

Application de la PIV sur un écoulement de fumée à un passage de porte induit par une source incendie

Amine KOCHED^{1,3}, Hugues PRETREL^{1,3}, Laurent AUDOUIN^{1,3}, Olivier VAUQUELIN^{2,3} et Fabien CANDELIER^{2,3}

¹ Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) - Laboratoire d'Expérimentation des Feux
Centre de Cadarache - Bâtiment 346 - 13115 Saint Paul Lez Durance – France

² Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels (IUSTI, UMR CNRS 6559), Aix Marseille
Université UNIMECA, Technopôle de Château-Gombert, 13453 Marseille, France

³ Laboratoire ETIC, IRSN-CNRS-UAM, 5 rue Enrico Fermi, 13453 Marseille Cedex, 13 France

1 Introduction & Objectifs

L'écoulement à un passage de porte induit par un incendie dans une enceinte confinée et ventilée est analysé expérimentalement. Cet écoulement est fortement tridimensionnel et dépendant de la ventilation de l'enceinte. Récemment, des approches CFD pour la simulation de ces écoulements se sont développées ainsi que l'acquisition de données expérimentales pour la validation des modèles numériques. Cependant, les bases de données expérimentales demeurent limitées en raison de la difficulté à mettre en œuvre des techniques de mesure avancées sur des expérimentations à grandes échelles impliquant un incendie. En outre, ces expériences doivent être réalisées à une échelle suffisamment grande, représentative d'un incendie réel, c'est-à-dire pour des foyers en régime radiatif dominant. Pour les incendies en milieu confiné et ventilé, s'ajoutent des environnements hostiles, le confinement et la présence de suies. Dans ces conditions, l'obtention de données expérimentales demeure un challenge. Les techniques optiques telles que l'imagerie des particules (i.e. PIV) sont très rarement exploitées pour l'incendie bien qu'elles offrent une mesure globale des champs de vitesses bidimensionnels et/ou tridimensionnels. En appliquant les techniques de PIV standard et de PIV stéréoscopique (i.e. SPIV) sur un écoulement au passage d'une porte, il est possible de mesurer des champs de vitesses instantanés et fluctuants. À partir de ces mesures, une analyse statistique des données permet de déterminer les grandeurs moyennes ainsi que les grandeurs turbulentes : les intensités de turbulence, les tensions de Reynolds et l'énergie cinétique turbulente. Cependant, la mise en œuvre de la PIV pour des écoulements d'incendie présente plusieurs difficultés : la maîtrise de l'ensemencement des écoulements entrant et sortant, l'influence des suies présentes en forte concentration lors d'un incendie et l'adaptation de ces techniques dans un dispositif d'essai « incendie » à grande échelle. Les premières tentatives de mesure par PIV à échelle moyenne (bac de 30cm) ont été réalisées en 1996 lors de l'étude de l'entraînement d'air dans un feu de nappe [1]. À grande échelle, deux tentatives majeures ont été menées à ce jour. Une caractérisation détaillée d'un feu de nappe de 1m de diamètre a été effectuée au laboratoire SANDIA (USA) dans les années 2000 en réalisant des mesures de vitesses par PIV et de concentrations par PLIF [2]. Plus récemment, Bryant ([3],[4]) (NIST USA) a proposé des mesures 3D de vitesses par SPIV d'un écoulement de fumée au passage d'une porte. Ces deux tentatives demeurent exploratoires en raison de la complexité de mise en œuvre de ces techniques de mesure. En continuité de ces travaux, un projet de recherche, intitulé PIVFEU, concernant l'application de la technique de mesure PIV à grande échelle pour des écoulements de fumée lors d'un incendie en milieu confiné et ventilé, a été initié dans le cadre du laboratoire de recherche commun ETIC entre l'IRSN et le laboratoire IUSTI d'Aix-Marseille Université. L'objectif de ce projet est de poursuivre les développements sur les mesures SPIV en abordant le caractère confiné et mécaniquement ventilé des locaux et en déterminant les champs moyens de vitesse et la turbulence associée sur l'écoulement de fumée au passage d'une porte.

¹ Correspondant : Amine.Koched@irsn.fr

2 Etude expérimentale

L'écoulement au passage d'une porte en convection naturelle est généré par la différence de masse volumique de part et d'autre de l'ouverture (i.e. la porte). Un écoulement de gaz principalement bidirectionnel est observé, caractérisé par des vitesses opposées et maximales en parties haute et basse du passage de porte avec une interface où la vitesse est nulle, communément appelée le plan neutre. L'écoulement de gaz sortant en partie haute se propage dans l'environnement par un panache déversant. L'écoulement entrant, en partie basse de la porte, permet de compenser la quantité de matière sortante du local (Figure 1).

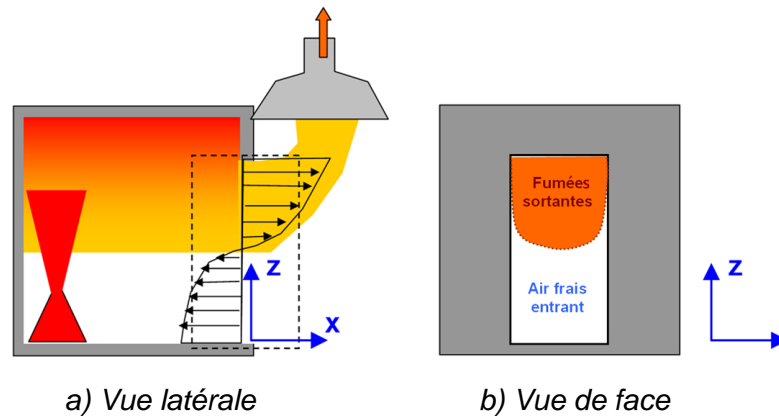


Figure 1 : Illustration de l'écoulement étudié

2.1 Le banc d'essai

Les expérimentations sont réalisées à une échelle «intermédiaire» dans un dispositif, appelé « NIX », constitué d'une pièce formée de quatre murs, d'un plancher et d'un toit. Ce volume est ouvert vers l'extérieur par un passage de porte sur une de ses faces latérales (Figure 2). Le dimensionnement du dispositif repose sur des lois de similitude assurant la bonne représentativité des phénomènes physiques pour deux configurations à grande échelle d'intérêt : les expérimentations de Bryant au niveau du passage de porte [3] et les dimensions d'un local de l'installation expérimentale DIVA de l'IRSN [4]. Les paramètres conservés sont la puissance adimensionnée Q^* (basée sur le paramètre de ventilation) et le paramètre Π défini par le rapport des pertes thermiques sur la chaleur évacuée à la porte :

$$Q^* = \frac{Q}{\sqrt{g \rho_{ref} C_p T_{ref} A_D} \sqrt{H}} \quad \text{et} \quad \Pi = \frac{h A_T}{\sqrt{g \rho_{ref} C_p A_D} \sqrt{H}} \quad (1)$$

h est le coefficient d'échange thermique équivalent des parois du local et A_D la surface d'échange (ou surface développée) des parois du local. En régime stationnaire, le coefficient h est égal à la résistance thermique du matériau ($h=k/\delta$) avec k la conductivité thermique des parois, et δ l'épaisseur de la paroi. La conservation de ce rapport permet de dimensionner la nature et l'épaisseur des parois de l'enceinte. La gamme de puissance de feux considérée par Bryant [3] est de [34-511] kW ou $Q^*=[0.017 ; 0.257]$ et une dimension de passage de porte de 0.79m*1.96m. La gamme de puissance ainsi retenue est de [2-33] kW. Le facteur d'échelle pour le dimensionnement du banc d'essai est choisi de façon à réduire la dimension du dispositif tout en assurant un écoulement turbulent ($Re>10^4$). Le facteur d'échelle retenu pour le passage de porte est de 1/3 par rapport aux dimensions d'une situation réelle (0.79m*1.96m). Le passage de porte sur le dispositif est de 0.26m de largeur et 0.65m de hauteur. Pour des raisons technologiques, le dimensionnement du volume de l'enceinte a été réduit par rapport au dispositif de Bryant et correspond à une réduction d'échelle d'environ 1/5 ($l \times L \times H=1,3m \times 1m \times 0,8m$ sur la Figure 2). Les matériaux constitutifs des parois sont choisis de façon à conserver la valeur du rapport Π de Bryant (0.057) et ainsi à avoir le même rapport entre les pertes aux parois et la puissance évacuée à la porte. Ce rapport Π fait intervenir les dimensions du local (surface d'échange totale et les dimensions du passage de porte). L'enceinte est fabriquée par assemblage de plaques de Monalite® (i.e. silicate de Calcium) avec $\rho=970 \text{ kg/m}^3$, $\lambda=0,26\text{W/m.K}$ à 600°C et pouvant supporter

une température maximale de gaz de 1000°C. Les plaques de Monalite® utilisées ont une épaisseur de 50mm pour le plancher et le plafond et 38mm pour les murs et la marche devant la porte. Un joint de silicone est mis en place lors de l'assemblage des différentes plaques de Monalite® afin d'assurer l'étanchéité de l'enceinte. En outre, le contour du passage de porte est équipé de parois transparentes permettant l'application d'un plan laser dans la section du passage de porte pour la réalisation de mesure PIV. L'ensemble de l'enceinte est monté sur un châssis métallique amovible.

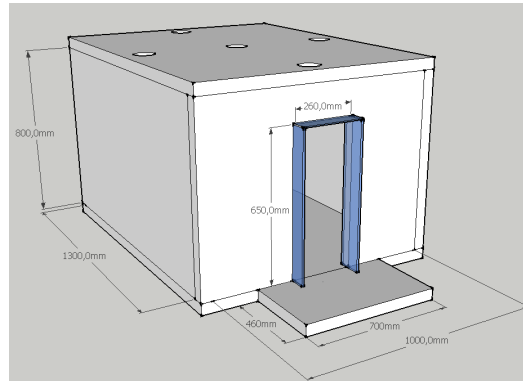


Figure 2 : Illustration du banc d'essai

La source de chaleur est générée par un brûleur à gaz placé à l'intérieur de l'enceinte. Celui-ci est un brûleur à sable de forme carrée et de dimensions 0,2m×0,2m×0,1m (0,1m d'hauteur) alimenté en gaz propane commercial et équipé d'un allumeur piloté à distance. La puissance maximale atteinte par ce brûleur est de 60kW pour un débit de propane de 25l/min. Pour cette étude, cinq puissances de feux sont retenues : 7,8kW ; 10,6kW ; 15,5kW et 20,6kW qui correspondent, respectivement, à des débits de propane de 5l/min ; 7l/min ; 10l/min et 14l/min.

2.2 L'instrumentation

Le dispositif expérimental est instrumenté afin de pouvoir mesurer la température et la vitesse de l'écoulement.

Les mesures de température sont réalisées à l'aide de thermocouples (TC) de type K de diamètre 0,25mm. Les thermocouples, au nombre de 26, sont répartis sur trois mâts : deux mâts à l'intérieur de l'enceinte équipés de 9 thermocouples et un mât à la porte équipé de 7 thermocouples. Les deux mâts internes sont positionnés à 100mm de la paroi interne de l'enceinte. Les TC fixés sur les mâts internes sont espacés de 97,5mm et les deux TC extrêmes se trouvent à 10 mm de la paroi. Les TC à la porte sont espacés de 100mm et ceux aux extrémités se trouvent à 10mm des bords supérieur et inférieur de la porte.

Les mesures de température servent de référence pour la qualification de la stratification thermique de l'enceinte d'une part et de base pour des calculs analytiques du profil de vitesse de l'écoulement au passage de porte. La mesure de température le long du passage de porte permet d'ajuster les valeurs de la densité des gaz pour le calcul des débits massiques entrant et sortant.

Des mesures de vitesse de l'écoulement sont réalisées au passage de porte par la technique SPIV. La technique de vélocimétrie par imagerie de particules (i.e. PIV) est une technique optique non intrusive de mesure de vitesse de déplacement d'un traceur présent dans l'écoulement. Le principe de cette technique est très bien décrit dans les travaux de [7] et [8]. La technique de PIV permet une description plus fine de l'écoulement au passage de porte (bidimensionnelle et/ou tridimensionnelle) par rapport aux mesures réalisées par les sondes déprimogènes de type McCaffrey. En effet, le caractère tridimensionnel de l'écoulement ne peut pas être décrit avec précision par des sondes déprimogènes intrusives, ce qui réduit considérablement les informations sur l'écoulement. Une chaîne d'acquisition PIV permettant de mesurer deux composantes de vitesse à la fois (PIV bidimensionnelle) ou trois composantes de vitesse à la fois (SPIV) est mise en place sur le dispositif expérimental. La chaîne d'acquisition par PIV se compose d'une source laser, une source de particules (traceur), des caméras pour enregistrer le déplacement du traceur, un synchroniseur entre les caméras et le laser et un PC pour piloter l'ensemble et faire le traitement des images enregistrées.

Le traceur utilisé est l'huile de silicone ($\rho = 962 \text{ kg/m}^3$; $\nu = 110 \text{ mm}^2/\text{s}$) pulvérisée en de fines particules (de diamètres compris entre 5 et $10 \mu\text{m}$) par un générateur pneumatique de particules alimenté en air comprimé à une pression de 4bar. La fumée de particules obtenue est entraînée par l'air frais entrant dans l'enceinte à travers la porte. Le point d'éclair de l'huile de silicone est d'environ 275°C (plus élevé que celui de l'huile d'olive), ce qui permet d'ensemencer des zones de l'écoulement où la température est élevée (i.e. les fumées sortantes dont la température est $\leq 285^\circ\text{C}$). La source lumineuse utilisée est un laser pulsé Nd-YAG d'une puissance de 200 mJ/pulse cadencé à une fréquence maximale de 30Hz. Ce laser refroidi à l'eau, de fabrication Laser SOLO, est commercialisé par la société TSI. Il permet de générer deux pulses laser séparés par un temps Δt fixé par l'opérateur selon la vitesse de l'écoulement. Un jeu de caméra 12bits permet d'enregistrer le déplacement des particules dans le temps. Les deux caméras ont une résolution de 11MP chacune et permettent d'enregistrer 2 paires d'images par seconde à pleine résolution chacune. L'acquisition des images est synchronisée aux pulses du laser grâce à un boîtier synchroniseur. Tout le système est piloté par le logiciel Insight4G® développé par TSI. La calibration des caméras est réalisée en utilisant une mire à deux niveaux. Pour les mesures de vitesse, la configuration retenue est schématisée sur la Figure 3. Les champs enregistrés ont une taille de $754 \text{ mm} \times 473 \text{ mm}$ avec une résolution de $3480 \text{ pixels} \times 2200 \text{ pixels}$. Le facteur d'agrandissement est égal à $219 \mu\text{m/px}$. Chaque image est subdivisée en des zones d'interrogations (ZI) carrées de taille variable allant de $128 \text{ pixels} \times 128 \text{ pixels}$ à $40 \text{ pixels} \times 40 \text{ pixels}$. Le passage entre les différentes tailles de la ZI s'effectue itérativement en 6 étapes. Un recouvrement spatial de 50% est pris en compte entre les ZI respectives d'une même paire d'images. La résolution spatiale finale des champs de vitesse est de $8,7 \text{ mm}$, ce qui permet d'obtenir un nombre total de vecteurs de 4785 par champs de vitesse mesuré.

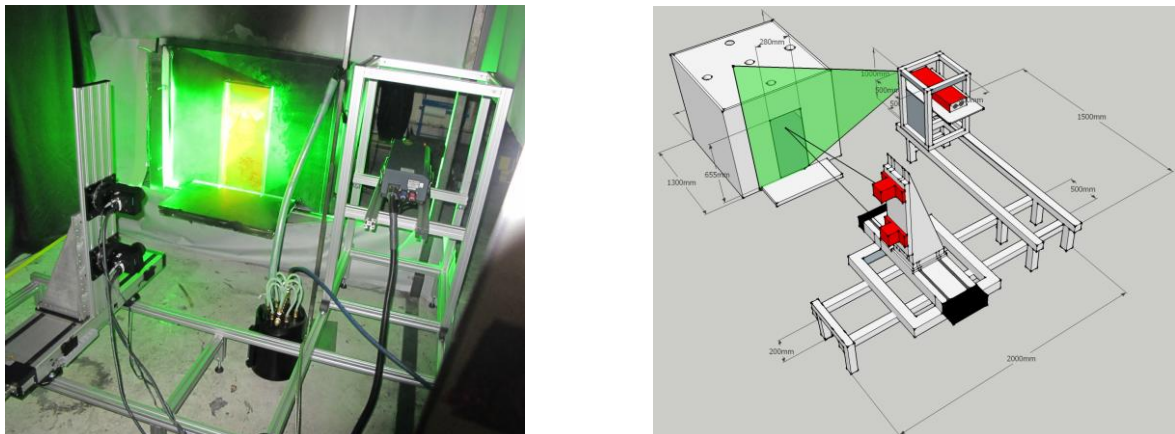


Figure 3 : Mesure de vitesse au passage d'une porte par la technique de S-PIV

2.3 Etude des grandeurs moyennes (température, vitesses)

Les résultats obtenus par les moyens conventionnels sont présentés dans un premier temps suivis des résultats obtenus par la technique de SPIV.

2.3.1 Mesures de température

Les mesures instantanées de température sur les différents mâts de TC sont représentées sur les figures ci-dessous (Figure 4 et Figure 5). Le régime stationnaire est atteint après environ 20 minutes de chauffe pour l'ensemble des puissances considérées (Figure 5a). Les profils moyens de température à l'intérieur de l'enceinte montrent que le milieu est stratifié avec la formation de deux zones : une zone basse et une zone haute où la température est plus élevée avec des profils quasi-linéaires de températures dans chaque zone (Figure 4). Les températures extrêmes enregistrées atteignent 17°C en partie basse de l'enceinte et 300°C en partie haute. Des tests de répétabilité ont montré que les fluctuations des valeurs moyennes de températures ne dépassent pas 10%. Cinq tests de répétabilité sont réalisés pour chaque puissance de feux considérée.

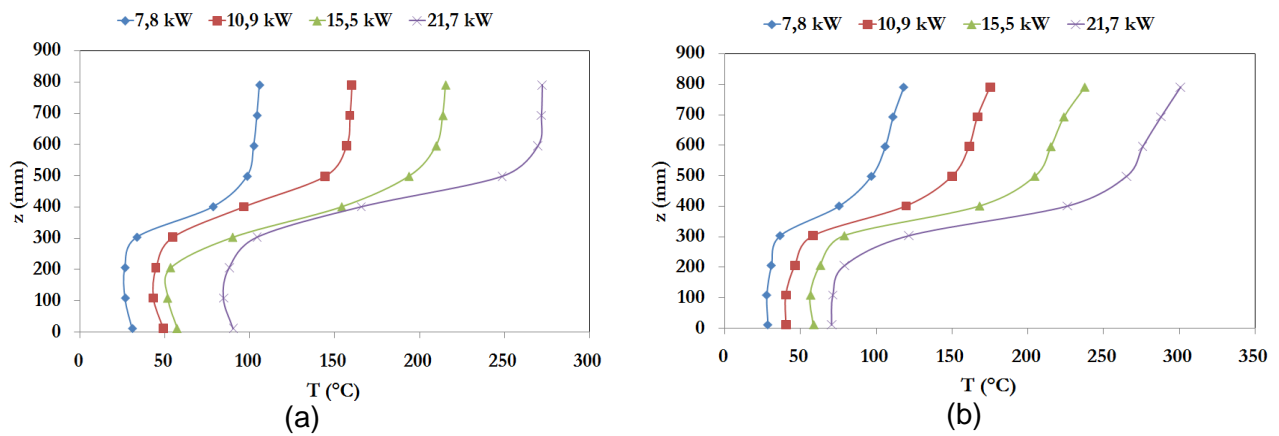


Figure 4 : Mesures de température à l'intérieur de l'enceinte NYX ; a) Mat 1 ; b) Mat 2

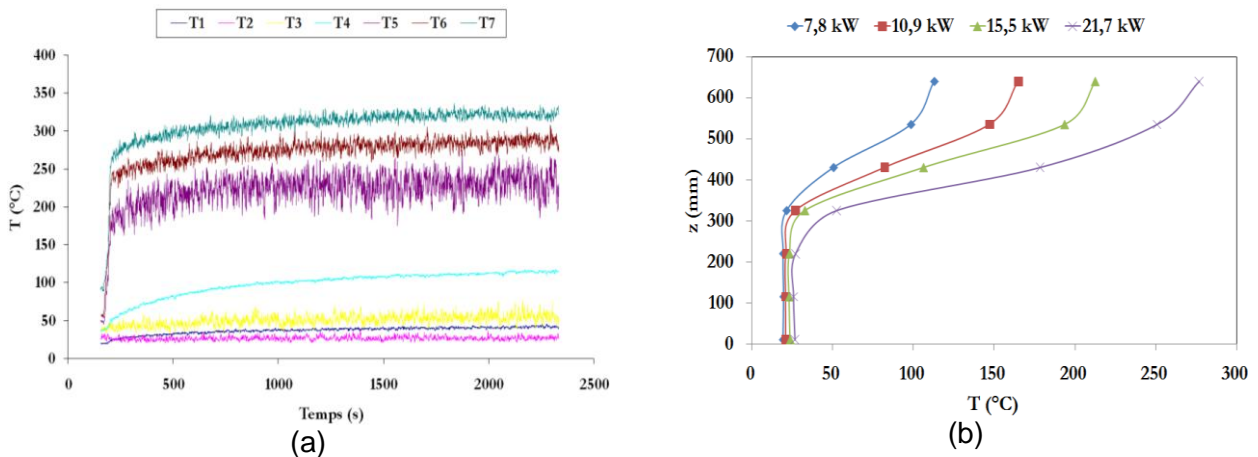


Figure 5 : Mesures de température au passage de porte.
a) Evolution instantanée ; b) Profil de température moyenne le long de la porte

2.3.2 Mesure des vitesses

La dynamique de l'écoulement est étudiée à partir des grandeurs moyennes et fluctuantes des mesures de vitesse réalisées au passage de porte. La technique de PIV est utilisée pour la mesure des champs de vitesse au passage de porte. La convergence statistique des grandeurs moyennes et turbulentes en différents points dans les champs mesurés est atteinte à partir de 800 acquisitions (Figure 6), ce qui correspond à une durée d'acquisition de 400 secondes.

Les champs de vitesse moyenne mesurés par la technique de PIV à la porte sont représentés sur la Figure 7. Ces champs représentent les isocontours de la composante de vitesse perpendiculaire au plan de la porte (i.e. la composante u). L'écoulement de fumée sortante est représenté par les valeurs positives de la vitesse. Les vitesses négatives correspondent à l'écoulement d'air frais entrant en partie basse de la porte. La vitesse maximale mesurée pour les fumées est égale à 1,45m/s et la vitesse maximale atteinte par l'air frais entrant est de 0,7m/s. La transition entre les deux écoulements se traduit par une vitesse nulle qui permet d'identifier la position et la forme du « plan » neutre qui peut être le siège de naissance de tourbillons de couche de mélange [8]. Les contours de vitesse des fumées en haut de la porte présentent des aberrations de mesures. Celles-ci sont dues à la modification de l'ensemencement des fumées dans cette zone comprenant, en plus des gouttelettes d'huile de silicone, des particules de suies générées par la source incendie. Les particules de suies présentent une taille (lumière diffuse enregistrée) comprise entre 1 et 5 pixels en moyenne et une densité proche de celle des fumées produites. Elles présentent un pouvoir réfléchissant important et possèdent les caractéristiques requises pour être utilisées comme traceur. En outre dans cette zone haute, les difficultés rencontrées consistent à maîtriser la quantité de suies produites et le dépôt de ces dernières sur les parois transparentes placées au niveau du contour de la porte. Le dépôt des suies atténue considérablement la puissance de la nappe laser ce qui pénalise ainsi l'estimation de la vitesse de déplacement des fumées.

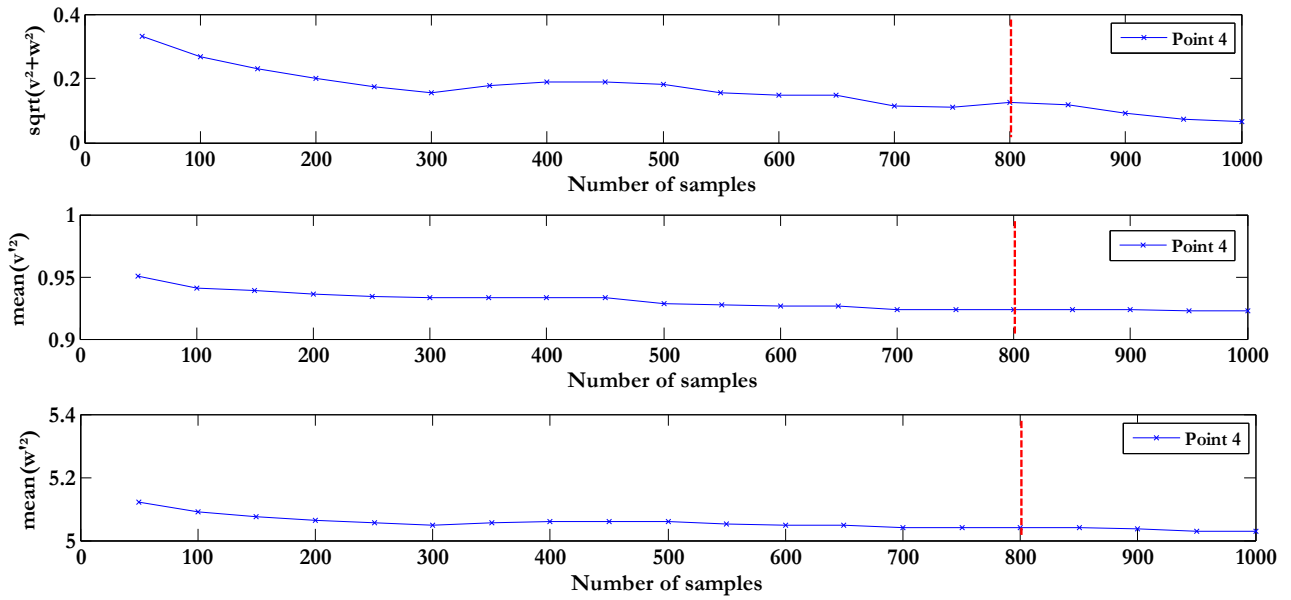


Figure 6 : Exemple de convergence statistique des grandeurs moyennes et des grandeurs turbulentes en un point ($P=7,8\text{kW}$)

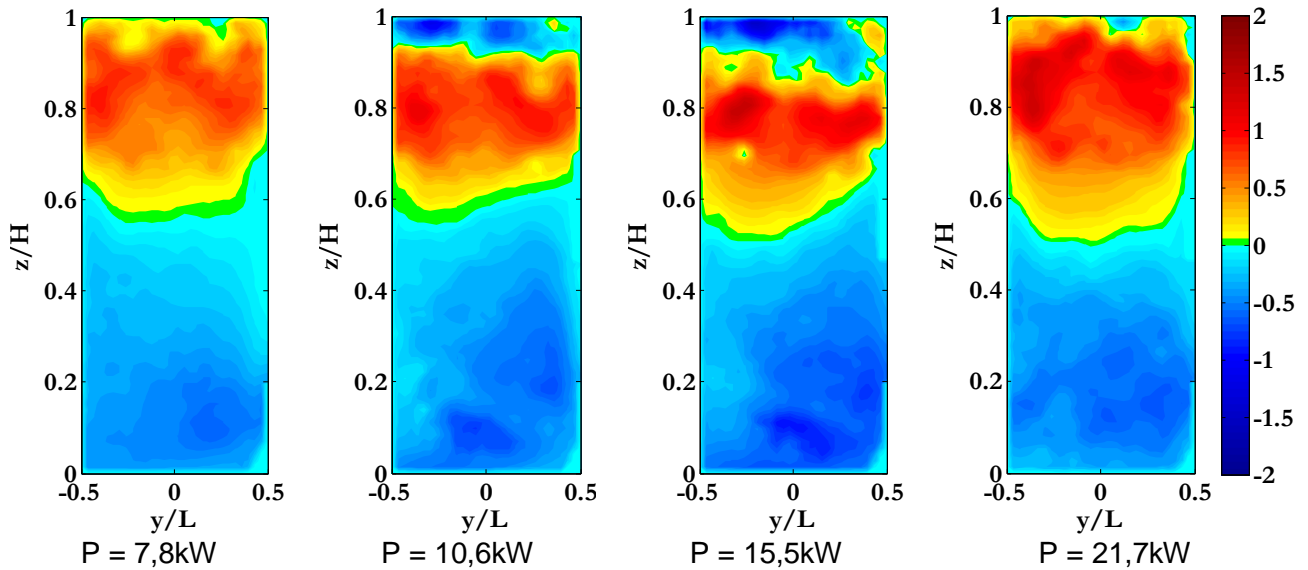


Figure 7 : Isocontours de la vitesse moyenne au passage de porte pour différentes puissances de feu

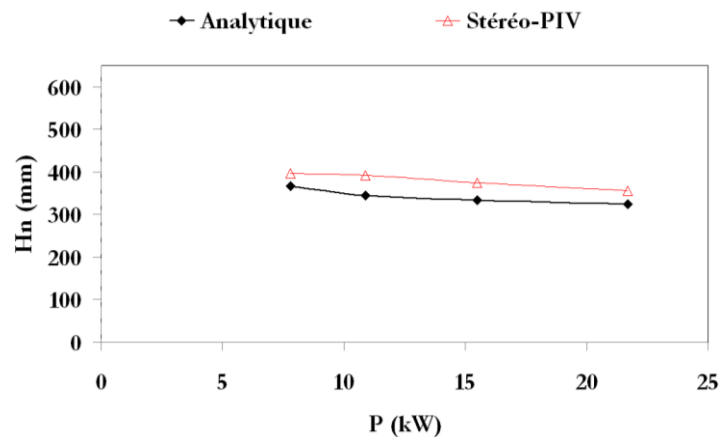


Figure 8 : Hauteur du plan neutre

L'augmentation de la puissance du feu favorise la sortie de fumée ce qui explique l'augmentation de la surface occupée par la fumée sur les contours de vitesse et la réduction de la hauteur du plan neutre. La Figure 8 rapporte une comparaison des mesures de la hauteur du plan neutre à l'estimation semi-analytique par le théorème de Bernoulli et pour les différentes puissances. Ce résultat confirme l'applicabilité de la technique de Stéréo-PIV concernant l'écoulement de fumées au passage de porte.

2.4 Etude des grandeurs fluctuantes de vitesse

Les grandeurs fluctuantes sont définies comme l'ensemble des informations relatives aux intensités de turbulence de l'écoulement, notées I_u , (ou I_v ou I_w) relatives aux termes croisés relatifs aux tensions de Reynolds notées I_{uv} , et relative à l'énergie cinétique turbulente E . Les définitions de ces grandeurs sont les suivantes :

$$I_u = \left(\overline{(u - \bar{u})^2} \right)^{1/2} / U_{\max}, \quad I_{u,v} = \overline{u'v'} / U_{\max}^2 \quad \text{et} \quad E = \frac{1}{2} \left[\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} \right] \quad (2)$$

Ces grandeurs sont calculées à partir des champs instantanés de vitesses. Le contour de la composante I_{vw} du tenseur de Reynolds présenté sur la Figure 9 au passage de porte, permet d'identifier la présence de recirculations contrarotatives au niveau des coins supérieurs de la porte.

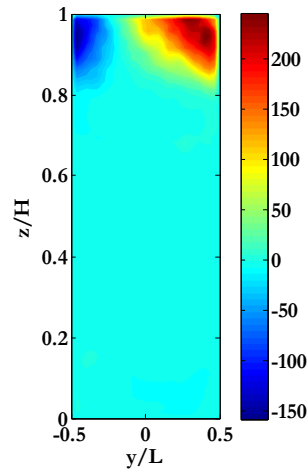


Figure 9 : Contour de I_{vw} au passage de porte ($P = 10,6kW$)

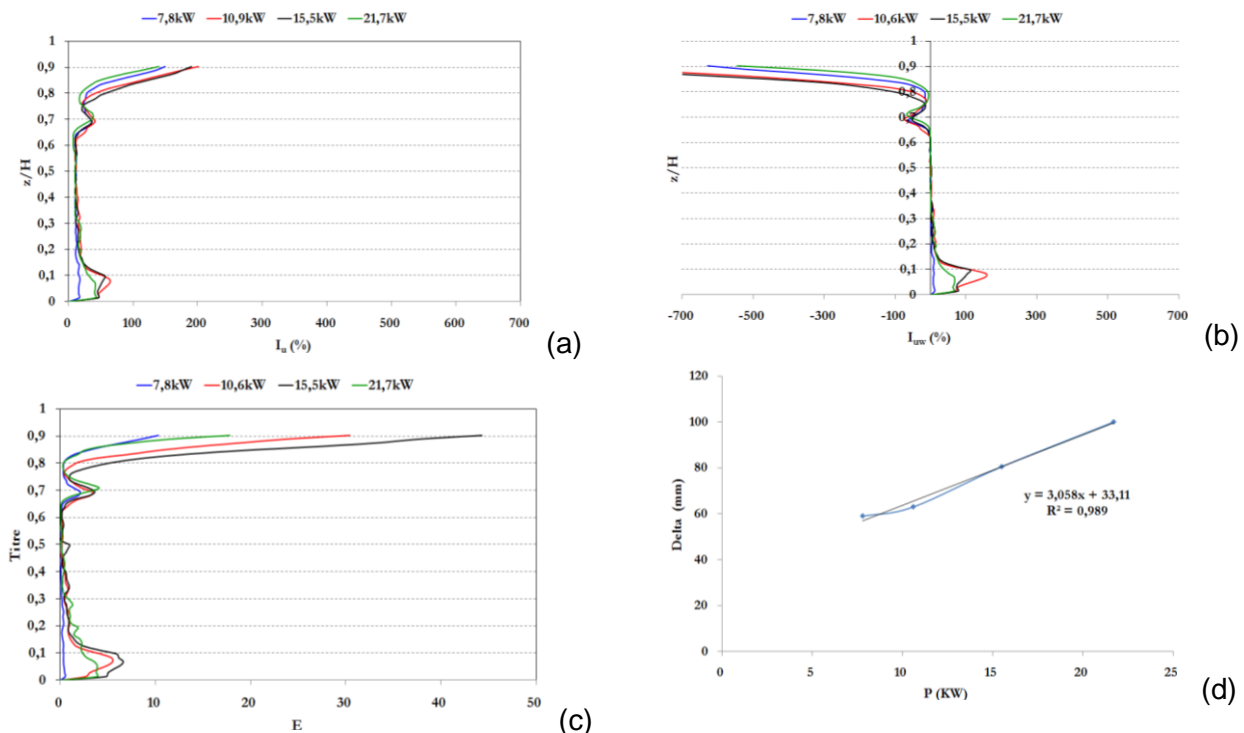


Figure 10 : Profils des grandeurs fluctuantes au centre de la porte, a) I_u ; b) I_{uv} ; c) E ; d) Δ

Les Figure 10a, 10b et 10c présentent, respectivement, l'évolution de l'intensité de turbulence I_u , de la composante I_{uw} du tenseur de Reynolds et l'énergie cinétique turbulente E au centre de la porte selon la hauteur de cette dernière. Des niveaux élevés de turbulence sont enregistrés au niveau de la couche de cisaillement de l'écoulement avec un pic persistant à 70% de la hauteur de la porte, quelle que soit la puissance considérée. Des pics d'intensité de turbulence et d'énergie cinétique turbulente sont enregistrés à une position d'environ 70% de la hauteur totale de la porte. Ces derniers correspondent à la limite de cisaillement entre les fumées sortantes et l'air frais entrant. La seule interprétation des grandeurs moyennes, i.e. les champs moyens de vitesse, ne permet pas d'identifier cette frontière. Une « épaisseur » de la couche de cisaillement peut ainsi être définie par la distance Δ séparant le pic de cisaillement (situé à 70% de la hauteur de la porte) et le plan neutre. Au centre de la porte, cette grandeur évolue linéairement en fonction de la puissance (Figure 10d).

3 Conclusion & perspectives

Cette étude présente des mesures par stéréo PIV des champs de grandeurs moyennes et fluctuantes d'un écoulement de fumée au passage de porte d'une enceinte confinée et ventilée. En convection naturelle, cet écoulement est bidirectionnel, gouverné par les forces dues à la différence de densité à l'intérieur et à l'extérieur de l'enceinte. La métrologie PIV permet d'accéder à une description plus fine de l'écoulement moyen. La position et la forme courbe du plan neutre a pu être mise en évidence. Cette technique se révèle être plus précise que la PIV bidimensionnelle ou les techniques de mesures conventionnelles par sondes déprimogènes bidirectionnelles. La PIV permet d'accéder aux grandeurs turbulentes de cet écoulement, données très rarement rencontrées dans la littérature. L'analyse de ces grandeurs turbulentes a permis d'identifier précisément la position de la couche de cisaillement entre l'air entrant et les fumées sortantes. Ces données constituent une description pertinente pour la validation des codes à champs dédiés aux incendies.

Remerciement

Nos remerciements s'adressent à la région Provence Alpes Cote d'Azur (PACA) pour son support financier au programme de recherche ainsi qu'aux techniciens du LEF qui sont intervenus sur le projet et particulièrement à Mr Serge Pons.

Références

- [1] X.C. Hou, Jayavant P. Gore, Howard R. Baum, «Measurements and prediction of air entrainment rates of pool fires», Symposium (International) on Combustion, Vol.26, Issue 1, 1453-1459, (1996).
- [2] S. R. Tieszen, T. J. O'hern, R. W. Schefer, E. J. Weckman, T. K. Blanchat, «Experimental study of the flow field in and around a meter diameter methane fire», Combustion and Flame, Vol.129, Issue 4, pp. 378-391, (2002).
- [3] R. A. Bryant, «The application of stereoscopic PIV to measure the flow of air into an enclosure containing a fire», Experiments in Fluids, Vol.47, 295-308, (2009).
- [4] H. Pretrel, W. Lesaux, L. Audouin, «Pressure variations induced by a pool fire in a well-confined and force-ventilated compartment », Fire Safety Journal, Vol.52, pp.11-24, (2012).
- [5] R. A. Bryant, «Evaluating practical measurements of fire-induced vent flows with stereoscopic PIV», Proceedings of the Combustion institute – Vol.33, 2481-2487, (2011).
- [6] B.J. McCaffrey et G. Heskestad, « A robust didirectional low-velocity probe for flame and fire application », Combustion and flame, vol. 26, N°1, Pages 125-127, 1976.
- [7] M. Raffel, C. Willert, S. Wereley, J. Kompenhans, « Practical Image Velocimetry – A practical guide », ISBN 3-540-72307-3, Second edition Springer Berlin Heidelberg New York, 2007.
- [8] R. J. Adrian, « Twenty years of particles image velocimetry », Experiments in Fluids, Vol. 39, pages 159-169, 2005.
- [9] G. Guigay1, J.M. Most, J. Eliasson, B. Karlsson, «A CFD and Experimental Investigation of the Mixing process in Compartment Fires», Fire safety science-proceedings of the 20th international symposium, pp. 1043-1056.