HAL open science

Couplage de la PIV et de la PLIF de OH et d'anisole pour l'étude d'une flamme se propageant dans une stratification de mélange laminaire

Edouard Delangle, Bertrand Lecordier, Corine Lacour, Armelle Cessou

To cite this version:

Edouard Delangle, Bertrand Lecordier, Corine Lacour, Armelle Cessou. Couplage de la PIV et de la PLIF de OH et d'anisole pour l'étude d'une flamme se propageant dans une stratification de mélange laminaire. Congrès Francophone de Techniques Laser, CFTL 2016, Sep 2016, Toulouse, France. hal-01852232

HAL Id: hal-01852232

https://hal.science/hal-01852232v1

Submitted on 1 Aug 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.

Couplage de la PIV et de la PLIF de OH et d'anisole pour l'étude d'une flamme se propageant dans une stratification de mélange laminaire

Edouard Delangle, Bertrand Lecordier, Corine Lacour, Armelle Cessou

CORIA-UMR6614, Normandie Université, CNRS, INSA and Université de Rouen, France
Email auteur : Bertrand.Lecordier@coria.fr

La combustion partiellement prémélangée est introduite dans de nombreuses technologies récentes de combustion pour réduire les émissions de polluants et augmenter l'efficacité énergétique. Ce papier s'intéresse à la combustion stratifiée prémélangée. Des mesures simultanées de PIV, PLIF-OH et PLIF-anisole ont été utilisées pour étudier la propagation de flamme allumée par étincelle dans une stratification de mélange. Deux familles de flammes propane/air ont été considérées en fonction que la flamme se propage vers un milieu pauvre inflammable ou ininflammable. Dans les deux cas nous avons pu montrer une amélioration de la combustion dans les zones pauvres, avec temporairement avant extinction, des propagations de flamme dans des mélanges ininflammables.

1 Introduction

La combustion partiellement prémélangée est introduite dans de nombreuses technologies récentes de combustion pour réduire les émissions de polluants et augmenter l'efficacité énergétique. Cette stratégie conduit à des régimes de combustion mixtes, variant entre des situations où les réactifs sont entièrement prémélangées ou non-prémélangées, avec un large panel de structure de flamme entre ces deux situations. Ce papier s'intéresse à la combustion stratifiée prémélangée avec des inhomogénéités de mélange où la flamme peut se propager (Masri 2015). Dans le but d'étudier la situation de propagation de flamme vers des mélanges pauvres et où la stratification améliore la propagation des flammes dans les zones pauvres, nous avons mis en place 3 diagnostics laser simultanés : PIV, PLIF-anisole et PLIF-OH. Ces trois méthodes couplées donnent accès à de nombreuses propriétés locales de la flamme comme la vitesse de combustion laminaire, l'étirement, la richesse, la vitesse des gaz frais, l'activité de la flamme, mais également comme nous le présenterons l'épaisseur thermique de la flamme, grandeur souvent inaccessible à la mesure. Ces quantités sont primordiales pour étudier les situations où la stratification affecte la propagation dans les zones les plus pauvres (Jiménez 2002, Marzouk et al. 2000, Richardson et al. 2010), le dégagement de chaleur (Zhou and Hochgreb 2013), l'épaisseur de flamme (Richardson, Granet, Eyssartier and Chen 2010), étend les limites d'inflammabilité (Kang and Kyritsis 2007, Marzouk, Ghoniem and Najm 2000) et améliore la résistance de la flamme à l'étirement (Balusamy et al. 2014). Même si les études expérimentales et numériques concluent que ces effets sont dus à une augmentation de la température des gaz brûlés et du flux d'espèces dans les produits de combustion (Marzouk, Goethals et Najm 2000, Pires da Cruz 2000), les mécanismes physiques de ces flammes souffrent encore d'une compréhension incomplète.

Dans ce travail nous considèrerons des flammes allumées par un point source dans une stratification de mélange, configuration de flamme bien établie et largement utilisée pour mesurer la vitesse de combustion en mélange homogène et permettant la détermination directe de l'étirement (Egolfopoulos et al., 2014). Dans ce travail, pour la mesure de la vitesse de combustion locale, nous adopterons l'approche proposée par (Andrews and Bradley 1972, Bradley 1996) en déterminant la vitesse de la flamme S_b relativement à la vitesse des gaz frais devant la flamme U_n. L'intérêt de cette approche est qu'elle ne nécessite pas d'hypothèse sur la température locale de la flamme, hypothèse souvent réductrice même en situation homogène mais qui devient inapplicable en configuration inhomogène où la température des gaz brûlés varie localement. Expérimentalement, nous adopterons l'approche développée par Balusamy et al. 2011 basée sur une PIV adaptative.

Dans cette étude, la flamme est allumée au centre d'une stratification laminaire produite dans une chambre à volume constant. L'analyse conditionnée des propriétés de la flamme se fera sur les segments de flamme ayant atteint le mélange homogène pauvre entourant la stratification

(Balusamy, Cessou and Lecordier 2014). Par rapport aux études précédents, des situations où la flamme se propage vers des mélanges pauvres inférieurs aux limites d'inflammabilité a nécessité de mettre en place une technique de PLIF sur le radical OH afin de déterminer le gradient du signal de OH et d'en déduire l'activité locale de la flamme, c'est-à-dire, s'il y a combustion ou non. Le couplage des trois techniques sera appliqué pour différents cas de stratification.

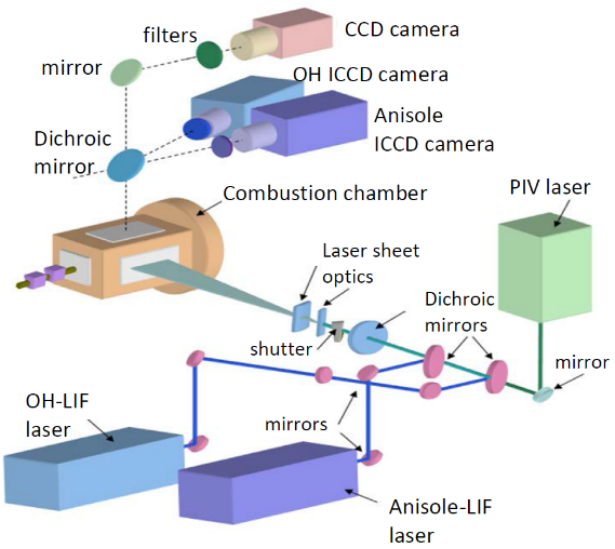

Figure 1 – Dispositif expérimental

2 Dispositif expérimental

La configuration optique est présentée sur la Figure 1. Le système PIV se compose d'un laser Nd:YAG double cavité (Twin-Ultra, Quantel), délivrant des impulsions de 30 mJ à 532 nm et d'une caméra PIV 2k.2k px en 12 bits (Hamamatsu C9300) équipée d'un objectif Nikkor (135 mm, f/dmax = 2, f/8). La PLIF de l'anisole on utilise la 4e harmonique d'un laser Nd:YAG (Quantel, YG180) qui délivre 30 mJ afin de s'assurer d'un régime linéaire pour la fluorescence. Pour la PLIF-OH, un laser à colorant (Quantel, TDL90) pompé par la seconde harmonique d'un laser Nd:YAG (Quantel, Brillant B) a été utilisé et délivre des impulsions de 20 mJ. Les signaux de fluorescence sont collectés sur deux cameras intensifiées (Roper Scientific PIMAX512) équipées avec un objectif UV de 98 mm (CERCO 2178, SODERN, f/2.8)) pour la PLIF-anisole et un objectif de 105 mm (Nikkor 105, f/4.5) pour la PLIF-OH. Des miroirs dichroïques sont utilisés pour combiner les trois faisceaux laser qui sont ensuite transformés en nappe au centre de la chambre à l'un d'une combinaison d'une lentille sphérique (f = 1 m) et de deux lentilles cylindriques (f = −25 mm, f = +100 mm).

Pour les mesures PIV, de fines particules d'huile sont introduites dans le mélange gazeux. Le propane est ensemencé avec de l'anisole (0,015% en volume à la stœchiométrie). Les images de PLIF-OH sont corrigées des inhomogénéités de nappe laser en collectant l'image de fluorescence d'un mélange homogène riche contenant de l'anisole. Les signaux de PIV et de PLIF sont séparés par un miroir dichroïque qui a une fréquence de coupure à 350 nm. La fluorescence de l'anisole est collectée dans la bande spectrale de 275 à 350 nm sélectionnée avec un filtre liquide (10 mm d'épaisseur - 0.6% vol. de toluène dans de l'iso-octane) associé avec une combinaison de deux filtres Schott (UG11 and WG280, 3 mm). L'intervalle de temps entre les impulsions laser pour la PIV est optimisé en fonction de la vitesse, et les deux impulsions laser pour les fluorescences sont positionnées au centre des impulsions PIV avec un décalage de 2 µs entre elles. Une grille de calibration unique (Figure 2) est utilisée pour déterminer les fonctions de *mapping* des 3 caméras (polynômes d'ordre 5) afin d'assurer une parfaite superposition des mesures (≈ 0,1 pixel), en particulier pour la PLIF-OH observant la nappe laser avec un très léger angle d'inclinaison (Figure 1) pour des raisons d'encombrement.

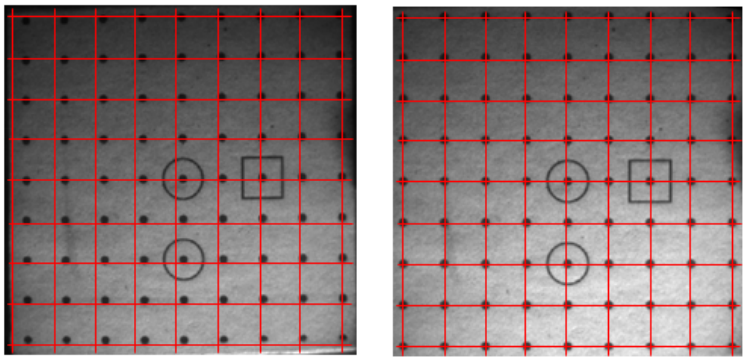

Figure 2 – Grille régulière superposée à une image brute de calibration avant (gauche) et après correction (droite)

L'expérience est réalisée dans une chambre de combustion à volume constant (60×60×160 mm^3) équipée de 3 hublots en silice UV. La chambre est initialement remplie a pression atmosphérique avec un mélange homogènes propane-air de richesse φ=0.6 ou φ=0.4. La stratification laminaire est créée par un système d'injection assurant une grande reproductibilité et un contrôle

précis des conditions d'injection. Dans ce travail nous considérons deux familles de flammes (Tableau 1) : *Famille A*, où la flamme est initiée au centre de la stratification dans un mélange riche et se propage vers un mélange pauvre φ_{ch}=0.6 légèrement au-dessus des limites d'inflammabilité et *Famille B,* le mélange dans la chambre a une richesse inférieure à la limite d'inflammabilité φ_{ch}=0.4 et la flamme est allumées dans différentes richesses couvrant la gamme φ_{ig}=0.8 à φ_{ig}=1.5.

Le mélange est allumé avec un minimum d'énergie par une étincelle produite entre deux fines électrodes de 0,4 mm de diamètre situées au centre de la chambre et ne perturbant pas le déroulement de la combustion. Le volume limité de la chambre influence que très légèrement la combustion avec une très faible augmentation de pression (40 mbar) pendant la durée de l'analyse, qui cependant n'est pas influencée grâce à l'utilisation de la mesure directe par PIV de la vitesse de combustion laminaire (Balusamy, Cessou and Lecordier 2011).

		φ_{ig}			
	φ_{ch}	0,8	1,0	1,2	1,5
Famille A	0,6			1,2–0,6	1,5–0,6
	0,7			1,2–0,7	
Famille B	0,4	0,8–0,4	1,0–0,4	1,2–0,4	1,5–0,4

Tableau 1 – Cas étudiés : Mélange dans la chambre (φ_{ch}) ; richesse à l'allumage (φ_{ig})

3 Résultats et discussions

3.1 Identification de l'activité de la flamme

Lorsque la flamme atteint des zones mélange ininflammable (φ_{ch}=0.4), il est nécessaire de pouvoir différentier les régions où il n'y a plus de combustion de celles où la flamme se propage encore et reste active et auto-entretenue. Pour cela nous avons opté pour approche basée sur le gradient de OH (Bayley et al. 2010, Sadanandan et al. 2008, Sweeney and Hochgreb 2009). Le traitement débute par la détermination de l'interface entre gaz frais et gaz brûlés à partir du contour de PLIF-OH. Une fois le contour de flamme déterminé, nous extrayions le profil du signal de OH le long de la normale au front de flamme et nous interpolons ce profil avec une fonction *erfc* pour d'obtenir une mesure du gradient de OH en s'affranchissant du bruit (Figure 3). Afin de montrer la pertinence du gradient de OH pour évaluer l'activité de flamme et son extinction, nous avons comparé cette mesure avec une approche établie basée sur le produit des fluorescences OH×CH_2O. Une expérience préliminaire a donc été effectuée dans un bec Bunsen conique où une extinction locale est produite pas un jet d'air. Sur la Figure 4 nous montrons un exemple des deux mesures et nous pouvons noter que la zone de plus faible gradient de OH correspond bien à celle sur la droite de la flamme où se trouve l'extinction et ou le produit OH×CH_2O est le plus faible. Suite à cette vérification de la relation entre le gradient de OH et l'activité de la flamme, nous avons déterminé une

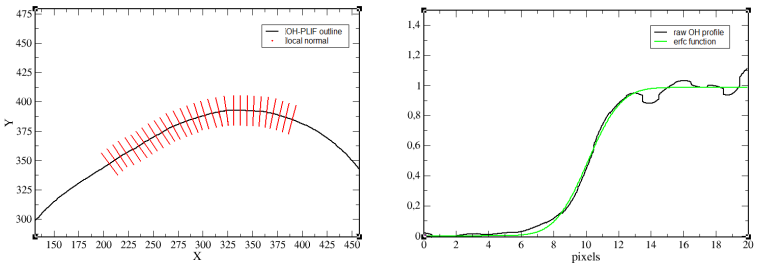

Figure 3 – Exemple d'extraction du profil de OH et de l'interpolation par une fonction erfc

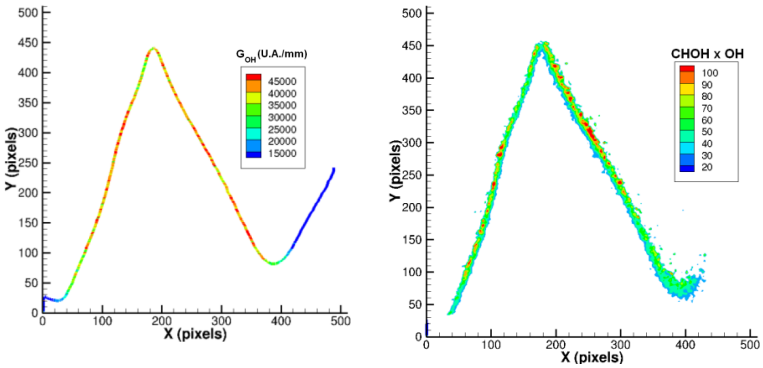

Figure 4 – Mesures simultanées du gradient de OH et de PLIF-CH2OxOH dans un bec Bunsen, où une extinction locale est produite par l'injection locale d'un jet d'air.

valeur seuil de gradient de OH (en unité arbitraire) identifiant une limite entre une flamme active et une éteinte. Nous avons appliqué cette méthode au cas d'une flamme sphérique se propageant dans différentes richesses jusqu'à φ = 0.6. Notons que dans cette configuration, en dessous de la richesse φ = 0.62, les effets d'étirement sur la flamme empêche une propagation auto-entretenue et la flamme s'éteint. Figure 6 nous présentons les densités de probabilité du gradient de OH pour les différentes richesses. La position du maximum des PDF diminue avec la richesse et les cas avec les deux richesses les plus faibles (φ = 0.6 and φ = 0.62) où les flammes ne se propagent pas sont séparés des autres distributions. Par cette méthode, nous avons pu établir que dans nos conditions expérimentales un seuil de 17 000 u.a. permet de séparer les flammes auto-entretenues de celles en phase d'extinction ou éteintes.

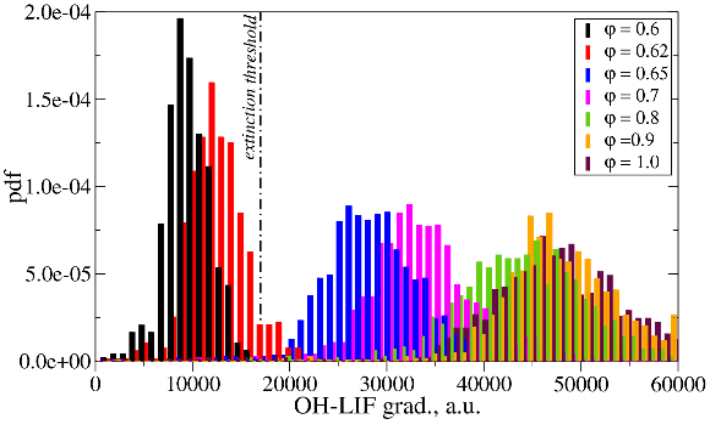

Figure 5 Fonction de densité de probabilité du gradient du signal de PLIF-OH le long du front de flamme

3.2 Détermination de l'épaisseur de flamme

La richesse locale du mélange est mesurée à partir du signal de PLIF-anisole en suivant la procédure de correction tir-à-tir développée par Balusamy et al. (Balusamy, Cessou and Lecordier 2014). La fluorescence du radical OH marque les hautes températures des gaz brûlés (T>1500 K), alors que celle de l'anisole trace la température de pyrolyse de ce dernier, située aux alentours de 800 K (Nowakowska et al. 2014). Ces deux isothermes sont clairement identifiables lorsque l'on superpose les signaux de fluorescence (Figure 6) pour des flammes se propageant dans une injection homogène et stratifiée. Sur ces images parfaitement superposées à l'aide des fonctions de calibrations, nous observons la zone noire entre les deux fluorescences permettant de définir une distance dans la direction normale à la flamme que nous avons identifiée par δ_{LIF}. Dans le cas de l'injection homogène (gauche), cette distance est pratiquement constante tout autour de la flamme alors qu'elle varie clairement dans le cas stratifié compte tenu de la variation de la richesse le long du front de flamme.

La Figure 7 montre la comparaison des valeurs de δ_{LIF} obtenues pour différents cas de flamme en mélange homogène avec l'épaisseur thermique $\delta_{th} = (T_b - T_u)/\nabla T_{max}$ calculée par simulation d'une flamme 1D non étirée avec Cantera (Goodwin et al. 2015) et le schéma cinétique proposé par Jerzembeck et al. (Jerzembeck et al. 2009). La similarité des résultats montre que δ_{LIF} peut être utilisé pour estimer l'épaisseur locale de la flamme, grandeur pratiquement inaccessible par d'autre méthode expérimentale et pourtant essentielle à l'étude de la combustion car représentative des épaisseurs des zones thermo-diffusives devant la flamme. La grandeur δ_{LIF} peut également être comparée à la distance entre une isotherme marquant la disparition de l'anisole et la position du maximum du $\nabla[OH]_{max}$ dans la simulation. Cela correspond à une première tentative de modélisation plus réaliste que le simple paramètre $\delta_{th} = (T_b - T_u)/\nabla T_{max}$. Cette distance est reportée sur la Figure 7 pour l'isotherme 650K. Ce premier résultat est cohérent avec la température de pyrolyse de l'anisole et cela motive des travaux futurs pour introduire la cinétique de l'anisole dans la simulation afin d'établir si la mesure de δ_{LIF} peut être utilisée

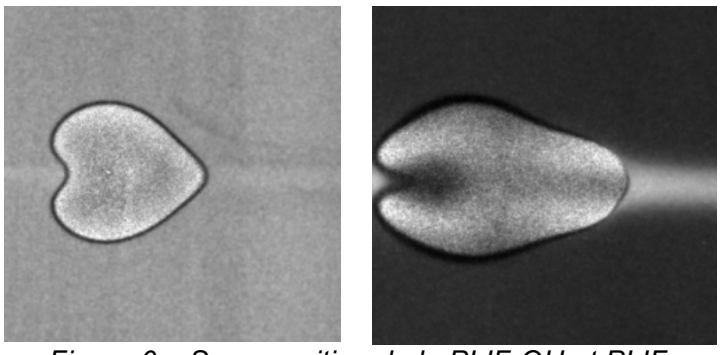

Figure 6 – Superposition de la PLIF-OH et PLIF-anisole pour une injection laminaire homogène $\varphi_{ig} =$ 0.8 to $\varphi_{ch} =$ 0.8, 4 ms après l'allumage (gauche) et pour un cas stratifié $\varphi_{ig} = 1.2$ et $\varphi_{ch} =$ 0.4 (droite)

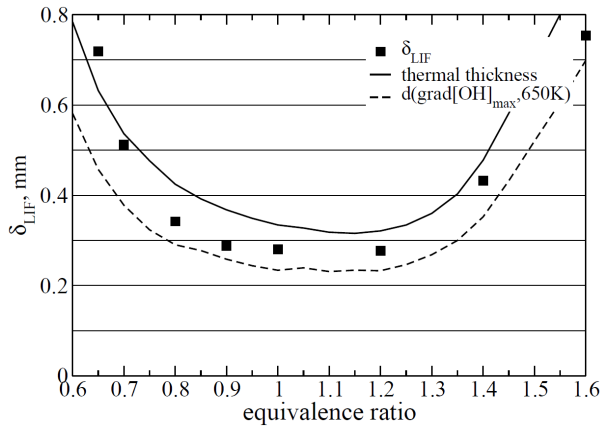

Figure 7 – Epaisseur en fonction de la richesse : comparaison de δ_{LIF} avec l'épaisseur thermique calculée par une simulation 1D de flamme plane C_3H_8/air, et la distance entre l'isotherme 650K et $\nabla[OH]_{max}$.

quantitativement pour la mesure d'épaisseur de flamme. Dans ce travail, δ_{LIF} sera utilisée pour approximer l'épaisseur thermique afin de comparer celles du cas stratifiés à celles obtenues en homogène.

3.3 Propriétés de la flamme en mélange stratifié.

Le critère déterminé précédemment sur le gradient de OH-PLIF et l'épaisseur de flamme sont utilisés pour étudier les deux familles de flammes du Tableau 1. Ces mesures sont associées à celle de la vitesse de combustion laminaire (Balusamy et al. 2011) permettant une mesure directe sans hypothèse. Les propriétés de flamme sont analysées localement et restreintes dans cette étude uniquement aux zones de flamme qui se propagent dans le mélange pauvre homogène de la chambre (φ_{ch}) après avoir traversée la stratification. Afin de limiter l'analyse à des conditions comparables à celles d'une flamme sphérique dans un mélange homogène, nous n'avons considéré que certaines zones sur la flamme (Balusamy, Cessou and Lecordier 2014). Ainsi les mesures ont été conditionnées par rapport à la richesse de la chambre ($\varphi_{ch} = \pm\, 0.05$), des vitesses tangentes à la flamme faibles (−5% to 5% de la vitesse moyenne U_g). Un conditionnement supplémentaire a été ajouté pour ne conserver que les zones se propageant principalement orthogonalement à la stratification et cela en ne considérant que les points dans un secteur de ±20° centré sur le point d'allumage (Figure 8). Cette condition permet de sélectionner uniquement les segments de flamme exposés à des temps de résidence dans le mélange pauvre comparables. Avec ces critères, les échantillons analysés ont des étirements proches et donc contrairement à l'approche proposée par Balusamy et al. (Balusamy, Cessou and Lecordier 2014), les résultats n'ont pas été extrapolés à étirement nul.

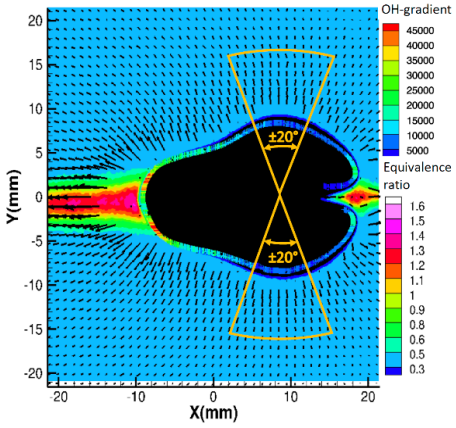

Figure 8 – Mesures combinées et conditionnement angulaire des mesures

Famille A : Propagation dans un mélange pauvre inflammable.

La Figure 9 présente la vitesse de combustion en fonction du temps. La vitesse non-étirée pour $\varphi = 0{,}6$ et $\varphi = 0{,}7$ sont respectivement $U_n^{\circ} = 0{,}12\ m/s$ et $U_n^{\circ} = 0{,}20\ m/s$, et donc la vitesse de combustion pour une flamme étirée devrait être plus faible due aux effets thermo-diffusifs. Toutefois, l'initiation dans des conditions riches conduit à des vitesses dans les mélanges pauvres (t = 2 ms) supérieures à celles des flammes étirées pour des mélanges $\varphi = 0{,}6$ et $\varphi = 0{,}7$. Pour les deux cas avec $\varphi_{ig} = 1{,}2$, la vitesse U_n montre un comportement similaire avec une diminution exponentielle qui tend vers une limite pour $t > 6\ ms$, où U_n est pratiquement constante (Figure 9 et Figure 10). Ces valeurs asymptotiques sont proches de celles des flammes non-étirée à $\varphi_{ch} = 0{,}6$ et $\varphi_{ch} = 0{,}7$, c'est-à-dire respectivement 0,14 m/s et 0,2 m/s. Une modélisation de ce comportement exponentiel de $U_n(t)$ est synthétisé dans le (Erreur ! Nous n'avons pas trouvé la source du renvoi. andErreur ! Nous n'avons pas trouvé la source du renvoi.) . Ces résultats obtenus pour des temps entre $t = 2\ ms$ et la valeur asymptotique, montre que le temps de décroissance est de $1{,}6\ ms$ pour $\varphi_{ch} = 0{,}7$, et $1{,}9\ ms$ pour $\varphi_{ch} = 0{,}6$. Le comportement asymptotique du cas $\varphi_{ch} = 0{,}7$ est atteint plus rapidement car l'amplitude de stratification est inférieure ($\varphi_{ig} = 1{,}2$ à $\varphi_{ch} = 0{,}7$).

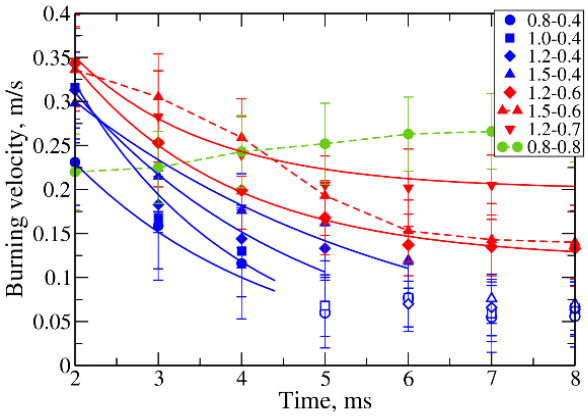

Figure 9 – Vitesse de combustion en fonction du temps : Famille A (rouge), Famille B (bleu), et cas homogène (vert) φ=0.8. Flamme éteinte (symboles creux)

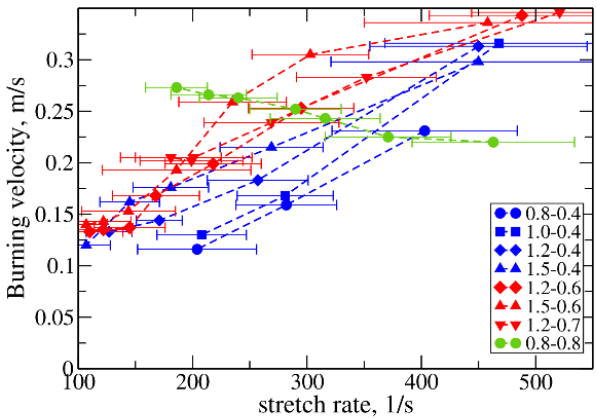

Figure 10 – Vitesse de combustion en fonction de l'étirement de la flamme

$U_n(t-2) - U_\infty = \left(U_n(2ms) - U_\infty\right)e^{-\frac{t-2}{\tau}}$				
Famille	$(\varphi_{ig} - \varphi_{ig})$	U_∞, m/s	$U_n(2\ ms)$, m/s	τ, ms
A	1,2–0,6	0,12	0,34	1,9
	1,2–0,7	0,2	0,35	1,6
B	1,5–0,4	0	0,3	4,0
	1,2–0,4	0	0,31	2,8
	1,0–0,4	0	0,32	2,0
	0,8–0,4	0	0,23	2,4

Tableau 2 – Modèle exponentiel pour la décroissance de la vitesse de combustion

Une fois le comportement asymptotique atteint (t>5 ms), une faible augmentation de U_n est observée pour $\varphi_{ch} = 0{,}7$. Cela correspond à une diminution de l'effet du stretch lorsque le rayon de courbure de la flamme augment. Pour $\varphi_{ch} = 0{,}6$, la valeur minimum de U_n est très proche de la valeur de U_n° et est en accord avec des travaux précédents (Balusamy, Cessou and Lecordier 2014). Ces comportements illustrent la compétition entre l'étirement qui tend à réduire la vitesse de combustion et l'effet positif de la stratification initiale sur la propagation en mélange pauvre. Lorsqu'une flamme est allumée dans un mélange $\varphi_{ch} = 0{,}6$, après dissipation de l'effet de l'étincelle la propagation auto-entretenue n'est plus possible à cause du trop fort niveau d'étirement par les effets de courbure. Dans le cas stratifié $\left(\varphi_{ig} = 1{,}2 \text{ à } \varphi_{ch} = 0{,}6\right)$, la flamme arrive à se propager à $\varphi_{ch} = 0{,}6$, même pour les plus petits rayons comme cela est confirmé sur les valeurs du gradient de OH (Figure 11) qui est toujours au-dessus de la limite d'extinction (17 000 u.a.). Cette observation en stratifié est liée à la compétition entre le gain produit par l'effet mémoire de stratification améliorant la combustion et la réduction de vitesse de combustion par l'étirement de la flamme. Ces observations sont faites pour des stratifications qui conduisent à des oxydations partielles de produits dans les gaz brûlés. Pour le cas $\varphi_{ig} = 1{,}5 \text{ à } \varphi_{ch} = 0{,}6$ ce phénomène est encore plus prononcé par la présence plus abondante de produits partiellement oxydés dans les gaz brûlés.

Pour les 3 cas de la Famille A, l'épaisseur de flamme δ_{LIF} présente le même comportement (Figure 12). A t=2ms, malgré la faible richesse dans les gaz frais, l'épaisseur de flamme est relativement fine et proche du minimum mesuré dans des cas homogènes proches de la stœchiométrie. Ces faibles valeurs d'épaisseur sont cohérentes avec la forte valeur de U_n. Ensuite l'épaisseur de flamme augmente progressivement pour atteindre les valeurs observées dans les cas homogènes pour des flammes à richesse $\varphi_{ch} = 0{,}6$ et 0,7 (Figure 7).

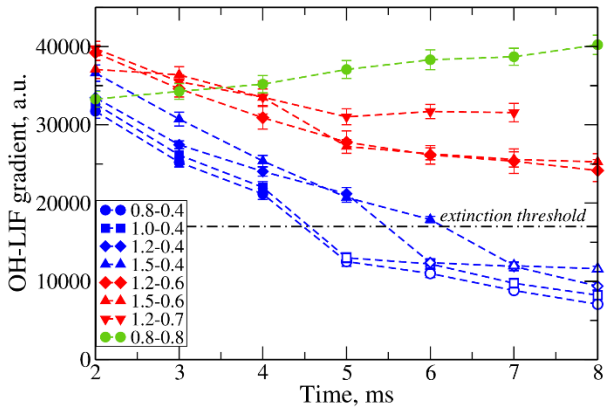

Figure 11 – Gradient de OH-PLIF en fonction du temps

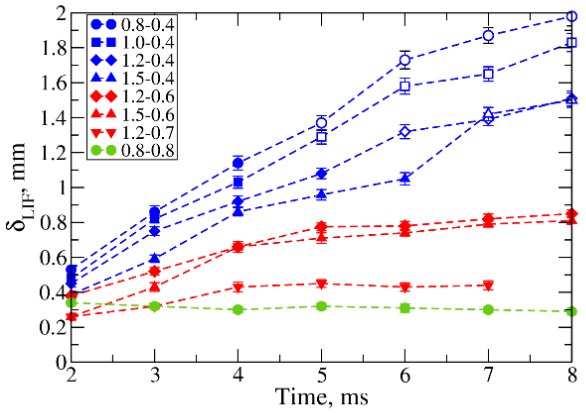

Figure 12 - Epaisseur de flamme δ_{LIF} en fonction du temps

Famille B : Propagation de flamme dans un mélange pauvre ininflammable.

Les flammes de la famille B, correspondant au cas où le mélange pauvre est en dessous de la limite d'inflammabilité, sont étudiées pour évaluer si la stratification améliore également la combustion dans ces mélanges et sur quelle échelle de temps. Dans un premier temps, nous constatons qu'à t=2 ms, le gradient de OH (Figure 11) est au-dessus du seuil d'extinction (17 000 u.a.). En fonction de l'amplitude de la stratification, la valeur du gradient décroit progressivement et l'extinction se produit à différents temps supérieurs à 4 ms et qui augmentent avec la richesse au point d'allumage. Cela indique que l'allumage dans un mélange plus riche permet de propager une flamme pendant un certain temps dans un mélange ininflammable, aussi bien dans un mélange pauvre ($\varphi_{ig} = 0{,}8$) que dans un mélange riche ($\varphi_{ig} = 1{,}5$). A 2 ms, le cas $\varphi_{ig} = 0{,}8$ à $\varphi_{ch} = 0{,}4$ a une vitesse de combustion de 23 cm/s, une vitesse proche de celle à φ_{ig}= 0,8 à $\varphi_{ch} = 0{,}8$ (Figure 9), ce qui indique de façon évidente l'amélioration de la combustion dans le mélange $\varphi_{ch} = 0{,}4$. Dans le cas $\varphi_{ig} = 0{,}8$, l'amélioration ne peut être due qu'à un effet d'augmentation de température dans les gaz brûlés qui s'estompe progressivement avant d'observer une extinction de la flamme entre 4 et 5 ms. Pour les cas φ_{ig} = 1,0 à $\varphi_{ch} = 0{,}4$, $\varphi_{ig} = 1{,}2$ à $\varphi_{ch} = 0{,}4$, et φ_{ig} =1,5 à $\varphi_{ch} = 0{,}4$, les vitesses de combustion laminaires sont sensiblement les même à l'allumage et décroissent légèrement différemment (Tableau 2) en fonction de la compétition en l'effet de l'étirement et de la stratification. Les temps les plus long correspondent aux cas où l'allumage est produit dans les zones les plus riches, ce qui indique un effet conjoint pour l'amélioration de la combustion par l'augmentation de la température et les produits partiellement oxydés des gaz brûlés. L'amélioration de la combustion est également observable par les très faibles épaisseur de flamme δ_{LIF} at 2 ms (Figure 12), proches de 500 µm. Ces valeurs sont comparables à celles obtenues pour une flamme homogène à $\varphi = 0{,}8$. Ensuite, les flammes s'épaississent pour atteindre environ 1,2 mm avant de s'éteindre. Ces résultats montrent la possibilité de propager une flamme dans un mélange ininflammable lorsque qu'elle est initialement allumée et se propage temporairement dans des milieux plus riches.

4 Conclusions

Les mesures simultanées de PIV, PLIF-OH et PLIF-anisole ont été utilisées pour étudier la propagation de flamme allumée par étincelle dans une stratification de mélange. Deux familles de flammes propane/air ont été considérées en fonction que la flamme se propage vers un milieu pauvre inflammable (Famille A - $\varphi_{ch} = 0.6$) ou ininflammable (Famille B - $\varphi_{ch} = 0.4$). Dans les deux cas nous avons pu montrer une amélioration de la combustion dans les zones pauvres, avec même une propagation temporaire même dans des mélanges ininflammables. L'effet conjoint de l'apport de produits partiellement oxydés et de l'augmentation de la température produit par la stratification a été mis en évidence en analysant les propriétés locales des flammes comme la vitesse de combustion et l'épaisseur de flamme.

Remerciements

Nous remercions l'ANR ainsi que le CNRS pour leur soutien au travers du programme ACTING-CO2, réalisé en collaboration avec le *Groupement Scientifique Moteurs* (GSM). Nous remercions également Dr Ghislain Lartigue pour son aide pour la modélisation des flammes 1D ainsi que pour les nombreuses discussions.

References

Andrews GE, Bradley D (1972) The burning velocity of methane-air mixtures. Combust Flame 19:275-288 DOI http://dx.doi.org/10.1016/S0010-2180(72)80218-9

Balusamy S, Cessou A, Lecordier B (2011) Direct measurement of local instantaneous laminar burning velocity by a new PIV algorithm. Experiments in Fluids 50:1109-1121

Balusamy S, Cessou A, Lecordier B (2014) Laminar propagation of lean premixed flames ignited in stratified mixture. Combust Flame 161:427-437 DOI http://dx.doi.org/10.1016/j.combustflame.2013.08.023

Bayley AE, Hardalupas Y, Taylor AMKP (2010) Curvature measurements of a lean partially-premixed model gas turbine combustor 15th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mech. Lisbon, Portugal,

Bradley D, Gaskell, P.H., Gu, X.J., (1996) Burning Velocities, Markstein Lengths, and Flame Quenching for Spherical Methane-Air Flames: A Computational Study. Combust Flame 104:176-198

Egolfopoulos FN, Hansen N, Ju Y, Kohse-Höinghaus K, Law CK, Qi F (2014) Advances and challenges in laminar flame experiments and implications for combustion chemistry. Progress in Energy and Combustion Science 43:36-67 DOI http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2014.04.004

Goodwin DG, Moffat HK, Speth RL (2015) Cantera: An Object-oriented Software Toolkit for Chemical Kinetics, Thermodynamics, and Transport Processes Cantera: An Object-oriented Software Toolkit for Chemical Kinetics, Thermodynamics, and Transport Processes. Version 2.2.0 edn.,

Haworth DC, Blint, R.J., Cuenot, B., Poinsot, T.J., (2000) Numerical Simulation of Turbulent Propane-Air Combustion with Nonhomogeneous Reactants. Combust Flame 121:395-417

Jerzembeck S, Peters N, Pepiot-Desjardins P, Pitsch H (2009) Laminar burning velocities at high pressure for primary reference fuels and gasoline: Experimental and numerical investigation. Combust Flame 156:292-301 DOI 10.1016/j.combustflame.2008.11.009

Jiménez C, Cuenot, B., Poinsot, T., Haworth, D., (2002) Numerical Simulation and Modeling for Lean Stratified Propane-Air Flames. Combust Flame 128:1-21

Kang T, Kyritsis DC (2007) Departure from quasi-homogeneity during laminar flame propagation in lean, compositionally stratified methane–air mixtures. Proc Comb Inst 31:1075-1083 DOI 10.1016/j.proci.2006.07.051

Marzouk YM, Ghoniem AF, Najm HN (2000) Dynamic response of strained premixed flames to equivalence ratio gradients. Proc Comb Inst 28:1859-1866 DOI 10.1016/s0082-0784(00)80589-5

Nowakowska M, Herbinet O, Dufour A, Glaude P-A (2014) Detailed kinetic study of anisole pyrolysis and oxidation to understand tar formation during biomass combustion and gasification. Combust Flame 161:1474-1488 DOI http://dx.doi.org/10.1016/j.combustflame.2013.11.024

Pires da Cruz A, Dean, A.M., Grenda, J.M., (2000) A Numerical Study of the Laminar Flame Speed of Stratified Methane/Air Flames. Proc Combust Inst 28:1925-1932

Richardson ES, Granet VE, Eyssartier A, Chen JH (2010) Effects of equivalence ratio variation on lean, stratified methane-air laminar counterflow flames. Combustion Theory and Modelling 14:775 - 792

Sadanandan R, Stöhr M, Meier W (2008) Simultaneous OH-PLIF and PIV measurements in a gas turbine model combustor. Applied Physics B 90:609-618 DOI 10.1007/s00340-007-2928-8

Sweeney M, Hochgreb S (2009) Autonomous extraction of optimal flame fronts in OH planar laser-induced fluorescence images. Appl Opt 48:3866-3877 DOI 10.1364/ao.48.003866

Zhou RG, Hochgreb S (2013) The behaviour of laminar stratified methane/air flames in counterflow. Combust Flame 160:1070-1082 DOI 10.1016/j.combustflame.2013.01.023