 nm et une collecte du signal à environ 310 nm sont typiquement utilisées [7].

2.3 Mise en place de PLIF-OH

Pour les essais effectués, un laser Nd:YAG (Quantel YG981C) à 532 nm (énergie : 350 mJ, fréquence de répétition : 10 Hz) est utilisé pour pomper un laser à colorant accordable (Quantel TDL+). La durée

d'impulsion est de 8 à 10 ns. La solution de colorant utilisée est un mélange de rhodamine 590 & éthanol avec rhodamine 610 & éthanol. Le faisceau de colorant à 566 nm est ensuite doublé en fréquence dans un cristal pour fournir un faisceau à 283 nm qui est séparé du résidu à 532 nm par un prisme Pellin-Broca. L'énergie à 283 nm mesurée en sortie est de 16 mJ avec une bonne stabilité tir à tir. La longueur d'onde absolue du laser à colorant est déterminée à l'aide d'un mesureur de longueur d'onde (WS6 de HighFinesse) avant chaque essai. Dans ce cas, la longueur d'onde du laser est accordée à 282.750 nm, ce qui correspond à la transition $A^2\Sigma^+(v' = 0) - X^2\Pi(v'' = 1)$ du radical OH. Le faisceau laser de 6 mm de diamètre est transformé en une fine nappe laser à l'aide d'un jeu de lentilles cylindriques et d'une lentille sphérique. Il en résulte une nappe d'environ 50 mm de hauteur et 500 μm de largeur avec une densité de puissance maximale de 1 MW/cm².

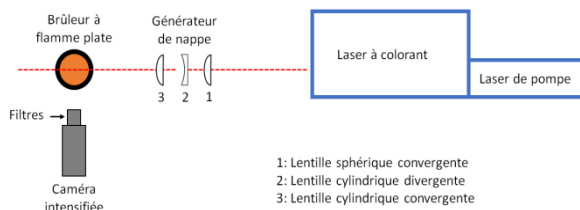


Figure 3: Montage expérimental pour les mesures de PLIF-OH.

Le signal de fluorescence OH est collecté par un objectif (Cerco-UV 100 F/2.8 de Sodern) et enregistré au moyen d'une caméra ICCD (PI MAX4 de Teledyne Princeton Instruments) équipée d'un intensificateur GEN II optimisé pour la lumière UV, avec une résolution de 1024 \times 1024 pixels². La porte de l'intensificateur est fixée à 100 ns. Une combinaison d'un filtre passe-haut (ZUL300 d'Asahi Spectra, taux de transmission > 90%) et d'un filtre passe-bande centré à 310 nm (ZBPA310 d'Asahi Spectra, FWHM=8 nm, taux de transmission 60%) est utilisée pour isoler spectralement la fluorescence du radical OH. Le déclenchement de la caméra est synchronisé avec le signal Q-switch du laser de pompe et le taux d'acquisition est de 10 images/s.

2.4 Conditions d'essais

Afin d'exploiter toute la gamme de fonctionnement des débitmètres, des essais sont menés avec des débits de méthane compris entre 1 et 5 Ln/min et des débits d'air compris entre 10 et 25 Ln/min, conduisant à une richesse variant de 0.6 (limite inférieure d'inflammabilité) à 2 (mélange très riche). Afin de limiter la température au centre de la plaque multi-perforée autour de 600 K, un débit d'air de refroidissement de 10 à 25 Ln/min est imposé.

Bien que des visualisations directes soient réalisées sur toute la gamme de richesses, les mesures PLIF sont principalement focalisées sur les mélanges riches où l'on s'attend à trouver les interactions les plus pertinentes avec la plaque multi-perforée.

3 Résultats

3.1 Visualisations directes

Des visualisations directes de la flamme plate sont réalisées avec une caméra couleur IDS uEye avec une résolution de 528 \times 1134 pixels² à différentes richesses et débits d'air (Figure 4). Comme attendu, plus le débit de gaz frais est élevé, plus le front de flamme s'élargit. Pour les mélanges riches, un front de flamme secondaire vert vif apparaît en raison de la chimiluminescence du radical C2*.

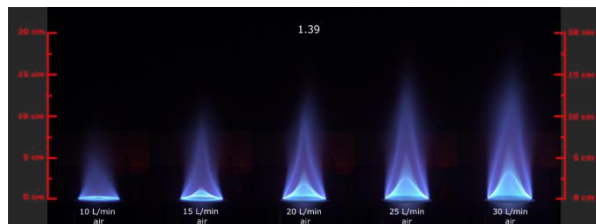


Figure 4: Variation de la hauteur de la flamme en fonction du débit d'air $\phi = 1.39$.

3.2 PLIF-OH sans panier multi-perforé

Afin de caractériser le front de flamme, des mesures qualitatives de PLIF-OH sont réalisées pour plusieurs débits d'air et différentes richesses. Sur la Figure 5 il apparaît que jusqu'à la stoechiométrie, le front de flamme pré-mélangé est situé à la base du brûleur ; tandis que pour les flammes riches, un front de flamme conique partiellement pré-mélangé apparaît sur les bords du brûleur. Un front de flamme secondaire est également observé à $\phi = 1.4$ bien que le signal de fluorescence soit beaucoup plus faible. Le signal maximal est obtenu pour le mélange le plus riche à $\phi = 1.6$. Pour des richesses inférieures, l'influence du trou central du brûleur est clairement visible en raison de l'absence de signal de PLIF-OH.

3.3 PLIF-OH avec panier multi-perforé

Des essais sont réalisés en plaçant la plaque multi-perforée à 100 mm au-dessus du brûleur (Figure 6). Les images enregistrées montrent que pour de faibles débits d'air de refroidissement (≤ 15 Ln/min), la plaque peut être refroidie efficacement (la température de paroi reste constante autour de 500 K) sans perturber la flamme. Un signal de fluorescence OH maximum est atteint entre $\phi = 1.7 - 1.8$. Lorsque le débit d'air de refroidissement augmente, la flamme s'éteint dynamiquement à la base du brûleur.

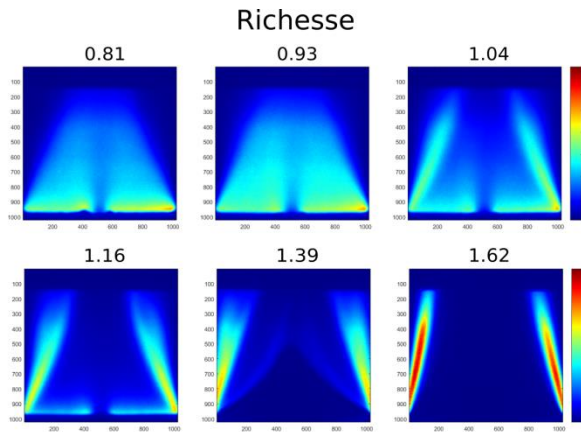


Figure 5: Image moyennée du signal PLIF-OH dans une configuration de brûleur simple (sans la plaque multi-perforée) en fonction de la richesse avec un débit d'air de 25 Ln/min. La nappe laser se propage de droite à gauche.

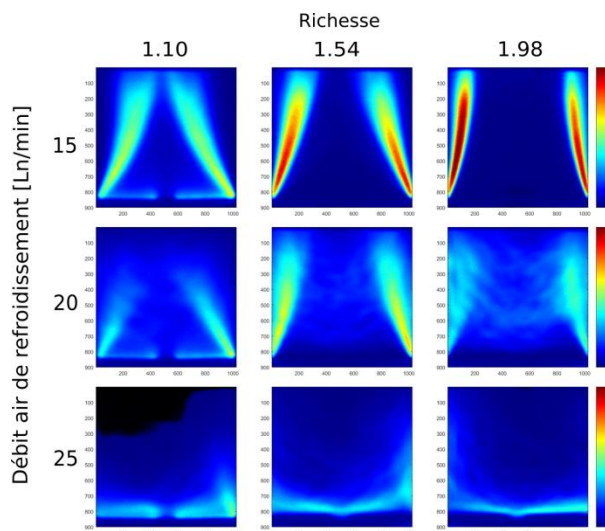


Figure 6: Mesures PLIF-OH avec la plaque multi-perforée placée à 100 mm au-dessus du brûleur, en fonction du débit d'air de refroidissement et de la richesse. Le débit d'air du brûleur est de 15 Ln/min. Les taches sombres correspondent à des valeurs de pixel nulles résultant de la soustraction du signal de fond lors du post-traitement de l'image. La nappe laser se propage de droite à gauche.

Dans une deuxième série d'essais, la plaque multi-perforée a été placée à 45 mm au-dessus de la surface du brûleur. L'objectif était de faire en sorte que la nappe laser puisse couvrir toute la zone entre les deux modules. Le débit d'air secondaire a été soigneusement ajusté pour que la plaque perforée reste à basse température ($< 600\text{ K}$) sans éteindre dynamiquement la flamme à la base du brûleur comme vu précédemment (Figure 7).

Pour un débit d'air de refroidissement donné, on constate que l'augmentation de la richesse a un impact significatif sur la forme du front de flamme. Pour les mélanges pauvres, on constate la même évolution que précédemment avec le passage d'une

flamme entièrement pré-mélangée horizontale à une flamme légèrement conique partiellement pré-mélangée à stœchiométrie. Cependant, pour les mélanges riches, un front de flamme secondaire apparaît à quelques millimètres de la surface de la plaque perforée. Dans ce cas, l'excès de carburant dans les gaz frais brûle avec l'air arrivant par le haut. En regardant l'axe d'injection, on remarque que le front secondaire s'infléchit vers le bas à cause du manque de gaz frais venant d'en bas (dû au bouchage du trou central du brûleur). Par conséquent, l'air de refroidissement entrant dans la zone de réaction éloigne le front de flamme de la plaque à cette position.

Pour une richesse donnée, l'augmentation du débit de gaz frais augmente le signal PLIF-OH ce qui indique que la vitesse de réaction à travers le front de flamme augmente. Ainsi, pour toutes les richesses testées, le signal le plus élevé est obtenu pour un débit de gaz frais de 20 Ln/min.

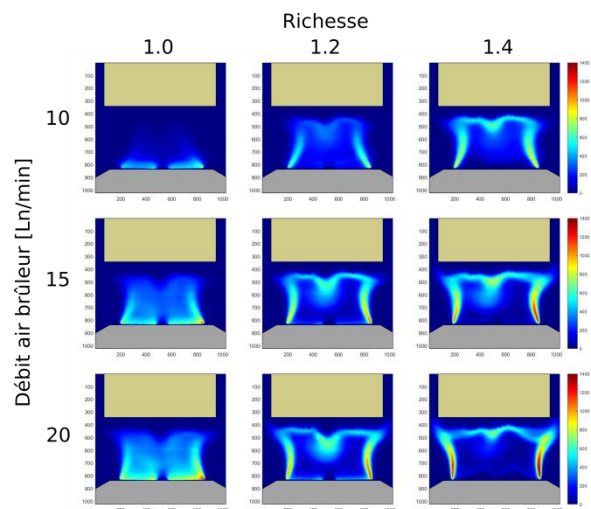


Figure 7: Mesures PLIF-OH pour différentes richesses et débits de gaz frais, avec la plaque perforée située à 45 mm au-dessus du brûleur. Le champ observé est de 75 mm \times 75 mm. Le débit d'air de refroidissement est de 15 Ln/min. La nappe laser de 48 mm se propage de droite à gauche. Les formes représentent: en haut la plaque perforée avec son panier; en bas les bords du brûleur.

De plus, en traçant le contour de la flamme (Figure 8), il apparaît que la flamme s'élargit à mesure que le débit à travers le brûleur augmente. Ceci était attendu en raison de l'augmentation de la vitesse des gaz frais à la sortie du poreux. La présence du panier de refroidissement influence également l'élargissement de la flamme en réduisant dans la direction verticale le volume disponible pour l'expansion des gaz chauds.

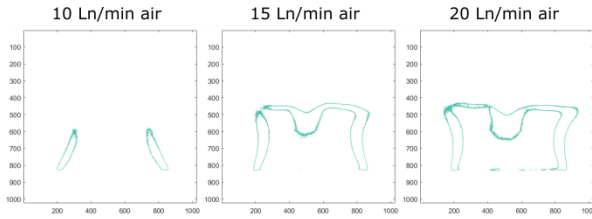


Figure 8: Contours du signal PLIF-OH en fonction du débit de gaz frais pour une richesse $\phi = 1.2$ et un débit de refroidissement de 15 Ln/min.

Sur la Figure 9, plusieurs flammlettes verticales peuvent être repérées qui correspondent aux rangées de trous perforés sur la plaque placée au-dessus. Ce phénomène indique que les gaz de combustion qui traversent le front de flamme partiellement pré-mélangé près de la paroi, sont encore suffisamment riches pour continuer à s'oxyder lorsqu'ils se mélangent aux jets d'air de refroidissement venant d'en haut.

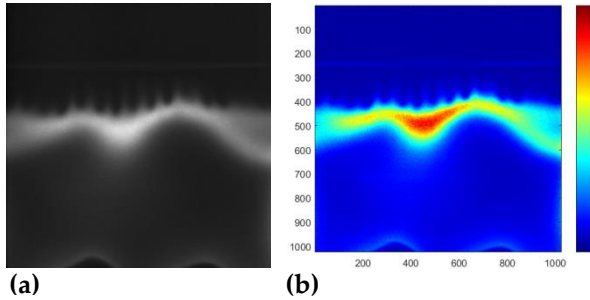


Figure 9: Image moyenne d'une mesure PLIF-OH à partir d'un lot de 700 images instantanées : image brute (a), image avec soustraction du signal de fond et une échelle en couleurs (b). Le champ est de 42×42 mm. Débit air brûleur : 20 Ln/min, richesse $\phi = 1.4$, débit air de refroidissement : 15 Ln/min.

Une étude paramétrique de la distance flamme/paroi a été réalisée en fonction du débit de gaz frais et de la richesse du mélange (Figure 10). Cette distance a été mesurée entre la plaque refroidie et la frontière entre les produits de combustion et l'air de refroidissement. Sachant que l'énergie laser était stable au cours des essais ($\pm 5\%$), la frontière a été déterminée à partir de la mesure PLIF-OH en traçant le contour pour un rapport signal sur bruit de 2. Les résultats montrent que la distance flamme/paroi varie entre 3 à 8 mm, les valeurs les plus élevées étant mesurées à des richesses et à des débits faibles (soit 10 Ln/min et $\phi = 1.2$).

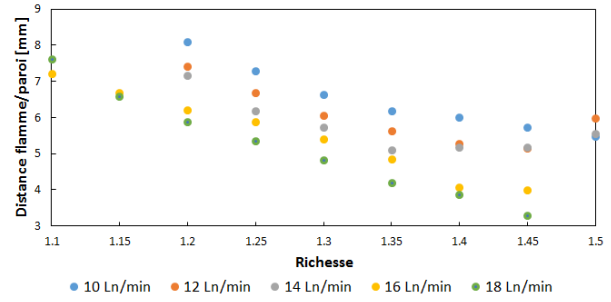


Figure 10: Distance flamme/paroi en fonction du débit de gaz frais et de la richesse. Le débit d'air de refroidissement est de 15 Ln/min.

4 Conclusion

Des essais ont été menés avec une plaque multi-perforée placée au-dessus d'un brûleur à flamme plate pour simuler l'interaction frontale entre un injecteur aéronautique et une paroi refroidie. Des mesures PLIF-OH ont été effectuées dans une large gamme de conditions pour caractériser l'influence de paramètres clés tels que le débit de gaz frais, le débit d'air de refroidissement et la richesse.

Les résultats montrent que pour les mélanges riches, un front de flamme partiellement pré-mélangé se forme de 3 à 8 mm en aval de la plaque refroidie tandis que celle-ci est maintenue à une température stable d'environ 600 K. En augmentant le débit de gaz frais, on constate que la vitesse d'oxydation augmente et que la flamme s'élargit horizontalement du fait de la dilatation des gaz chauds qui ne peuvent se convecter vers le haut du fait de la présence du panier au-dessus. Les images enregistrées montrent la formation d'une série de flammlettes parallèles au voisinage de la plaque refroidie, ce qui indique la poursuite de l'oxydation du combustible restant dans les gaz brûlés en se mélangeant aux jets d'air de refroidissement.

La prochaine phase de notre travail consiste à développer une technique PLIF-CO en proche paroi sur le brûleur à flamme plate et à adapter l'algorithme de post-traitement pour obtenir des résultats quantitatifs réalistes en tenant compte de l'absorption, de l'extinction, des taux de photo-ionisation et du recouvrement spectral. Le remplacement du méthane par d'autres combustibles comme le propane est également une possibilité qui sera étudiée. Les résultats serviront à identifier les paramètres influençant la production de polluants, ainsi qu'à proposer de nouvelles stratégies de réduction des émissions afin de répondre aux futures normes de pollution.

5 Références

- [1] A. H. Lefebvre and D. R. Ballal, *Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions, Third Edition*, 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2010. doi: 10.1201/9781420086058.
- [2] "1.A.3.a Aviation 2 LTO emissions calculator 2019 – European Environment Agency." <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-a-aviation-1-annex5-LTO/view> (accessed Jan. 08, 2021).
- [3] L. Lange, J. Heinze, M. Schroll, C. Willert, and T. Behrendt, "Combination of Planar Laser Optical Measurement Techniques for the Investigation of Premixed Lean Combustion," Lisbon, Portugal, 2012, p. 12.
- [4] L. Voigt, J. Heinze, T. Aumeier, T. Behrendt, and F. di Mare, "Quantitative CO PLIF Measurements in Aeroengine Gas Turbine Combustion Chambers Under Realistic Conditions," presented at the ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Aug. 2017. doi: 10.1115/GT2017-63413.
- [5] C. Jainski, M. Reißmann, B. Böhm, J. Janicka, and A. Dreizler, "Sidewall quenching of atmospheric laminar premixed flames studied by laser-based diagnostics," *Combustion and Flame*, vol. 183, pp. 271–282, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.combustflame.2017.05.020.
- [6] M. Greifenstein, J. Hermann, B. Boehm, and A. Dreizler, "Flame-cooling air interaction in an effusion-cooled model gas turbine combustor at elevated pressure," *Exp Fluids*, vol. 60, no. 1, p. 10, Dec. 2018, doi: 10.1007/s00348-018-2656-3.
- [7] A. Bresson, "Techniques d'imagerie quantitatives : fluorescence induite par laser appliquée aux écoulements et aux combustions," thesis, Rouen, 2000. Accessed: May 31, 2022. [Online]. Available: <http://www.theses.fr/2000ROUES065>