

Mesures de vitesse par PIV dans une flamme de paroi-verticale générant des suies et dominée par la flottabilité

Andres Valencia, Martine Talbaut, Bertrand Lecordier, Alexis Coppalle

▶ **To cite this version:**

Andres Valencia, Martine Talbaut, Bertrand Lecordier, Alexis Coppalle. Mesures de vitesse par PIV dans une flamme de paroi-verticale générant des suies et dominée par la flottabilité. Congrès Francophone de Techniques Laser, CFTL 2016, Sep 2016, Toulouse, France. hal-01852219

HAL Id: hal-01852219
https://hal.science/hal-01852219

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.

Mesures de vitesse par PIV dans une flamme de paroi-verticale générant des suies et dominée par la flottabilité.

Andres Valencia, Martine Talbaut, Bertrand Lecordier, Alexis Coppalle.
Laboratoire CORIA-UMR 6614, CNRS-Université et INSA de Rouen, France
valencia@coria.fr

Des mesures simultanées de vitesse par PIV et de concentration de suie par LII (Incandescence Induite par Laser) ont été réalisées sur un brûleur gaz en configuration paroi-verticale. Etant donné la conception du brûleur, la flamme a été ensemencée avec un système d'injection externe et indépendant de la ligne d'alimentation en combustible. Un fort signal parasite et cohérent a été détecté dans les images PIV pendant le traitement, influençant le calcul des vecteurs de vitesse. Des mesures de LII et de diffusion des suies (PIV sans ensemencement) ont été menées et il a été prouvé que l'origine de ce signal provient de la diffusion des poches de suie. Afin d'éliminer ce signal parasite et d'améliorer la qualité du traitement de calcul de vitesse, un prétraitement des images PIV basé sur un filtrage gaussien s'est avéré efficace, montrant ainsi une forte diminution de l'influence du signal parasite de diffusion des suies sur les signaux PIV, et une amélioration de la qualité des champs vectoriels résultants. En parallèle, les images de LII et de diffusion des particules d'ensemencement (PIV) couplées ont montré que, pour cette configuration de flamme, les particules d'ensemencement pénètrent peu dans les poches de suie. Le calcul de la vitesse a été mené avec une méthode de type prédicteur/correcteur et décalage des mailles en fraction de pixel. Les champs moyens de vitesse ont été déterminés et ont permis d'en déduire le profil transversal de la vitesse verticale normalisée à différentes hauteurs dans la flamme.

1 Introduction

Afin d'étudier la propagation d'un incendie, il est important de comprendre la propagation d'une flamme sur une paroi verticale dans laquelle les processus de dégagement de vapeurs combustibles (pyrolyse) et de dégagement de chaleur apportée par la combustion sont couplés par la convection et le rayonnement. Les flammes de paroi verticale, typiquement pilotées par la flottabilité, se caractérisent pour être dans un régime de basse vitesse et haute production de suie, représentant ainsi un danger potentiel dans le cas d'un incendie.

Expérimentalement, plusieurs travaux ont été consacrés à ce sujet : i) d'une part, une grande partie a été dédiée aux mesures de flux radiatif et total de la flamme vers la paroi et l'environnement [1, 2], ii) d'autre part, d'autres travaux ont été dédiés à l'étude du comportement dynamique des flammes de paroi verticale, motivés principalement par l'étude du transfert convectif [3, 4], ces deux sujets étant fondamentaux pour comprendre le développement et la propagation de la flamme sur un matériau solide qui se dégrade.

Récemment, le développement des nouvelles techniques de mesure in-situ basées sur des diagnostiques laser a permis la réalisation de plusieurs études concernant ces deux sujets. Au niveau du rayonnement de la flamme, Hebert et al. [5] ont utilisé pour la première fois la technique LII (Incandescence Induite par Laser) sur une flamme de paroi verticale (générée par la combustion d'une plaque de PMMA) afin de mesurer la concentration moyenne de suie. Ces mesures sont importantes pour comprendre le transfert radiatif des flammes dans cette configuration, puisque les particules de suie jouent un rôle fondamental sur le rayonnement et la propagation des flammes. Au niveau du comportement dynamique, plusieurs études par PIV (Vélocimétrie par Image des Particules) ont été menées sur des configurations de parois verticales pour des écoulements non-réactifs [6, 7]. Cependant, à notre connaissance, aucune mesure par PIV n'a été réalisée sur cette configuration pour des flammes.

Dans ce cadre, nous avons réalisé une étude sur une flamme de paroi verticale, dominée par la flottabilité et avec une forte concentration de suie. Pour se faire, des mesures simultanées de LII (Incandescence Induite par Laser) et PIV ont été réalisées afin de localiser spatialement les zones de suies dans les champs de signal PIV et d'en déduire les champs de vitesse. L'objectif de ce papier est de montrer les difficultés techniques rencontrées et liées principalement à la

configuration de la flamme, l'ensemencent et la présence des particules de suie et d'exposer les solutions adoptées lors du traitement PIV pour obtenir des champs de vitesse fiables. En plus, quelques résultats de mesures de vitesse moyenne et instantanée sont également montrés

2 Dispositifs expérimentaux

2.1 Brûleur vertical

La flamme est générée par un brûleur poreux et rectangulaire installé verticalement (figure 1) afin de générer une flamme de type paroi verticale. Les dimensions du brûleur sont 20 cm de largeur et 40 cm de longueur. Le combustible utilisé est composé d'un mélange de méthane (0.243 g/s) et d'éthylène (0.512 g/s). Une plaque métallique refroidie avec de l'eau à température ambiante est installée autour du brûleur, et une rampe alimentée avec du méthane (0.017 g/s) est installée au pied du brûleur afin de stabiliser la flamme. Ce bruleur génère une flamme stationnaire et permet l'acquisition de suffisamment de données pour réaliser des analyses statistiques fiables. L'analyse a été menée sur une large zone d'étude dans la flamme. Ce brûleur a déjà été utilisé dans plusieurs études, dont les travaux de Hébert et al. [5].

2.2 Montage expérimental LII-PIV

Le montage expérimental LII-PIV couplés est représenté sur la figure 1. Il est composé d'un seul laser, avec lequel les deux techniques ont été menées simultanément. Le laser utilisé est un Nd:Yg double-tête à 532 nm (Quantel Twins BSL), de fréquence 10 Hz, avec une durée de pulse de ~7ns. Une nappe laser gaussienne de 0.8 x 45 mm² est produite avec un montage optique composé d'un beam-expander, d'une lentille sphérique (f = -40 mm) et de deux lentilles cylindriques (f = -40 mm et f = 200 mm). Cette nappe est dirigée verticalement et perpendiculairement au brûleur à l'aide d'un miroir dichroïque. La puissance du laser a été réglée compte tenu de la réponse du signal LII à la fluence du pulse (rapport énergie-section de nappe). En effet, le signal LII ne dépend pas de la fluence du laser si on se positionne dans un intervalle de fluences, nommé la région « plateau ». Cette région dépend de plusieurs paramètres : Le profil de la nappe laser, la température et la taille des particules de suie dans la flamme, la longueur d'onde du laser et de détection, etc. Dans le cadre de cette étude, la fluence utilisée est égale à 0.25 J/cm², et correspond à la valeur recommandée par différents auteurs [8] (début du plateau). Pour la PIV, cette puissance s'est avérée appropriée afin de générer un signal de diffusion de Mie sur les particules d'ensemencement suffisamment élevé par rapport au signal d'émission propre de flamme.

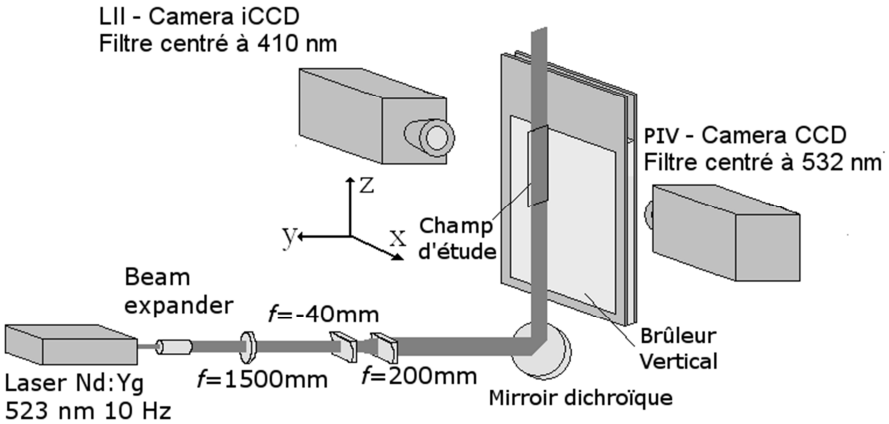


Figure 1 : Montage expérimental LII et PIV simultanés.

Une caméra CCD intensifiée (Princenton PI-MAX 4) de 1024x1024 pixels a été utilisée afin de collecter le signal d'incandescence. Un objectif de 50 mm permet l'acquisition sur un champ de mesure de 14.5 cm x 3.5 cm (direction *z* et *y* respectivement) et une résolution de 142 µm/pixel.

Afin d'éviter des interférences liées à la diffusion et l'excitation d'autres espèces, deux stratégies ont été mise en place : i) un filtre interférentiel centré sur 410 nm (FWHM = 50 nm) a été installé [8], ii) l'ouverture de la porte de la caméra a été décalée de 30 ns par rapport au pulse laser, assurant ainsi que le signal acquis soit lié uniquement à l'incandescence des particules de suie [9].

Concernant la PIV, une caméra CCD (JAI RM/TM-4200CL) avec une résolution de 2048 x 2048 pixel et équipée avec un objectif de 50 mm a été utilisée. Le champ de mesures étant identique à celui de la caméra LII, la résolution du champ PIV est 71 µm/pixel. Afin d'éviter l'acquisition de signaux parasites et atténuer l'émission propre de flamme, un filtre interférentiel centré à 532 nm (FWHM = 1 nm) a été placé devant l'objectif. Le temps entre l'ouverture des deux portes de la caméra a été fixé à 200 µs, avec une durée d'ouverture de 10 µs pour l'exposition de la première image, et de 60 µs pour la seconde, caractéristique liée directement à la cadence de la caméra.

2.3 Ensemencement

La flamme a été ensemencée avec des particules de dioxyde de zirconium ZrO_2, un matériau très utilisé dans des applications de combustion grâce à ses propriétés optiques (haute diffusion de la lumière) et thermiques (résistance aux hautes températures). Il a été impossible d'effectuer l'ensemencement directement dans la ligne d'alimentation en combustible du brûleur en raison du risque d'endommagement du poreux. C'est pourquoi un système d'ensemencement, montré dans la figure 2, a été mis en place.

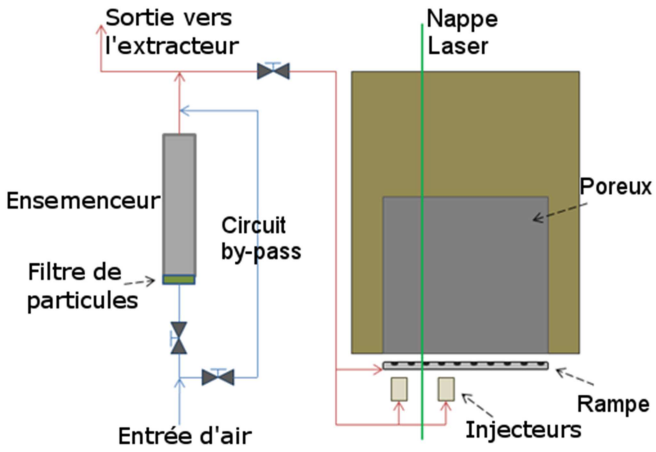


Figure 2 : Système d'ensemencement.

Les particules sont préchauffées à 120°C pendant au moins une heure avant d'être utilisées, afin d'éviter l'agglomération et assurer une bonne pulvérisation. De l'air est injecté dans l'ensemenceur pour entraîner les particules dans le circuit. Un filtre est installé dans la partie inférieure de l'ensemenceur, permettant l'entrée d'air mais empêchant la descente des particules dans le circuit d'air. Un circuit by-pass d'air a été installé afin de permettre un contrôle de la densité des particules qui sont injectées dans la flamme. L'ordre de grandeur de la vitesse dans cette flamme en régime de flottabilité (flamme de basse vitesse ~ 2 m/s) entraîne deux problèmes principaux : i) L'air porteur de particules doit être injecté dans la flamme à une vitesse d'injection V_i très inférieure à la vitesse de flamme, afin de ne pas influencer sa dynamique, ii) la vitesse de l'air dans l'ensemenceur V_e doit être suffisamment élevée pour entraîner et transporter les particules d'ensemencement dans l'écoulement. Plusieurs essais ont montré que la vitesse V_e minimale pour entrainer les particules de zirconium génère une vitesse V_i supérieure à la vitesse de flamme, changeant notablement sa dynamique. Afin de palier à cela, il faut injecter un mélange air-particules dans la flamme avec une bonne densité de particules tout en ayant une faible vitesse. Pour se faire, une partie du mélange air-particule (produit avec une vitesse d'air suffisante pour entraîner les particules) est déviée et évacuée directement par l'extracteur sans passer par le système d'injection, et l'autre partie du mélange air-particules est dirigée vers le système d'injection.

Deux injecteurs de 2 cm ont été installés de chaque côté de la nappe laser, à 15.5 cm au-dessous de la zone d'étude et séparés de 1 cm par rapport au brûleur. De plus, afin d'améliorer l'ensemencement proche-paroi, la flamme a également été ensemencée à travers la rampe disposée au niveau de la base du brûleur.

L'optimisation de la vitesse d'injection a été faite en contrôlant visuellement qu'il n'y avait pas de perturbation de flamme. La figure 3 montre deux photos de la flamme pendant une série de mesures, sans et avec ensemencement. Le débit d'injection (mesuré avec un débitmètre type Sensydine Gilibrator-2) est de 15 cm^3/s sur chaque injecteur, (ce qui correspond à une vitesse de sortie d'environ 6 cm/s) et 8 cm^3/s pour la rampe (ce qui correspond à une vitesse de sortie de l'ordre de ~25 cm/s).



Figure 3 : Gauche) Flamme sans ensemencement. (Droite) Flamme avec ensemencement. Les deux injecteurs sont encerclés, et la rampe n'est pas visible dans l'image.

3 Etude des particules de suie dans les images PIV

3.1 Signal issu des particules de suie dans les images PIV

Lors du traitement d'images PIV, la qualité du calcul de la vitesse s'est affaiblie à cause d'un signal parasite, parfois du même ordre de grandeur que le signal de diffusion des particules ZrO_2. Afin d'étudier son origine, plusieurs séries de mesures PIV/LII couplées, avec et sans ensemencement, ont été menées. Les figures 4a (ensemencée) et 4b (non ensemencé) montrent un exemple des signaux PIV et LII obtenus simultanément. Pour chaque image, les signaux PIV et LII sont acquis au même instant et dans la même zone d'étude, le signal capté pour la caméra PIV est en couleur (filtre interférentiel centré à 532 nm) et celui de la caméra LII en contour (filtre interférentiel centré à 410 nm). Les deux contrastes ont été ajustés afin de les visualiser correctement. Dans l'image ensemencée, on s'aperçoit que la zone délimitée par le contour du signal LII présente une intensité qui est du même niveau que le signal de particules d'ensemencement. Dans l'image non ensemencée, on peut observer une ressemblance dans la forme et la position des zones à fortes intensité (contour intérieur) entre les deux signaux. Plusieurs phénomènes peuvent être à l'origine de ce signal : l'incandescence, la fluorescence ou la diffusion [10] des particules de suie. Néanmoins, l'ordre de grandeur du signal de diffusion est très supérieur à celui de l'incandescence (~d_p^6 pour la diffusion et ~d_p^3 pour l'incandescence, d_p étant le diamètre de particules de suie [11]) et aussi à celui de la fluorescence (l'incandescence et fluorescence ayant le même ordre de grandeur [10]). Par conséquence, la diffusion de particules de suie est pratiquement le seul type de signal observé.

3.1 Ensemencement des poches de suie.

L'interaction suies / particules d'ensemencement (ZrO_2) a été aussi étudiée. La figure 5 montre 3 champs d'ensemencement PIV (en couleur) acquis simultanément avec le champ de suie LII correspondant (en contour). On constante que les zones avec des particules de suie sont majoritairement sans particules de ZrO_2, et ceci a été observé sur la majorité des images.

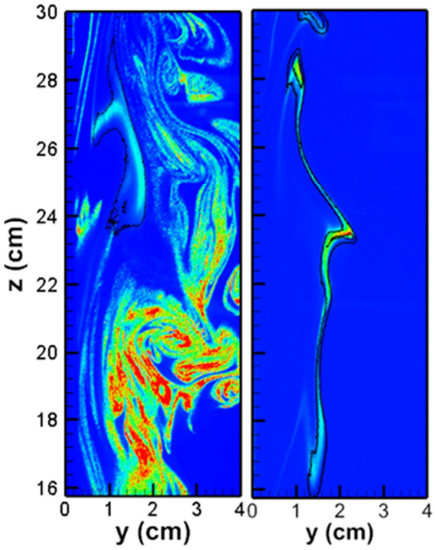


Figure 4 : Champ PIV (couleur) et LII (contour) simultanés : (Gauche) avec un champ ensemencé, (Droite) avec un champ non-ensemencé.

Les zones de particules de suie offrent donc une résistance à être ensemencés ou pénétrées par les particules de ZrO_2. Malgré cette résistance à l'ensemencement, on observe que l'ensemencement s'est réalisé sporadiquement dans les régions à la périphérie des poches de suie. Il est important de préciser que le pic de fraction volumique (ou intensité LII) se trouve toujours à l'intérieur de la poche de suie et non à la périphérie. Nous croyons que ce phénomène est lié à la force de thermophorèse à cause du gradient de température entre les poches de particules de suies chaudes et celles d'ensemencement plus froides. Plus de recherches doivent être menées sur ce sujet afin de clarifier ce comportement.

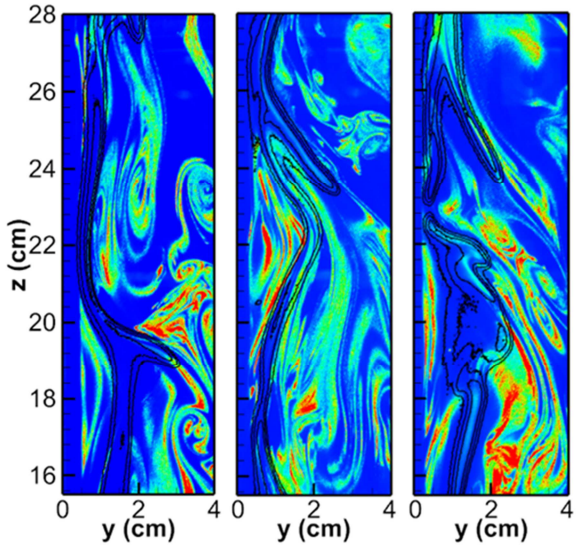


Figure 5 : Image PIV (couleur) et LII (contour) simultanés.

4 Algorithme de calcul de vitesse

4.1 Prétraitement des images PIV

En raison des phénomènes montrés précédemment, un prétraitement a été réalisé sur chaque image brute avant de procéder au calcul des champs de vitesse, l'objectif étant d'éliminer ou de diminuer le plus possible le signal diffusé par les particules de suie. Le prétraitement s'est effectué en 2 étapes : i) Filtrage de l'image brute avec un filtre gaussien passe-bas, afin de ne conserver que les variations du signal à grande échelle et ainsi « gommer » le signal des particules

d'ensemencement. ii) Soustraction de l'image brute avec l'image filtrée, afin de conserver uniquement les pics d'intensité, qui sont majoritairement dus à la diffusion des particules de ZrO_2.

Comme montré dans les figures 4 et 5, le signal de diffusion des suies est assez homogène et le filtrage gaussien n'entraîne pas de forts changements. Par contre, en ce qui concerne le signal de diffusion des particules de ZrO_2, le filtrage gaussien engendre une forte diminution et homogénéisation du signal en raison de sa plus haute fréquence. Lorsque la soustraction est faite, les variations de niveau à plus grande échelle sont éliminées et le signal des suies est donc majoritairement supprimé.

La figure 6 montre un champ de vitesse calculé avec et sans prétraitement, superposé à son champ de suie correspondant. On peut observer l'influence des phénomènes énoncés dans la section 3.1 et 3.2: I) à cause de la difficulté des particules d'ensemencement à pénétrer les zones de suie, on ne trouve que peu de vecteurs de vitesse à l'intérieur des poches. Cependant, lorsque le prétraitement est appliqué avant les calculs de vitesse, on aperçoit une augmentation du nombre de vecteurs à l'intérieur et aussi sur le contour des poches, ce qui représente une diminution de l'influence des signaux issus des suies sur les images PIV. II) Sur l'image qui n'a pas été prétraitée, on observe l'apparition de quelques vecteurs incohérents poches des zones de suie, induits par un niveau de corrélation du signal des suies supérieur à celui des particules d'ensemencement. Ce phénomène est corrigé par le filtrage, comme le montre le résultat sur la figure 6.

D'autres tests ont montré que la taille du filtre joue un rôle crucial dans la suppression du signal de suie et la qualité finale du champ vectoriel. En effet, une augmentation trop importante de la taille du filtre gaussien conduit à augmenter le résiduel du signal des suies sur les images de PIV. Après une analyse sur la dimension du filtre, un noyau de 3x3 pixels² a été retenu pour cette opération.

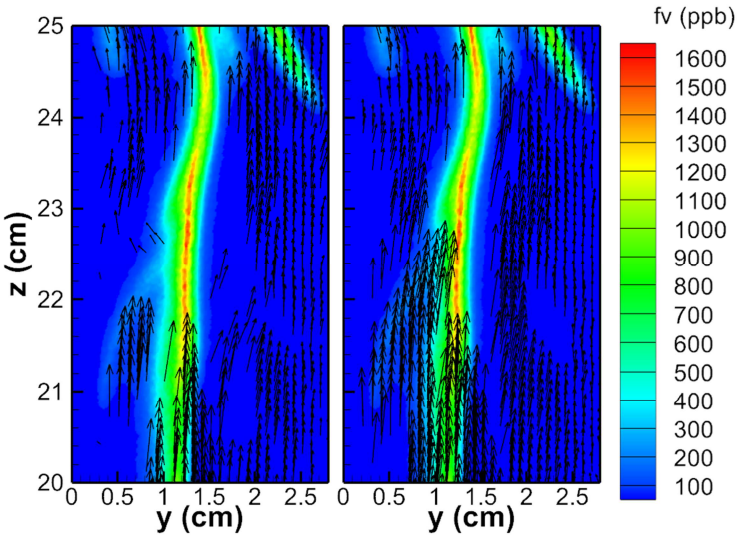


Figure 6 : Champ de vitesse et champ de fraction volumique (couleur) simultanés : (Gauche) sans prétraitement, (Droite) avec un prétraitement éliminant le signal de diffusion des suies.

4.2 Traitement des images PIV et calcul des champs de vitesse

Une fois chaque image prétraitée, les champs de vitesse sont calculés avec un algorithme de type prédicateur/correcteur, où un premier champ (prédicteur) sert comme point de départ pour calculer un deuxième plus résolu (correcteur) de manière itérative. i) Une corrélation croisée est d'abord appliquée, avec une fenêtre d'interrogation de 64x64 pixels² (0.45x0.45 cm²). Le champ de vitesse résultant est ensuite utilisé pour calculer le champ correcteur. Celui-ci est calculé avec une méthode itérative de décalage de fenêtre en fraction de pixel, où à chaque itération les fenêtres sont ré-décalées, jusqu'atteindre un déplacement résiduel inférieur à 0.05 pixels. En plus chaque fenêtre est orientée dans la direction du vecteur prédicteur afin de diminuer l'influence des gradients de vitesse sur la mesure. La taille de la fenêtre pour évaluer le champ correcteur est de 28x28 pixels² (0.2x0.2 cm²).

Ensuite trois critères sont utilisés afin de ne conserver que les vecteurs considérés comme valides : Il faut i) un rapport signal sur bruit (RSB : rapport entre les deux plus grands pics de corrélation par fenêtre) compris entre 1.2 et 5, ii) un déplacement inférieur à 22 pixels et iii) un écart médian (différence entre la valeur médian et valeur du centre de la fenêtre) inférieur ou égal à 3 pixels. Ces critères sont utilisés également pour valider le champ prédicteur avant le calcul du champ correcteur.

5 Résultats et discussions

La figure 7a montre le champ moyen de vitesse calculé à partir de 500 images instantanées. Comme attendu, le profil de vitesse suit un profil de couche limite dynamique, influencé par les forces de flottabilité. Une composante de vitesse est privilégiée (dans ce cas la vitesse verticale) avec un maximum à quelques millimètres de la paroi. Les vitesses horizontales moyennes sont presque nulles sur l'ensemble du champ de mesure, étant en moyenne deux ordres de grandeur inférieures aux vitesses verticales (vitesse horizontale $\bar{U} \approx 1$ cm/s cm/s et vitesse verticale $\bar{V} \approx 100$ cm/s). Pour une hauteur donnée, la vitesse moyenne maximale se trouve dans une position proche de *y* = 0.5 cm.

Pour des positions plus proches de la paroi, la vitesse diminuent rapidement jusqu'à atteindre une valeur nulle [3, 4]. Par contre dans les zones éloignées de la paroi, la vitesse moyenne diminue lentement, mettant en évidence un phénomène de diffusion et de dissipation de l'énergie cinétique.

La figure 7b représente le profil transversal (en fonction de y) de la vitesse verticale moyenne normalisée, pour 4 hauteurs dans la flamme. Les vitesses ont été normalisées avec le pic de vitesse moyenne ($\overline{V_m}$) pour chaque hauteur, et l'axe y a été normalisé avec l'épaisseur intégrale de la couche limite dynamique [12], définie par :

$$\delta_U = \int \frac{\bar{V}}{\overline{V_m}} dy \tag{1}$$

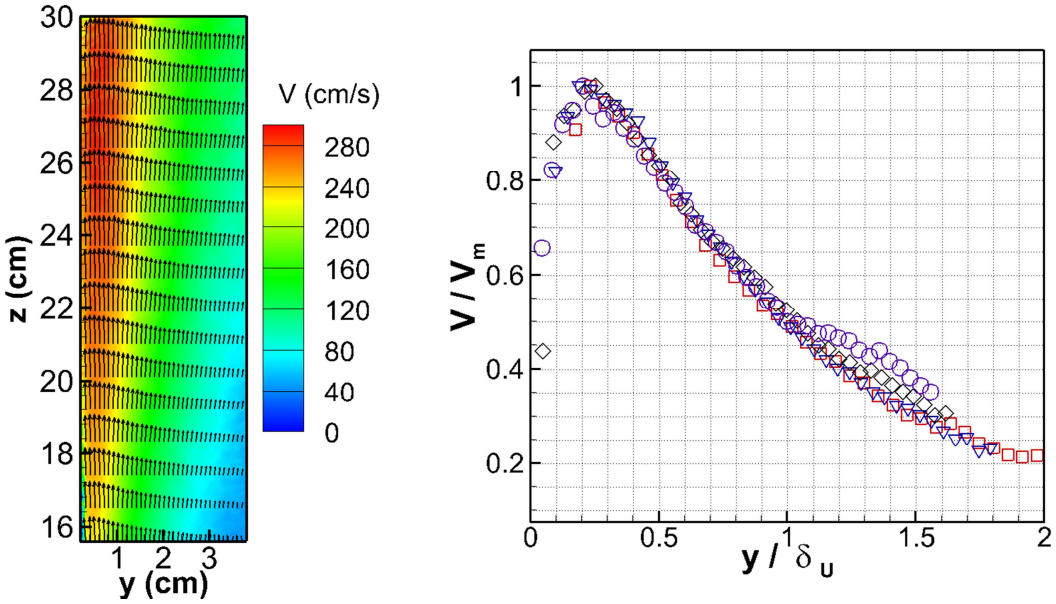


Figure 7 : a) (Gauche) Champ moyen de vitesse, b) (Droite) Profil transversal de la vitesse verticale moyenne (Grandeurs normalisés) à 4 hauteurs dans la flamme : z = 16 cm (carrés), z = 20 cm (triangles), z = 25 cm (diamants) et z = 27,8 cm (cercles).

On s'aperçoit qu'il existe une loi de similitude pour le profil horizontal de la vitesse verticale dans la longueur de la couche limite, avec un maximum de vitesse à y/δ_u = 0.2. On trouve un comportement très similaire au cas des couches limites non-réactives [12], avec la seule différence

que le maximum de la vitesse se trouve un peu plus éloigné de la paroi. Ce comportement est dû au fait qu'à la différence de la configuration paroi-chaude, le profil moyen de température de flamme de paroi-verticale n'a pas son pic maximal à la paroi mais dans la zone de réaction (à y ~ 1 cm dans notre cas), où le combustible et l'oxygène réagissent chimiquement et où se produit le dégagement de chaleur. De ce fait, le profil de température pour une flamme verticale doit être plus large et son pic plus éloigné de la paroi que dans le cas d'une paroi chaude.

6 Conclusions

Des mesures simultanées de PIV et LII ont été réalisées sur une flamme de paroi verticale. Un système d'injection externe et indépendant de la ligne d'alimentation en combustible a été utilisé afin d'ensemencer la flamme. Le signal parasite de diffusion des suies a été supprimé des images PIV avec un prétraitement basé sur un filtrage d'image, permettant ainsi une amélioration de la qualité des champs de vitesse. D'autre part, il a été montré que les zones de suie offrent une résistance à être ensemencées. Ceci pourrait être lié à la force de thermophorèse due à un gradient de température entre les particules de suie et celles d'ensemencement.

Comme résultat, le champ moyen de vitesse a été calculé montrant un profil de couche limite. Il a été montré qu'il existe une loi de similitude pour le profil horizontal de la vitesse verticale dans l'épaisseur de la couche limite. Le maximum de vitesse, à $y/\delta_u = 0.2$, se trouve plus éloigné de la paroi que pour le cas d'un écoulement de paroi non-réactive, cela s'expliquant par le fait que pour une flamme de paroi verticale la zone de réaction est à quelques millimètres de la paroi.

7 Références

[1] Ellen G. Brehob, Anil K. Kulkarni, *Experimental measurements of upward flame spread on a vertical wall with external radiation*, Fire Saf. J. 31 (1998) 181-200.

[2] G. H. Markstein, J. De Ris, *Wall-fire radiant emission-Part 2 : Radiation and heat transfer from porous-metal wall burner flames,* Proc. Combust. Inst. 24 (1992) 1747-1752.

[3] T. Ahmad, G. M. Faeth, *Turbulent wall fires*, Proc. Combust. Inst. 17 (1979) 1149-1160.

[4] Marcelo Annarumma, Laurent Audouin, Jean-Michel Most, Pierre Joulain, *Wall fire close to an horizontal surface: Numerical modelling and experimental validation*, Fire and Materials 16 (1992) 1-13.

[5] Damien Hebert, Alexis Coppalle, Martine Talbaut, *2D soot concentration and burning rate of a vertical PMMA slab using Laser-Induced Incandescence*, Proc. Combust. Inst. 34 (2013) 2575-2582.

[6] Yasuo Hattori, Toshihiro Tsuji, Yasutaka Nagano, Nobukazu Tankana, *Effects of freestream on turbulent combined-convectino boundary layer along a vertical heated plate*, Int. J. Heat Mass Transfer 22 (2001) 315-322.

[7] Yasuo Hattori, Toshihiro Tsuji, Yasutaka Nagano, Nobukazu Tanaka, *Turbulence characteristics of natural-convection boundary layer in air along a vertical plate heated at high temperatures*, Int. J. Heat Mass Transfer 27 (2006) 445-455.

[8] Schulz, B. F. Kock, M. Hofmann, H. Michelsen, S. Will, B. Bougie. R. Suntz, G. Smallwood, Appl. Phys. B 83 (2006) 333-354.

[9] C. Schoemaecker Moreau, E. Therssen, X. Mercier, J.F. Pauwels, P. Desgroux, *Two-color laser-induced incandescence and cavty ring-down spectroscopy for sensitive and quantitative imaging of soot and PAHs in flames*, Appl. Phys. B 78 (2004) 485-492.

[10] J. Yon, R. Lemaire, E. Therssen, P. Desgroux, *Examination of wavelength dependent soot optical properties of diesel and diesel/rapessed methyl ester mixture by extinction spectra analysis and LII measurements,* Appl. Phys. B 104 (2011) 253-271.

[11] Mark E. Case, David L. Hofeldt, *Soot mass concentration measurements in diesel engine exhaust using laser-induced incandescence*, Aerosol. Sci. Tech 25 (1996) 46-60.

[12] T. Tsuji, Y. Nagano, *Velocity and temperature measurements in a natural convection boundary layer along a vertical flat plate*, Exp. Therm. Fluid Sci. 2 (1989) 208-215.