



HAL
open science

Mesures de fluctuations de richesse de flammes turbulentes prémélangées

Pierre-Edouard Bossard, Franck Richecoeur, Sebastien Ducruix, Laurent
Zimmer

► **To cite this version:**

Pierre-Edouard Bossard, Franck Richecoeur, Sebastien Ducruix, Laurent Zimmer. Mesures de fluctuations de richesse de flammes turbulentes prémélangées. L. Zimmer ed. Recueil des actes du 16e Congrès Francophone de Techniques Laser pour la Mécanique des Fluides,, Laboratoire EM2C, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay,, pp 269–276., 2018, 979–10–699–2816–9. hal-02097663v2

HAL Id: hal-02097663

<https://hal.science/hal-02097663v2>

Submitted on 6 Dec 2018

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.

Mesures de fluctuations de richesse de flammes turbulentes prémélangées.

Pierre-Edouard BOSSARD, Franck RICHECOEUR, Sébastien DUCRUIX, Laurent ZIMMER

Laboratoire EM2C, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay
3, rue Joliot Curie, 91192 Gif-sur-Yvette cedex, France

Email auteur correspondant : laurent.zimmer@cnr.fr

Dans cette étude, l'évolution des caractéristiques d'une instabilité thermo-acoustique avec le rapport d'équivalence dans un brûleur turbulent fonctionnant avec deux étages d'injection tangentielle est étudiée. Pour ce faire, une série de mesures a été utilisée: pression acoustique à l'intérieur de l'injecteur et de la chambre de combustion, chimiluminescence de OH*, OH PLIF dans différents plans, et mesure des fluctuations ϕ par absorption laser IR infrarouge. Dans les conditions d'injection considérées ici, l'évolution peut être décomposée de deux façons: aux faibles valeurs de rapport d'équivalence ($\phi < 0.82$) l'amplitude de l'instabilité est indépendante de ϕ , alors que sa fréquence augmente avec elle. Par contre, pour les valeurs plus élevées de ϕ , c'est la fréquence qui ne change plus, avec une amplitude décroissante lorsqu'on utilise des valeurs plus élevées de ϕ . Une modélisation des phénomènes à l'intérieur de l'injecteur indique que plus le rapport d'équivalence est élevé, plus la flamme pénètre à l'intérieur de l'injecteur. Cette modélisation semble également confirmer le mécanisme par lequel les fluctuations de pression génèrent les fluctuations du rapport d'équivalence.

1 Introduction

Pour tenter d'améliorer le rendement énergétique et la compacité des flammes tout en limitant au maximum les émissions de polluants, le développement des turbines à gaz a tendance à utiliser des brûleurs partiellement prémélangés à tourbillonneur. Malheureusement, ces flammes, notamment lorsque placées à l'intérieur de la chambre de combustion, sont plus sujets aux retours de flamme, à des extinctions non désirées et aux instabilités de combustion que les systèmes fonctionnant dans des conditions plus riches. De telles instabilités peuvent être et ont été rencontrées dans diverses installations, telles que des chambres de combustion ([1]), des centrales électriques ([2]), des turbines à gaz ([3]). Ils conduisent à des bruits indésirables, des vibrations et dans les cas extrêmes peuvent causer des dommages.

La raison pour laquelle ces instabilités apparaissent encore dans les installations industrielles est la complexité de ces instabilités. Il existe en effet plusieurs types d'instabilité provoqués par différents mécanismes, parfois non linéaires, qui peuvent provoquer des rétroactions entre certains des paramètres physiques influençant le processus de combustion. De plus, l'existence et les caractéristiques d'une instabilité dépendent fortement de la géométrie du brûleur et des conditions de combustion.

Il est possible de modéliser le système de combustion sous la forme d'une boîte noire avec entrées et sorties. Dans ce cas, les fluctuations de vitesse (U') et le rapport d'équivalence (ϕ) sont considérés comme des entrées du système, et les fluctuations de pression acoustique (P') sont la sortie avec un taux de dégagement de chaleur (Q') un facteur de liaison, mais d'autres combinaisons sont possibles. Avec cette approche, il est alors possible de décrire le système en utilisant des fonctions. Dans l'approche plus classique, une fonction de transfert de flamme linéaire peut être considérée. Dans ce cas, un forçage fréquentiel de l'instabilité est généralement effectué en imposant des fluctuations d'une quantité et en mesurant l'impact sur une autre ([4]). Une approche plus complexe, appelée Flaming Describing Function, prend en compte l'influence de la fréquence et de l'amplitude de la quantité contrôlée ([5]). Si le développement de telles fonctions est très utile, certaines d'entre elles peuvent être difficiles à obtenir dans des conditions expérimentales. En particulier, les fluctuations du rapport d'équivalence sont difficiles à générer expérimentalement sans fluctuations de vitesse liées.

Le brûleur utilisé dans la présente étude a déjà fait l'objet de quelques travaux. En particulier, A. Lamraoui ([6]) a fait une étude approfondie des caractéristiques acoustiques de l'instabilité qu'il présente (bien qu'à des conditions d'injection différentes). En particulier, son travail a montré que les fluctuations de pression observées dans la chambre de combustion sont présentes dans l'injecteur, et en particulier à l'intérieur des lignes d'alimentation en air et en propane. Ces ondes de pression acoustique à l'intérieur des lignes d'alimentation devraient provoquer des fluctuations de débit massique de l'air et du propane, mais avec des amplitudes et des délais différents. Ces différences entre les fluctuations des injections d'air et de carburant devraient alors conduire à des fluctuations du rapport d'équivalence. Ceci a cependant été extrapolé à partir des mesures de pression, et obtenir ainsi des mesures des fluctuations du rapport d'équivalence ϕ' est important pour confirmer ce mécanisme de couplage proposé. Ces mesures doivent être résolues dans le temps et quantitatives. Un autre objectif de cette étude est d'utiliser un système relativement simple à mettre en place, notamment dans une configuration industrielle, et pour lequel le post-traitement nécessaire est réduit au minimum.

Plusieurs solutions peuvent être adoptées pour obtenir des mesures de rapport d'équivalence. Premièrement, les sondes peuvent être utilisées. Plusieurs technologies permettent d'obtenir des mesures de rapport d'équivalence ([7]), et donnent accès à une mesure ponctuelle à des fréquences allant jusqu'à 100 Hz. Malheureusement, l'instabilité constatée dans le brûleur se situe également dans cette gamme de fréquences, et l'insertion d'une sonde peut modifier la structure du flux, rendant l'utilisation de tels diagnostics impraticable dans le cas présent. Une autre méthode consisterait à surveiller simultanément les émissions de chimiluminescence de la flamme à une longueur d'onde judicieusement choisie ([8, 9]). La restriction principale de cette méthode est son étalonnage. En particulier, la relation entre les rapports de chimiluminescence à différentes longueurs d'onde et ϕ n'est typiquement précise que sur une plage de valeurs donnée pour ϕ ([10]). Comme nous le verrons plus tard dans l'article, le but ici est d'obtenir les mesures dans une gamme assez large de valeurs pour ϕ , donc une autre méthode a dû être sélectionnée. L'acétone-PLIF réalisée en mélangeant de l'acétone au carburant pourrait être utilisée ([11]), et aurait l'avantage de produire des données 2D résolues. La modification du système d'injection de carburant pour introduire de l'acétone pourrait toutefois modifier la dynamique du brûleur, puisque l'acoustique des conduites d'alimentation en carburant semble jouer un rôle important dans l'instabilité observée. La solution retenue ici est l'utilisation d'une mesure basée sur l'absorption laser ([12, 13, 14]).

2 Brûleur et diagnostics utilisés

2.1 Brûleur

Le brûleur utilisé dans cette étude a été développé au laboratoire EM2C, et a déjà fait l'objet de plusieurs études (dont [6]). Il s'agit d'un brûleur à deux étages alimenté au propane, avec un système d'injection tangentielle. Les deux étages de l'injecteur sont identiques: l'air et le propane sont injectés tangentielle-ment dans un tube de 30 mm de diamètre, comme on peut le voir sur la figure 1. Une petite quantité d'air est également injectée axialement pour empêcher le reflux. Dans la présente étude, les conditions d'injection étaient les mêmes pour ces deux étapes, avec un débit d'air total de 7,6 g/s (0,41 g/s axialement et 3,595g/s à chaque stade d'injection). Le ratio d'équivalence a été déterminé par les changements d'injection de carburant, en gardant également un ratio de 50% pour chaque étage.

L'injecteur est fixé à une chambre de combustion d'une section carrée de 9,5x9,5 cm² et d'une longueur de 85 cm. Les derniers 36 cm sont en acier avec un système de refroidissement par eau, mais pour obtenir un bon accès optique, les premiers 49 cm ont des parois verticales en quartz, tandis que les murs horizontaux sont en béton. Deux fenêtres rectangulaires sont également placées à la ligne centrale de ces murs de béton au point d'injection, pour permettre le passage d'une feuille de laser. Certaines vues schématiques sont présentées dans la figure 1. Avec les conditions d'injection testées dans cette étude (rapport d'équivalence $0,74 \leq \phi \leq 0,94$), le brûleur a une puissance thermique de 16,6-21 kW.

2.2 Diagnostics

Comme on peut le voir sur le diagramme du brûleur dans la figure 1, deux microphones référencés M_1 et M_8 sont installés. Les microphones sont un modèle Bruel et Kjaer 4136 dans l'injecteur (M_1), un modèle

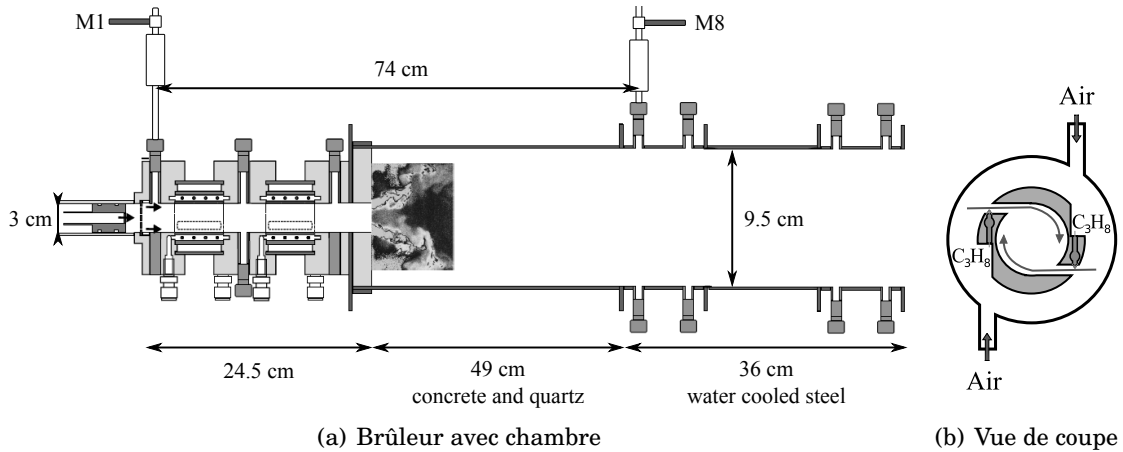


Figure 1: Vue du brûleur avec la chambre de combustion.

4938 dans la chambre (M_8), tous deux reliés aux préamplificateurs Bruel et Kjaer type 2669 et à un modèle Bruel et Kjaer type 2690-Q54 Nexus. Ils sont montés sur des guides d'onde en acier et avec un système de refroidissement par eau pour isoler les microphones des hautes températures des gaz brûlés, ce qui pourrait les endommager. Il y a donc une mesure de la pression acoustique dans les deux cavités acoustiques du système.

Parmi les autres diagnostics utilisés, un photomultiplicateur équipé d'un filtre optique passe-bande à $\lambda = 310 \pm 30$ nm a également été utilisé. Ceci permet l'observation de l'émission dans plusieurs bandes de OH^* , et donne une estimation qualitative du taux de dégagement de chaleur \dot{Q} . Le photomultiplicateur a été placé près du point focal d'une lentille de quartz de 15 cm de diamètre (Melles-Griot, lentille focale $f = 300$ mm) pointée vers la flamme pour recueillir son émission globale.

L'un des principaux diagnostics utilisés dans cette étude est un système de mesure du rapport d'équivalence basé sur l'absorption. Ce type de système est basé sur la loi de Beer-Lambert: si un faisceau de lumière d'intensité initiale I_0 se propage à travers un milieu absorbant ses photons, alors l'intensité après propagation sur une longueur x est donnée par la formule:

$$I(x) = I_0 e^{-\sum_i \sigma_i x N_i} \quad (1)$$

avec N_i la concentration des espèces constituant i , et σ_i la section efficace d'absorption de l'espèce i pour la longueur d'onde considérée.

Dans la présente étude, la source de lumière choisie est un laser Hélium-Néon émettant un faisceau continu à $3,39 \mu\text{m}$ avec une puissance de 2 mW (Thorlabs H339). Cette longueur d'onde est en effet absorbée par le propane, et non par les composants de l'air. Le faisceau laser traverse ensuite une roue dentée (Thorlabs MC1000A), ce qui permet d'obtenir des impulsions à une fréquence sélectionnable. Un détecteur Hamamatsu P4245 donne accès à l'intensité du laser après absorption.

Malheureusement, en raison de la configuration de l'injecteur et d'une stabilisation partielle de la flamme à l'intérieur du tube injecteur, le laser ne pouvait être placé qu'à l'intérieur de la chambre, à environ 10 mm du point d'injection. Cela signifie que le laser croise typiquement deux fois les gaz frais, comme on peut le voir sur la figure 2: la longueur d'absorption totale L est la somme de la longueur L_1 traversée avant de traverser la zone de recirculation intérieure, et la longueur L_2 croisée après. Puisque la flamme est turbulente et sujette à l'instabilité, cela signifie que cette longueur d'absorption L peut voir de fortes fluctuations, et doit donc être mesurée pour obtenir un lien précis entre l'absorption et la concentration de propane.

La solution choisie pour obtenir une mesure de cette longueur d'absorption L consiste à utiliser des images OH PLIF en utilisant une feuille laser à 282,3 nm (correspondant à la longueur d'onde d'excitation $Q_1(6)$ de OH) avec un taux de répétition de 10 Hz. Les radicaux OH sont en effet un sous-produit de la réaction de combustion, et donc un bon marqueur des gaz brûlés. En raison des contraintes d'espace, ainsi que du faible taux de répétition du système PLIF, les images ont été acquises séparément

des mesures d'absorption. Des profils axiaux et radiaux ont été acquis, pour permettre le suivi de la longueur d'absorption précitée L , mais aussi pour décrire la forme de la zone de recirculation interne et son évolution lors d'un cycle d'instabilité.

Les images typiques obtenues dans le même plan que le système de mesure de l'absorption sont présentées dans la figure 2. Le laser d'absorption passe à la hauteur $y = 0$ mm. Pour calculer la longueur d'absorption totale L , chaque image est d'abord coupée en deux moitiés verticales. L'algorithme passe ensuite du centre de l'image à l'autre côté, détectant les limites entre les gaz brûlés et les gaz frais en utilisant des gradients d'intensité. En raison de l'intensité du signal relativement faible dans les gaz brûlés de la zone de recirculation externe, la séparation est détectée sur la base de mesures de gradient d'intensité et non de seuillage simple. Cependant, même en utilisant une telle méthode, une mesure correcte n'était pas possible dans toutes les images.

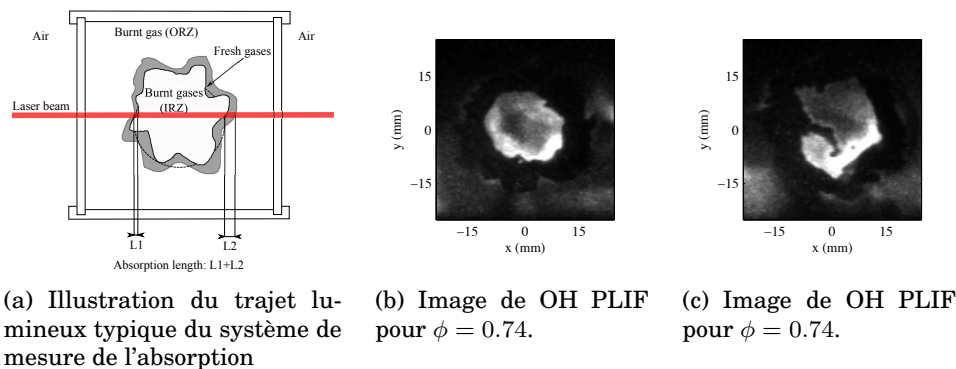


Figure 2: Principe de la mesure combinée d'absorption et images typiques de fluorescence.

Comme indiqué précédemment, étant donné que les mesures OH PLIF et d'absorption ne pouvaient pas être simultanées, une méthode de combinaison doit être utilisée pour associer les deux résultats. Les mesures PLIF étant effectuées à 10 Hz, une approche par moyenne de phase a été utilisée.

La moyenne de phase a été calculée en utilisant le signal $P_{injecteur}$ du microphone M_1 , car il a été acquis dans toutes les mesures simultanément aux autres diagnostics. Ce signal est décomposé en différents cycles d'oscillations, chaque cycle étant divisé en 360° de phase. Pour chaque signal acquis simultanément à cette pression de référence, la valeur de phase correspondante de chaque point de donnée acquis peut alors être connue. Typiquement, le signal est décomposé en 24 classes par la suite.

3 Résultats de fluorescence sur OH

Trois conditions d'injection sont choisies pour être détaillées dans la suite de cet article. Les résultats obtenus pour les images axiales de fluorescence sont montrés dans la figure 3. Ils montrent que pour les deux cas pauvres $\phi = 0,74$ et $0,82$, la flamme s'ouvre et se ferme fortement pendant un cycle d'instabilité. Pour $\phi = 0,94$, ce phénomène, bien que toujours présent, est beaucoup moins marqué.

Pour les images radiales (figure 3 droite), les images ont été binarisées avant la moyenne de phase pour avoir une image plus nette. Dans ce sens, la différence de forme de la zone de recirculation interne entre $\phi = 0,74$ et $0,82$ d'une part, et $\phi = 0,94$ d'autre part est plus évidente: dans les deux cas plus pauvres, le profil radial est elliptique, tandis que pour la dernière condition d'injection, il est plus circulaire, avec deux fentes vers l'intérieur. L'évolution de ce profil au cours d'un cycle d'instabilité est également différente. Dans les trois cas, on peut observer une expansion et une contraction du profil radial (bien que moins important pour $\phi=0,94$). Le mouvement de cette ellipse est également très différent entre ces deux groupes.

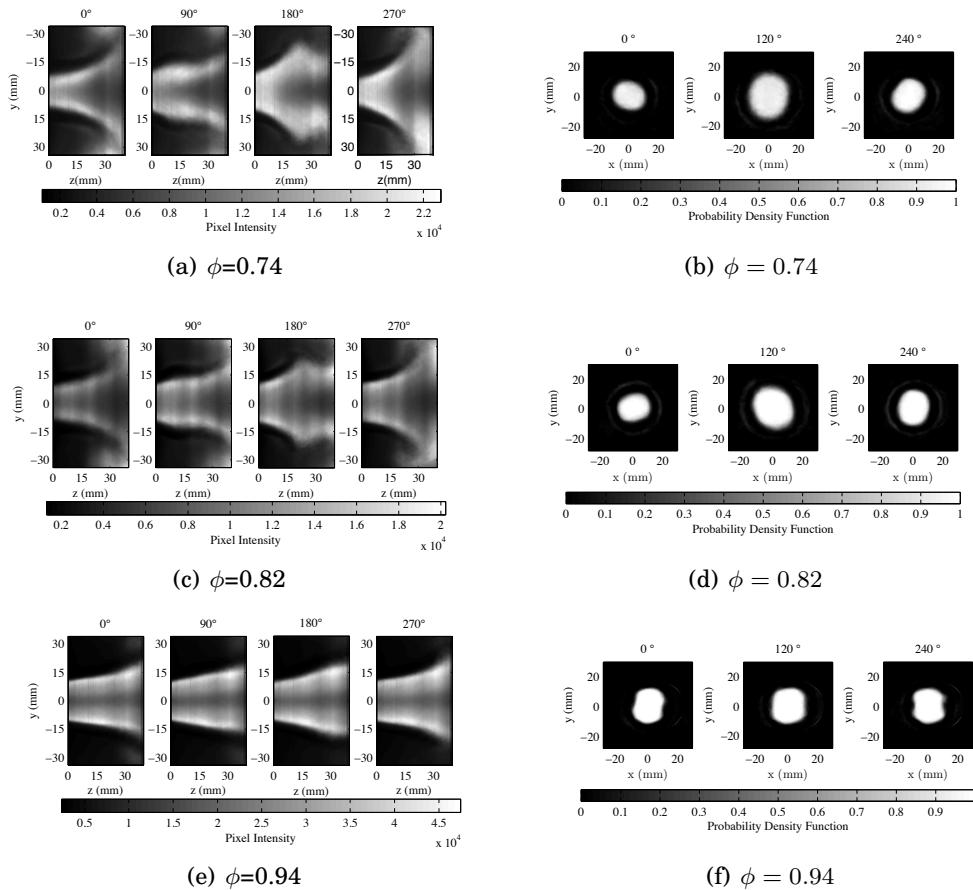


Figure 3: Evolution de la zone de recirculation interne au cours d'un cycle d'oscillation de pression mesuré avec par des mesures axiales et radiales de PLIF sur OH. Moyenne de phase calculée avec $P_{injecteur}$ comme référence.

4 Mesures de la richesse

Comme indiqué dans la description du diagnostic, des mesures de richesse sont obtenues en combinant l'absorption d'un laser IR par du propane et une mesure de la longueur d'absorption en utilisant les profils radiaux OH PLIF obtenus à la même distance de l'injecteur. Pour ce faire, la moyenne de phase de chaque diagnostic est d'abord calculée, puis pour chaque valeur de phase, la combinaison des résultats conduit au résultat final.

A partir des mesures OH-PLIF, les longueurs (non présentées ici) de gaz frais peuvent être estimées. Il est ensuite possible d'obtenir les résultats de moyenne de phase pour les mesures d'absorbance. Ceux-ci sont présentés dans la figure 4, avec à nouveau l'écart-type présenté comme barres d'erreur, et les points de données utilisés comme des croix grises. Ils montrent que même si un cycle d'oscillation est clairement présent dans les trois cas, il y a encore une forte dispersion quelque soit la valeur de la phase.

Les résultats finaux sont présentés dans la figure 5 et dans la table 1. La valeur moyenne de ϕ n'est malheureusement jamais retrouvée avec une tendance à la sous-estimer, notamment à $\phi = 0,94$. Cela provient du fait que le flamme étant stabilisée à l'intérieur, le propane est consommé avant la zone de mesure. Il est clair cependant que de forts changements de ϕ sont présents au cours d'un cycle d'instabilité, en particulier dans les deux cas les plus maigres. La mesure du déphasage entre ϕ et $P_{injecteur}$ montre une évolution intéressante. Pour une fois c'est $\phi = 0,82$ et $0,94$ qui peuvent être groupés ensemble, avec des fluctuations de ϕ et $P_{injecteur}$ presque en opposition de phase, alors que pour $\phi = 0,74$ seulement 90° de décalage de phase est observé.

Cette mesure de ϕ a été obtenue à 10 mm de l'injecteur, et ainsi les valeurs de déphasage présentées plus haut ne sont pas représentatives de ce qui se passe aux points d'injection. Afin de mieux comprendre la physique sous-jacente, et de confirmer le modèle proposé par A. Lamraoui [6], il serait donc nécessaire

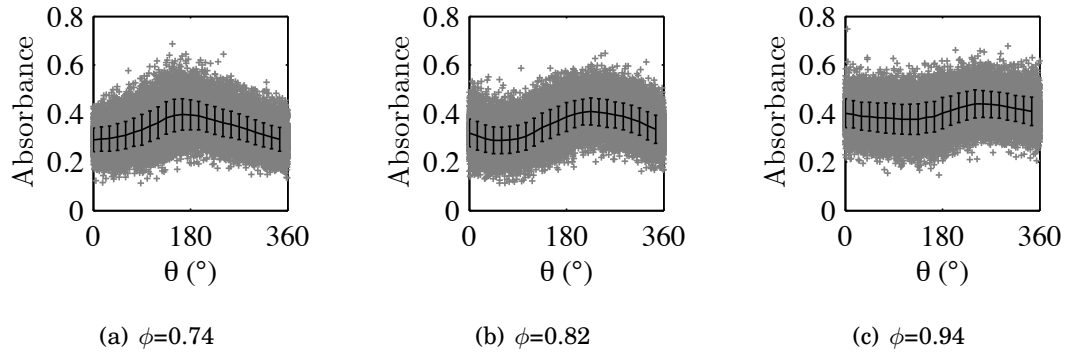


Figure 4: Mesures de phase moyennées de l'absorption aux différentes conditions d'injection, avec les points de données sous-jacents.

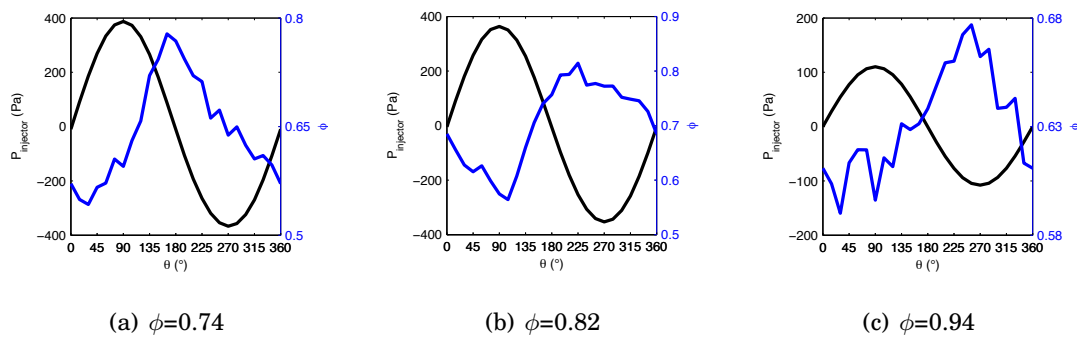


Figure 5: Moyenne de phase de ϕ et $P_{injecteur}$ pour les différentes conditions d'injection.

ϕ	0.74	0.82	0.94
$mean(\phi)$	0.60-0.66	0.68-0.70	0.63-0.69
$\Delta\phi/mean(\phi)$	26-36 %	33-38 %	12-14 %
$\Delta\theta(/P_{injecteur})$	$90 \pm 15^\circ$	$165 \pm 15^\circ$	$150 \pm 15^\circ$

Table 1: Caractéristiques des mesures ϕ moyennées par phase aux différentes conditions d'injection.

de lier les fluctuations ϕ mesurées à d'éventuelles oscillations à l'intérieur du tube injecteur.

5 Modélisation de la convection de la richesse

Pour mieux comprendre les mécanismes de l'instabilité, il est nécessaire de traduire les mesures ϕ à 10 mm de l'injecteur en valeurs au point d'injection de chaque étape. Puisque les caractéristiques du flux à l'intérieur du tube d'injection sont malheureusement inconnues, une modélisation est nécessaire.

Une précédente étude acoustique détaillée du brûleur (cite lamraoui:tel-00678248) a proposé un mécanisme reliant $P_{injecteur}$ à ϕ : les fluctuations de pression pénètrent dans les tubes d'alimentation en air et en carburant, mais avec une amplitude plus élevée pour ce dernier. Cela signifie que lorsque la pression est la plus élevée, le carburant est injecté avec le plus petit débit massique: les fluctuations ϕ devraient être en opposition de phase aux fluctuations $P_{injecteur}$ aux deux points d'injection selon ces résultats. Ces fluctuations devraient ensuite être convectées à l'extérieur.

Pour vérifier si le mécanisme proposé est compatible avec les résultats actuels, il est nécessaire de modéliser les différents décalages temporels entre les signaux expérimentaux et leurs valeurs aux deux

points d'injection. La pression $P_{injecteur}$ acquise au fond du tube injecteur par le microphone M_1 se déplace à la vitesse du son, entraînant un décalage temporel de t_1 et t_2 entre le signal de mesure et ses valeurs aux points d'injection. De même, toute fluctuation ϕ créée à chaque étage de l'injecteur est convectée à l'extérieur, ce qui entraîne un décalage temporel de T_1 et T_2 avec le signal mesuré à 10 mm de l'injecteur. Du premier point d'injection jusqu'au second, le débit massique injecté ainsi que la section transversale de l'injecteur sont connus, ce qui permet de calculer une vitesse moyenne de convection. Cependant, l'imagerie PLIF montre que la flamme pénètre à l'intérieur du tube injecteur, conduisant à une section inférieure pour les gaz frais où il est présent. Cela signifie qu'après le deuxième point d'injection, la convection sera d'abord réalisée en utilisant toute la section du tube d'injection, tandis qu'à certains points la flamme crée un blocage et accélère le flux. Pour tenir compte de cet effet, la forme moyenne de la flamme est ici considérée comme circulaire, avec une surface calculée en utilisant les images OH PLIF moyennes axiales pour chacune des trois conditions d'injection. Une illustration des différents délais, ainsi que de l'influence de la flamme est donnée dans la figure 6. Les positions extrêmes possibles de la flamme sont également données ici, sans aucune pénétration de flamme et une stabilisation de la flamme au milieu du deuxième étage de l'injecteur.

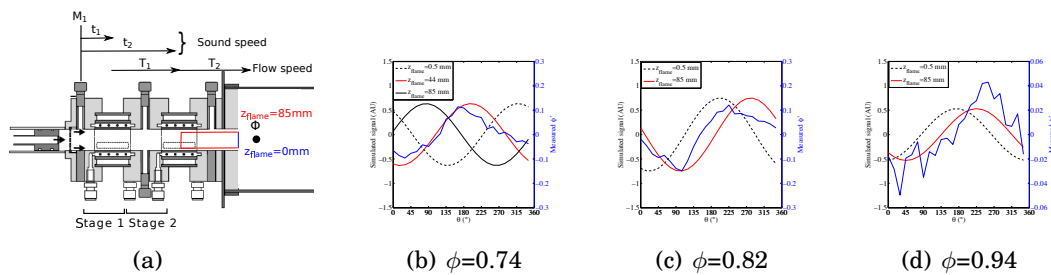


Figure 6: Retards temporels associés à chaque position possible de la flamme à l'intérieur de l'injecteur en fonction de la richesse moyenne.

6 Conclusions

Dans la présente étude, une mesure des fluctuations du rapport d'équivalence dans un brûleur turbulent partiellement prémélangé sans plénum a été réalisée en combinant l'absorption d'un laser IR, avec une mesure de la longueur d'absorption en utilisant l'imagerie radiale OH PLIF. Ce couplage a été obtenu en utilisant la moyenne de phase, en utilisant la pression au bas de l'injecteur comme signal de référence. En plus de cela, la mesure de pression à l'intérieur de la chambre, la chimiluminescence OH* ainsi que l'imagerie OH PLIF axiale ont été réalisées. Ces mesures ont été effectuées pour trois valeurs différentes du rapport d'équivalence ϕ , illustrant le mieux les changements dans les caractéristiques de l'instabilité thermo-acoustique présente dans ce brûleur. Un modèle simplifié de la pénétration de la flamme à l'intérieur du tube injecteur a été réalisé, avec des résultats suggérant que le mécanisme proposé de couplage entre $|P_{injecteur}|$ et $|\phi'|$ proposé dans une étude précédente (effet différent de la pression la fluctuation de la ligne d'alimentation en air et en carburant) est précise et donne une position de flamme correspondante à l'intérieur de l'injecteur z_{flamme} .

Les résultats globaux de l'étude sont donnés dans le tableau 2, et montrent que la condition $\phi = 0,82$ semble effectivement être un point central entre deux dynamiques, car elle est soit similaire à $\phi = 0,74$ ($|P_{injecteur}|$, $|\phi'|$, section IRZ) ou à $\phi = 0,94$ (Fréquence d'instabilité, z_{flamme}). De plus, la diminution de $|P_{injecteur}|$ se produit dans les mêmes conditions que pour $|\phi'|$, confirmant un lien entre les deux. L'évolution de la position modélisée de la flamme à l'intérieur de l'injecteur z_{flamme} avec ϕ est également compatible avec les caractéristiques observées de la flamme (avec notamment un décollement total pour $\phi < 0,7$ et une flamme conique pour $\phi > 0,96$).

Une étude plus approfondie pourrait mieux expliquer les phénomènes observés ici. En particulier, les mesures de PIV pourraient permettre de mieux décrire la section elliptique rotative observée de l'IRZ dans deux des trois conditions d'injection, et une étude numérique du brûleur pourrait être réalisée

ϕ	0,74	0,82	0,94
$ P_{injecteur} $	140 dB	140 dB	125 dB
$ \phi' $	30%	30 %	13%
IRZ cross-section	Rotation	Rotation	Oscillation
Frequency	192 Hz	212 Hz	212 Hz
z_{flame}	Avant étage 2	à l'étage 2	à l'étage 2

Table 2: Caractéristiques des instabilités.

pour améliorer la modélisation de l'intérieur du tube injecteur, puisque celui-ci est malheureusement inaccessible sur ce banc d'essai.

References

- [1] W. Pun. *Measurements of Thermo-Acoustic Coupling*. PhD thesis, 2001.
- [2] C. Mirat. *Analyse des instabilités de combustion dans des foyers de centrale thermique fonctionnant au fioul lourd*. PhD thesis, 2015.
- [3] Y. Huang and V. Yang. Dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, 35(4):293–364, 2009.
- [4] T. Lieuwen. Modeling Premixed Combustion-Acoustic Wave Interactions: A Review. *Journal of Propulsion and Power*, 19(5):765–781, 2003.
- [5] F. Boudy. *Analyse de la dynamique non-linéaire et du contrôle des instabilités de combustion fondée sur la "Flame Describing Function" (FDF)*. PhD thesis, 2012.
- [6] A. Lamraoui. *Investigating combustion noise and instabilities in a gas turbine combustor : acoustic propagation and flame dynamics*. Theses, Ecole Centrale Paris, July 2011.
- [7] N. Docquier and S. Candel. Combustion control and sensors: A review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 28(2):107–150, 2002.
- [8] T. García-Armingol, Y. Hardalupas, A.M.K.P. Taylor, and J. Ballester. Effect of local flame properties on chemiluminescence-based stoichiometry measurement. *Experimental Thermal and Fluid Science*, November 2013.
- [9] Y. Hardalupas, M. Orain, C. S. Panoutsos, a. M K P Taylor, J. Olofsson, H. Seyfried, M. Richter, J. Hult, M. Aldén, F. Hermann, and J. Klingmann. Chemiluminescence sensor for local equivalence ratio of reacting mixtures of fuel and air (FLAMESEEK). *Applied Thermal Engineering*, 24(11-12):1619–1632, 2004.
- [10] J. Ballester and T. García-Armingol. Diagnostic techniques for the monitoring and control of practical flames. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(4):375 – 411, 2010.
- [11] Y. Nakamura, S. Manome, and H. Yamashita. Diagnostics of reactive zone in premixed flames via acetone-oh simultaneous plif. In *The 13th international symposium on applications of laser techniques to fluid mechanics, Lisbon*, 2006.
- [12] H. Li, S.D. Wehe, and K.R. McManus. Real-time equivalence ratio measurements in gas turbine combustors with a near-infrared diode laser sensor. *Proceedings of the Combustion Institute*, 33(1):717–724, 2011.
- [13] J.G. Lee, K. Kim, and D.A. Santavicca. Measurement of equivalence ratio fluctuation and its effect on heat release during unstable combustion. *Proceedings of the Combustion Institute*, 28:415–421, 2000.
- [14] Eiji Tomita, Nobuyuki Kawahara, Atsushi Nishiyama, and Masahiro Shigenaga. In situ measurement of hydrocarbon fuel concentration near a spark plug in an engine cylinder using the 3.392 μm infrared laser absorption method: application to an actual engine. *Measurement Science and Technology*, 14(8):1357, 2003.