



**HAL**  
open science

# Etude de l'allumage dans un écoulement non prémélangé turbulent par la mesure simultanée des conditions locales et instantanées de vitesse et de fraction de mélange par PIV et par PLIF sur acétone

Céline Cardin, Gilles Godard, Gilles Cabot, Bruno Renou, Abdelkrim Boukhalfa

## ► To cite this version:

Céline Cardin, Gilles Godard, Gilles Cabot, Bruno Renou, Abdelkrim Boukhalfa. Etude de l'allumage dans un écoulement non prémélangé turbulent par la mesure simultanée des conditions locales et instantanées de vitesse et de fraction de mélange par PIV et par PLIF sur acétone. Congrès Francophone des Techniques Laser, 2012, Rouen, France. hal-02015005

**HAL Id: hal-02015005**

**<https://hal.science/hal-02015005>**

Submitted on 11 Feb 2019

**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'allumage dans un écoulement non prémélangé turbulent par la mesure simultanée des conditions locales et instantanées de vitesse et de fraction de mélange par PIV et par PLIF sur acétone

**Céline CARDIN, Gilles GODARD, Gilles CABOT, Bruno RENO, Abdelkrim BOUKHALFA**

*CNRS UMR 6614 CORIA – Université de Rouen, 76801 Saint Etienne du Rouvray cedex*

## 1 Introduction

Les mécanismes d'allumage par dépôt d'énergie dans un écoulement turbulent non prémélangé combustible/air ont été le sujet de nombreuses études [1-3], en raison des applications aéronautiques et des applications liées aux moteurs à allumage commandé. Bien que la géométrie et les conditions de fonctionnement (en terme de pression et de température) de ce type de chambre de combustion soient complexes, des études expérimentales ont été effectuées dans ce domaine [4-7]. Des études numériques ont également été menées, notamment la simulation aux grandes échelles (LES, Large Eddy Simulation) de l'allumage par étincelle dans les turbines à gaz [8, 9]. Le but de ces études a été d'améliorer les performances d'allumage en analysant les probabilités d'allumage en fonction des propriétés de l'écoulement et des différentes conditions de fonctionnement du système d'allumage. Cependant, ces recherches doivent être complétées par des études plus fondamentales présentant des géométries d'écoulement simplifiées dans lesquelles les conditions aux limites et les conditions initiales au moment du dépôt d'énergie sont connues. L'allumage par dépôt d'énergie en écoulement turbulent est donc un sujet important dans le domaine de la combustion. De nombreux articles ont été consacrés à l'étude de l'effet de différents critères (moyen d'allumage [10-12], milieu diphasique [13-15], fraction de mélange [15-19], turbulence [15, 20]) sur les phénomènes d'allumage, de la phase de dépôt d'énergie jusqu'au stade de flamme pleinement développée.

Dans les écoulements turbulents, la nature aléatoire des réussites d'allumage résulte d'un environnement caractérisé par de forts gradients et d'importantes fluctuations en terme de vitesse et de fraction de mélange [2]. En raison de ces conditions fluctuantes, l'allumage est communément étudié par une approche statistique ou probabiliste qui consiste à mesurer l'énergie minimum d'allumage (MIE, Minimum Ignition Energy) [3, 15, 20-23] ou la probabilité d'allumage pour une énergie déposée donnée [16, 24, 25] dans un écoulement dont les propriétés sont caractérisées par des valeurs moyennes et RMS. Afin d'analyser séparément les différents paramètres pouvant influencer la réussite d'un allumage, une autre approche, également utilisée dans notre étude, consiste à mesurer les valeurs locales et instantanées de vitesse et de fraction de mélange, à chaque essai d'allumage effectué à énergie déposée constante.

Dans cette étude, les mécanismes d'allumage dans des écoulements non prémélangés turbulents seront donc analysés par la mesure simultanée, à chaque essai d'allumage, des conditions locales et instantanées de vitesse et de fraction de mélange, par PIV (Particule Image Velocimetry) et par PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence) sur acétone. Ainsi, les propriétés mesurées dans l'environnement du noyau de flamme pourront être corrélées aux réussites et aux échecs d'allumage. Cette étude est menée dans un écoulement présentant une turbulence homogène et isotrope dont l'intensité de la turbulence peut varier de  $u'/U = 0$  à 34.1 %, grâce à l'utilisation de différentes grilles et de l'injecteur multi-échelles [26]. Notons que les niveaux de turbulence les plus élevés conduisent à des échelles de Kolmogorov dont le temps caractéristique est suffisamment court ( $\tau_k = 120 \mu\text{s}$  pour  $u'/U = 34.1\%$ ) pour modifier la structure du noyau de gaz chauds dès la phase d'initiation des réactions chimiques se produisant à des temps de l'ordre de 300-800  $\mu\text{s}$  [27, 28]

De plus, dans cette étude, la composition du combustible et du comburant, (méthane et air), est modifiée afin d'obtenir une fraction de mélange  $Z$  à la stœchiométrie qui n'est plus égale à 0.05

mais proche de 0.4. Cette modification permet d'avoir une dynamique de signal plus importante dans les zones proches de la stœchiométrie (limite haute et basse d'inflammabilité) ainsi que d'augmenter le signal de fluorescence émis par les zones de l'écoulement à la stœchiométrie.

La suite de l'article décrit le dispositif expérimental. Puis, les premiers résultats de cette étude seront présentés. Dans une première partie, la mesure de l'énergie d'allumage sera présentée en fonction de la fluctuation de vitesse  $u'$ , pour un écoulement prémélangé constitué du combustible et du comburant modifiés. Ces résultats constituent un cas de référence ( $Z' = 0$ ) pour l'étude de l'allumage en écoulement non prémélangé ( $Z' \neq 0$ ). Puis une seconde partie présentera les objectifs et les premiers résultats de l'étude de l'allumage en écoulement non prémélangé turbulent, par la mesure simultanée des conditions locales et instantanées de vitesse et de fraction de mélange.

## 2 Description du dispositif expérimental

Le combustible et le comburant, dont les débits sont contrôlés par des régulateurs de débit massique (Bronkhorst), sont injectés séparément dans une soufflerie verticale surmontée d'un convergent finissant par une section carrée de 8 cm de côté, qui constitue le brûleur et qui délivre un écoulement laminaire et stationnaire de vitesse égale à 4 m/s (Figure 1).

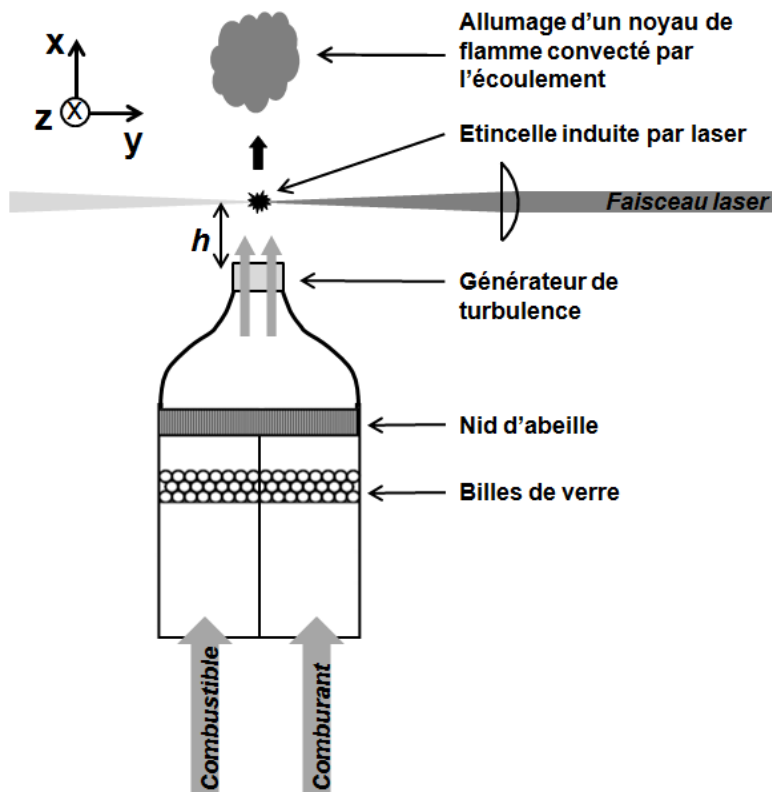


Figure 1 : Schéma de la soufflerie

Pour générer une turbulence homogène et isotrope sur une large gamme d'intensités, différents générateurs de turbulence sont placés sur le convergent. Les faibles intensités de turbulence sont générées par les grilles B, E et F, dont les principales caractéristiques sont présentées dans le Tableau 1 ( $M$  et  $\sigma$  sont respectivement la taille de maille et le rapport de blocage). Les grilles E et F sont des plaques perforées avec un diamètre de trou égal à  $D$ , tandis que la grille B est composée de tiges rondes de diamètre 2 mm. Les fortes intensités de turbulence sont générées par l'injecteur multi-échelles (MuSIG, Multi-Scale Injection Grid [26]) qui est constitué de trois plaques perforées placées successivement dans l'écoulement et dont les propriétés sont reportées dans le Tableau 1. L'espacement entre les plaques  $j$  et  $j + 1$  est  $L_j = 3.5M_j$ .

	M (mm)	$\sigma$ (%)	D (mm)
Grid B	5	64	/
Grid E	8	69	5
Grid F	13	56	10
plate 1	4	49	3
MuSIG  plate 2	9	60	6
plate 3	24.7	67	15

Tableau 1 : Caractéristiques des différents générateurs de turbulence.

Les propriétés de la turbulence sont reportées dans le Tableau 2 en fonction de la hauteur  $h$  au-dessus des grilles (B, E ou F) ou au-dessus de la dernière grille de l'injecteur Multi-Echelles (MuSIG).

	h (mm)	U (m/s)	$u'$ (m/s)	$r$	$L_i$ (mm)	$\eta_k$ ( $\mu\text{m}$ )
MuSIG	60	6.71	2.05	1.21	4.90	49
	70	6.01	1.71	1.19	4.96	52
	80	5.52	1.43	1.18	5.21	56
	90	5.18	1.21	1.16	5.58	62
	100	4.95	1.05	1.15	6.02	69
	120	4.71	0.83	1.14	7.00	81
	144	4.57	0.68	1.13	8.10	92
	164	4.46	0.60	1.12	8.87	99
Grid F	80	3.59	0.57	1.07	4.32	97
	100	3.59	0.44	0.99	5.06	124
	140	3.59	0.31	0.93	6.17	168
Grid E	140	3.14	0.21	0.92	6.35	224
Grid B	136	3.75	0.14	1.04	5.68	299

Tableau 2 : Propriétés de la turbulence générées par les grilles B, E, F et par MuSIG

Les propriétés de la turbulence ont été obtenues par Anémométrie Doppler Laser (3 composantes) dont les résultats détaillés sont reportés dans l'article [26] pour le MuSIG et dans l'article [29] pour les grilles B, E, F. Le rapport global d'isotropie est définie par  $r = u' / v'$ , où  $u'$  et  $v'$  sont les vitesses RMS calculées dans les directions axiale ( $x$ ) et transversale ( $y$ ), respectivement. La vitesse moyenne axiale  $U$ , l'échelle intégrale  $L_i$ , l'échelle de Kolmogorov  $\eta_k$  sont également données dans le Tableau 2, en fonction de  $h$ . Ainsi, en effectuant des essais d'allumage dans les conditions de turbulence reportées dans le Tableau 2, les phénomènes d'initiation du noyau de flamme peuvent être étudiés dans une large gamme d'intensités de turbulence  $u'/U$ , variant de 3.7% à 34.2%, avec un très bon rapport global d'isotropie.

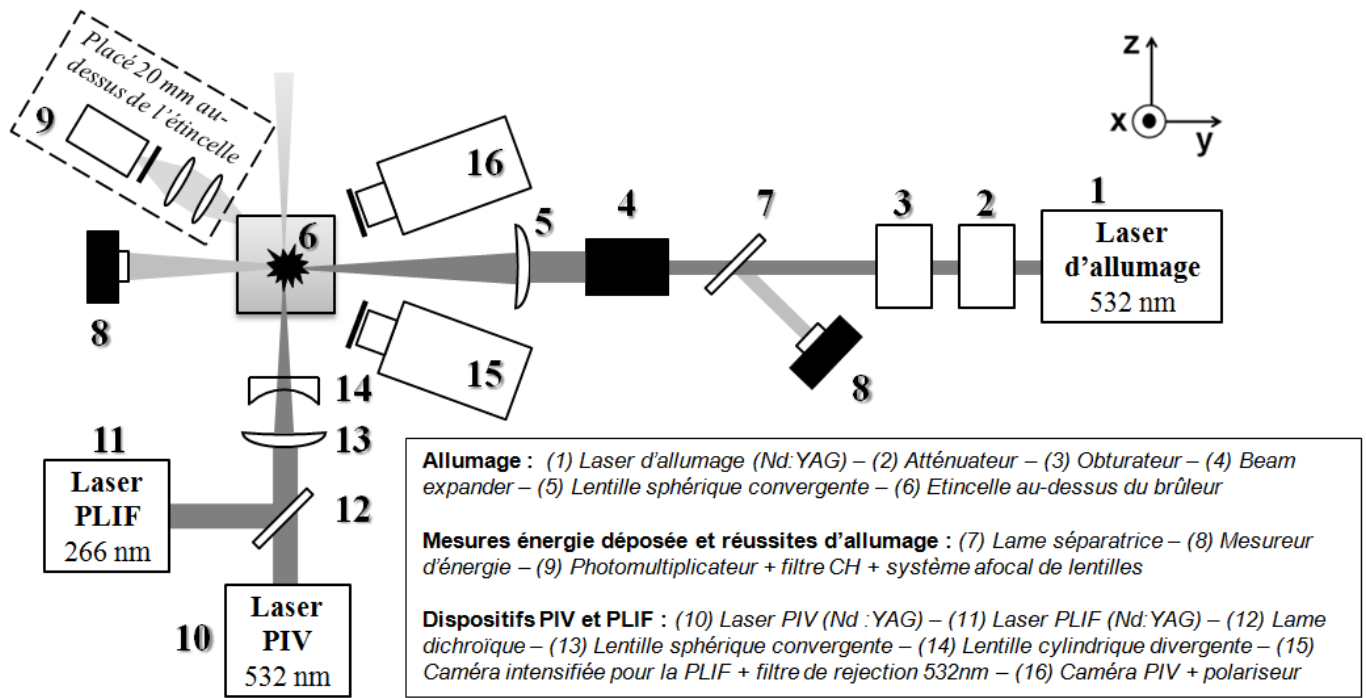


Figure 2 – Dispositif de mesure et d'allumage (vue de dessus)

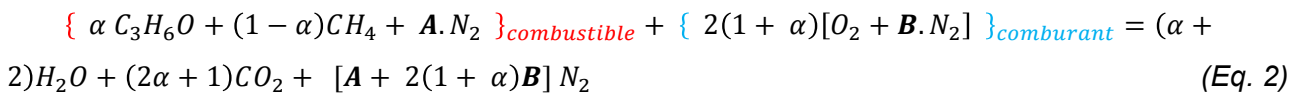
Le dispositif d'allumage est présenté sur la Figure 2 (n°1-6). Les essais d'allumage sont effectués par étincelles induites par laser, obtenues grâce à une lentille sphérique convergente ( $f = 200$  mm) qui focalise au-dessus du brûleur un faisceau généré par un laser Nd:YAG (Quanta-Ray Pro, Spectra-Physics), de longueur d'onde égale à 532 nm et pulsé à une fréquence de 10 Hz. Le faisceau, présentant un diamètre de 10 mm, une durée de pulse de 8 ns et une divergence de 0.5 mrad, est élargi par un beam expander. En amont, un atténuateur et un obturbateur sont utilisés pour pouvoir modifier l'énergie (grâce à une lame séparatrice rotative) et la fréquence du pulse (grâce à un miroir rotatif), sans changer les réglages du laser.

A chaque essai d'allumage, l'énergie déposée dans l'écoulement est mesurée grâce à un système (n°7-8, Fig.2) constitué d'une lame séparatrice (Melles Griot, 16 BPB153-523-532nm) et de deux mesureurs d'énergie (Ophir, PE25-DIF). Afin de déterminer la réussite ou l'échec d'un allumage, l'intensité lumineuse émise par la flamme est collectée 20 mm au-dessus de l'étincelle, par un ensemble (n°9, Fig.2) constitué d'un système afocal de deux lentilles, d'un filtre CH\* et d'un photomultiplicateur (Hamamatsu, 6780-20) ayant un pinhole de 1 mm de diamètre. Le passage du noyau de flamme devant le photomultiplicateur est observé environ 5 ms après le début de l'allumage.

A chaque essai d'allumage, un dispositif de PIV et de PLIF sur acétone permet de mesurer simultanément les champs de vitesse et de fraction de mélange (n°10-16, Fig.1) dans la zone d'allumage, 400  $\mu$ s après le déclenchement du laser d'allumage. Ce temps est de l'ordre de grandeur du temps où les réactions chimiques sont initiées dans le noyau de gaz chaud résultant de l'étincelle. Les lasers pour la PIV (Quantel, Big Sky Laser Ultra) et la PLIF (Spectra Physics, Quanta Ray, PIV 200) délivrent un faisceau pulsé à 10 Hz et de longueur d'onde respectivement égale à 532 et 266 nm. Les nappes laser sont obtenues grâce au passage des faisceaux par une lentille sphérique convergente ( $f = 1500$  mm) suivie d'une lentille cylindrique divergente ( $f = -40$  mm). Un miroir situé à la sortie de chaque laser (non représenté sur la Fig. 2) et une lame dichroïque (Melles Griot, BSR - 21 - 5010M) permettent de régler la superposition des deux nappes laser. La caméra pour la PIV (Lavision, Imager ProX 4M – 2000x2000 pixels<sup>2</sup>), munie d'une monture Scheimpflug, d'un objectif (Nikon, Nikkor 85 mm, f/1.4), d'un filtre interférentiel et d'un polariseur, permet d'enregistrer deux images successives de l'écoulement ensemencé de

gouttes d'huile DEHS et éclairé par la nappe laser à 532 nm. La caméra intensifiée (Roper Scientific PIMAX – GENII 512x512 pixels<sup>2</sup>) utilisée pour la mesure de PLIF est également installée sur une monture Scheimpflug et est munie d'un objectif (Nikon, Nikkor 50 mm, f/1.2) et d'un filtre de réjection 532 nm. Elle enregistre le signal de fluorescence émis par l'acétone vaporisée dans l'écoulement de combustible.

Enfin, les écoulements de combustible et de comburant, initialement constitués de méthane et d'air (Equation 1), ont été modifiés. Afin d'enregistrer le champ de fraction de mélange par PLIF sur acétone, une fraction volumique  $\alpha$  du méthane a été remplacée par de l'acétone (Equation 2). De plus, pour augmenter le signal de fluorescence dans les zones de l'écoulement proches de la stœchiométrie, la composition du combustible et du comburant a été modifiée. Une portion de l'azote, contenue dans l'air constituant le comburant, a été déplacée dans l'écoulement de combustible (Equation 2), de manière à obtenir une fraction de mélange à la stœchiométrie  $Z_{st}$  qui n'est plus égale à 0.05 (écoulement CH<sub>4</sub>/air), mais à 0.4. Le calcul des coefficients  $A$  et  $B$  (Equation 2) a été effectué en fixant la valeur de  $Z_{st}$  à 0.4 et en imposant la quantité totale d'azote (dans le combustible et le comburant) identique à la quantité que l'on aurait avec un combustible constitué de CH<sub>4</sub>/acétone et un comburant constitué d'air, c'est-à-dire :  $2(1+\alpha)3.78 = A+2(1+\alpha)B$ . Pour  $\alpha = 12\%$  et  $Z_{st} = 0.4$ , nous avons obtenu  $A = 3.960$  et  $B = 2.012$ .



Ce combustible et ce comburant modifiés permettent ainsi d'avoir un signal de fluorescence plus élevé à la stœchiométrie ( $Z_{st} = 0.4$ ), le signal de fluorescence étant maximum lorsque  $Z = 1$  et minimum lorsque  $Z = 0$ . Cette modification permet également d'avoir une dynamique de signal plus importante dans les zones proches de la stœchiométrie. Les propriétés de flamme (vitesse de flamme) pour ces nouveaux carburant et comburants sont en cours d'étude dans une chambre à volume constant, et les premiers résultats indiquent que la vitesse de flamme à la stœchiométrie reste très proche de celle obtenue pour le mélange stœchiométrique méthane/air.

### 3 Résultats

#### 3.1 Etude préliminaire en écoulement prémélangé

L'étude des mécanismes d'allumage pour différents niveaux de turbulence a été effectuée dans une étude précédente [28] pour un écoulement prémélangé méthane/air. La MIE (Minimum Ignition Energy) a été mesurée en fonction de la vitesse RMS ( $u'$ ). Ces mesures ont mises en évidence un phénomène de transition d'allumage, correspondant d'abord à une croissance progressive de la MIE en fonction de  $u'$ , puis, à partir d'un certain seuil de turbulence, à une forte augmentation de la MIE en fonction de  $u'$ . L'analyse des images du noyau de flamme enregistrées à différents instants après le dépôt d'énergie (du refroidissement du plasma à l'initiation d'une flamme auto-entretenu) a permis d'expliquer ce phénomène de transition en comparant les échelles de temps caractéristiques de la turbulence et le temps d'initiation des réactions chimiques. Avant la transition d'allumage, l'interaction entre le noyau de gaz chauds et la turbulence débute après l'initiation des réactions chimiques, conduisant ainsi à un noyau de flamme semblable à un noyau laminaire; la quantité d'énergie déposée nécessaire pour initier les réactions chimiques est donc comparable à celle requise dans des conditions laminaires. Après la transition d'allumage, la turbulence est suffisamment forte pour que les petites échelles de la turbulence soient capables d'affecter et d'interagir avec le noyau de gaz chaud (pendant le refroidissement du plasma) avant l'initiation des réactions chimiques. La dissipation supplémentaire (dissipation turbulente) qui agit ainsi sur le noyau de gaz chauds est à l'origine de l'importante quantité d'énergie nécessaire pour atteindre une flamme auto-entretenu.

Par conséquent, cette étude antérieure nous a permis d'étudier l'effet des fluctuations de vitesse sur les mécanismes d'allumage en écoulement prémélangé ( $Z' = 0$ ). Dans l'étude actuelle, nous souhaiterions ajouter à l'analyse des mécanismes d'initiation de la flamme, l'effet des fluctuations de la fraction de mélange  $Z'$  sur le phénomène de transition d'allumage. L'étude

antérieure ayant été réalisée pour un écoulement prémélangé méthane/air, la mesure de la MIE en fonction de  $u'$  doit être de nouveau effectuée, pour un prémélange constitué des nouveaux combustible et comburant définis dans la partie précédente. Cette nouvelle série de mesure en prémélangé constituera ainsi le cas de référence ( $Z' = 0$ ) pour l'étude de l'allumage en écoulement non prémélangé.

La Figure 3 reporte la MIE (énergie déposée conduisant à 50% d'allumages réussis [30]) en fonction de  $u'$ , mesurée pour un prémélange de richesse  $\Phi = 0.55$ . Le phénomène de transition d'allumage décrit ci-dessus est également observé pour ce nouveau prémélange.

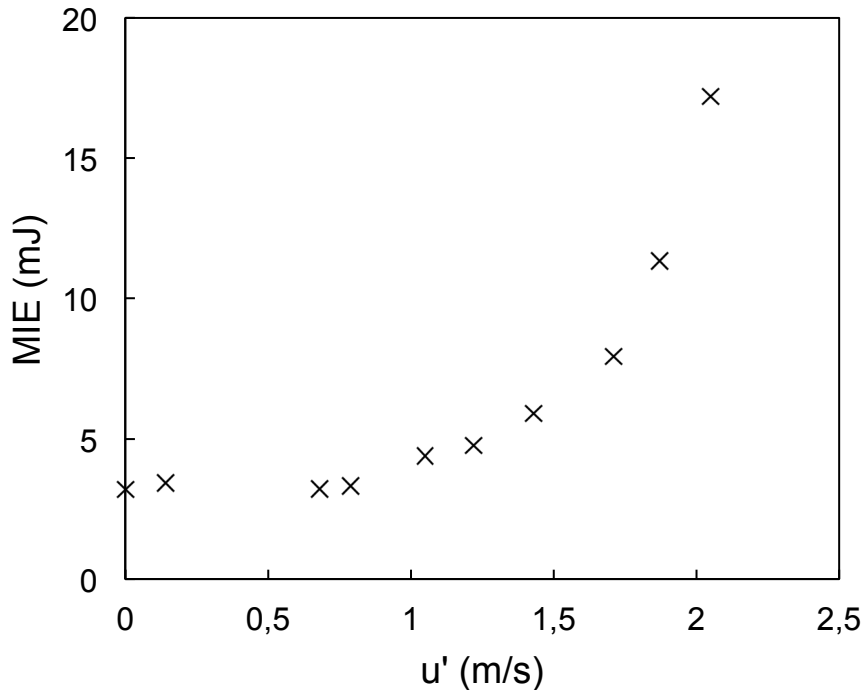


Figure 3 – Mesure de l'énergie minimum d'allumage (MIE) en fonction de  $u'$  pour un écoulement prémélangé de richesse  $\Phi = 0.55$  (la composition du combustible et du comburant sont donnés dans la partie 2.)

### 3.2 Etude en écoulement non prémélangé

L'allumage en écoulement turbulent non prémélangé sera étudié pour des valeurs de  $Z_{moy}$  correspondant à la valeur de la richesse pour laquelle l'étude précédente (en prémélangé) a été réalisée. Ainsi, on obtient  $Z_{moy} = 0.27$  pour  $\Phi = 0.55$ , d'après l'Equation 3 donnant la relation entre la richesse  $\Phi$ , la fraction de mélange  $Z$  et le rapport de la masse de comburant ( $m_O$ ) sur la masse de combustible ( $m_F$ ) à la stœchiométrie. L'étincelle laser sera donc positionnée dans la zone de l'écoulement où la moyenne de la fraction de mélange est égale à cette valeur.

$$Z = 1 / \left[ 1 + \frac{1}{\Phi} \left( \frac{m_O}{m_F} \right)_{stoech} \right] \quad (Eq. 3)$$

Cette étude a débutée par la caractérisation des champs de fraction de mélange et de vitesse, de l'écoulement laminaire et des écoulements obtenus à partir des différents générateurs de turbulence. La Figure 4 présente la mesure des champs instantanés et moyens de fraction de mélange obtenus pour le cas laminaire (Fig.4.a,b) et pour le cas le plus turbulent (injecteur multi-échelles (MuSIG), Fig.4.c,d,e). Ces mesures montrent que la turbulence modifie l'épaisseur de la zone de mélange entre le combustible et le comburant. Ainsi, pour une valeur donnée de  $Z_{moy}$ , les différentes conditions de turbulence permettront d'étudier l'allumage pour différentes valeurs de la fluctuation de la fraction de mélange  $Z'$ .

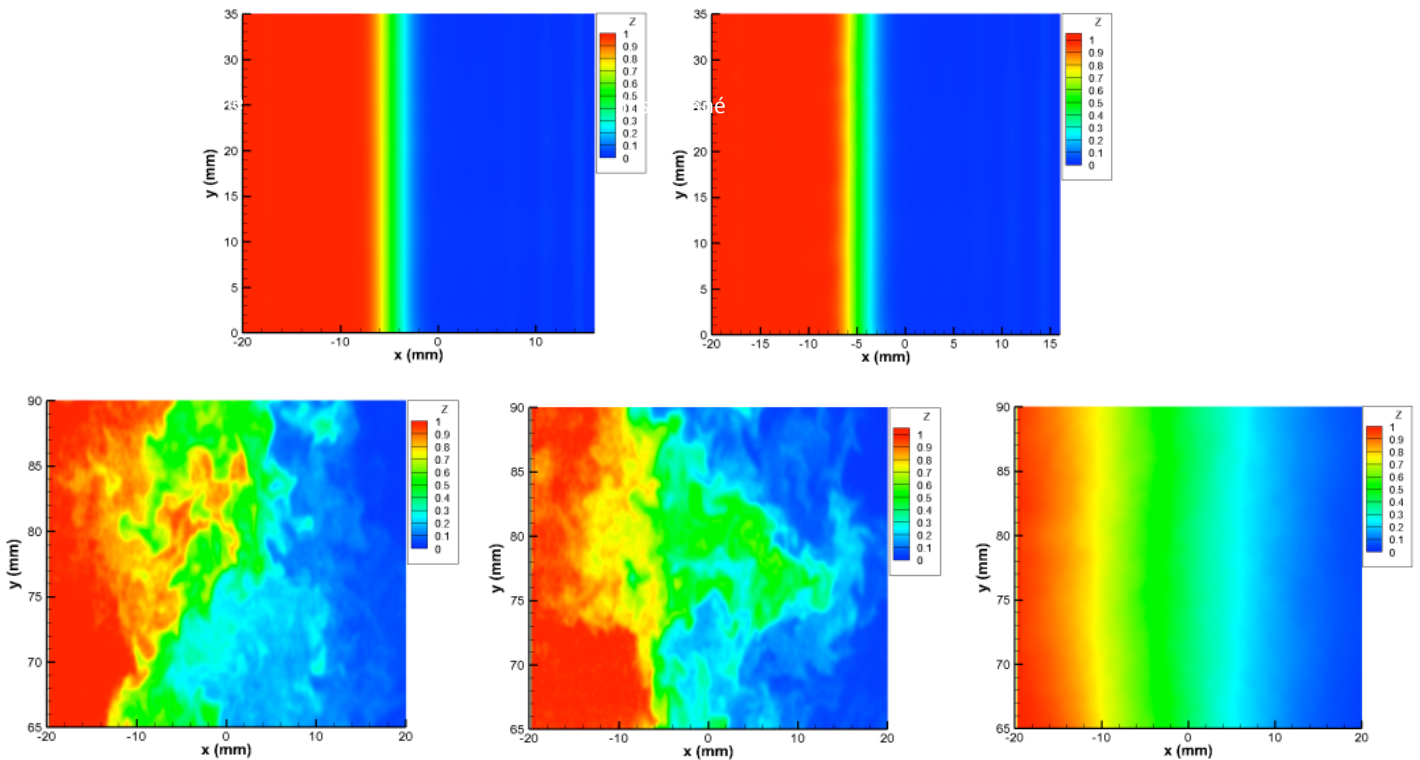


Figure 4 – Mesure des champs de fraction de mélange. (a,b) écoulement laminaire – (c,d,e) écoulement fortement turbulent ( $65 \text{ mm} < y < 90 \text{ mm} \rightarrow 29.5 \% < u'/U < 23.5 \%$ )

Ainsi, dans la suite de cette étude, les mécanismes d'allumage en écoulement non prémélangé turbulent seront analysés par la mesure simultanée, à chaque essai d'allumage, des conditions locales et instantanées de vitesse et de fraction de mélange, par PIV et par PLIF sur acétone. L'analyse des données mesurées en écoulement non prémélangé est actuellement en cours et permettra d'étudier l'influence des fluctuations de fraction de mélange et de vitesse sur les mécanismes d'allumage, venant ainsi approfondir les résultats apportés par l'étude précédente effectuée en écoulement prémélangé [28].

## Références

- [1] Lewis, B. and G. Von Elbe, *Combustion Flames and Explosions of Gases*. 1987: Academic Press.
- [2] Mastorakos, E., *Progress in Energy and Combustion Science*, 2009. 35(1): p. 57-97.
- [3] Ballal, D.R. and A.H. Lefebvre, *Proceedings of the Royal Society of London Series A*, 1977. 357: p. 163-181.
- [4] Xiong, T.-y., Z.-x. Huang, and Y.-z. Wang, *ASME*, 1981(81 -GT-49).
- [5] Naegeli, D.W. and L.G. Dodge, *Combustion Science and Technology*, 1991. 80(4-6): p. 164-184.
- [6] Moesl, K.G., et al., *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2009. 131(2): p. 021501-8.
- [7] Read, R.W., J.W. Rogerson, and S. Hochgreb, *AIAA Journal*, 2010: p. 1919-1927.
- [8] Boileau, M., et al., *Combustion and Flame*, 2008. 154(1-2): p. 2-22.
- [9] Jones, W.P. and A. Tyliczszak, *Flow, Turbulence and Combustion*, 2010. 85(3-4): p. 711-734.
- [10] Letty, C., et al., *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2010. 34(3): p. 338-345.
- [11] Grisch, F., et al., *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 2011. 225(11-12): p. 1193-1205.
- [12] Eisazadeh-Far, K., et al., *Combustion and Flame*, 2010. 157: p. 2211-2221.
- [13] Marchione, T., S.F. Ahmed, and E. Mastorakos, *Combustion and Flame*, 2009. 156(1): p. 166-180.
- [14] Neophytou, A., E.S. Richardson, and E. Mastorakos, *Combustion and Flame*, 2012. 159(4): p. 1503-1522.
- [15] Ballal, D.R. and A.H. Lefebvre, *Proc. Combust. Inst.*, 1975. 15(1): p. 1473-1481.
- [16] Ahmed, S.F., et al., *Combustion and Flame*, 2007. 151(1-2): p. 366-385.
- [17] Chakraborty, N. and E. Mastorakos, *Flow, Turbulence and Combustion*, 2008. 80(2): p. 155-186.



- [18] Chakraborty, N., E. Mastorakos, and R.S. Cant, *Combustion Science and Technology*, 2007. 179(1-2): p. 293-317.
- [19] Srivastava, D.K., K. Dharamshi, and A.K. Agarwal, *Opt. Laser Eng.*, 2011. 49: p. 1201-1209.
- [20] Shy, S.S., C.C. Liu, and W.T. Shih, *Combustion and Flame*, 2010. 157(2): p. 341-350.
- [21] Ballal, D.R., Lefebvre, A.H., *Symposium (International) on Combustion*, 1977. 16(1): p. 1689-1698.
- [22] Huang, C.C., et al., *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007. 31(1): p. 1401-1409.
- [23] Shy, S.S., W.T. Shih, and C.C. Liu, *Combust. Sci. Technol.*, 2008. 180: p. 1735-1747.
- [24] Ahmed, S.F. and E. Mastorakos, *Combustion and Flame*, 2006. 146(1-2): p. 215-231.
- [25] Ahmed, S.F., R. Balachandran, and E. Mastorakos, *Proc. Combust. Inst.*, 2007. 31: p. 1507-1513.
- [26] Mazellier, N., L. Danaïla, and B. Renou, *J. Turbul.*, 2010. 11: p. N43.
- [27] Beduneau, J.L., et al., *Combustion and Flame*, 2009. 156(3): p. 642-656.
- [28] Cardin, C., et al., *Combustion and Flame*, 2012. Submitted.
- [29] Renou, B. and A. Boukhalfa, *Combustion Science and Technology*, 2001. 162(1-6): p. 347-370.
- [30] Ziegler, G.F.W., Wagner, E.P., Maly, R.R., *Proc. Combust. Inst.*, 1984. 20: p. 1817-1824.