Analyse de la dynamique des fumées dans les incendies confinés par PIV à grande échelle

Emilien Varea, Bertrand Lecordier, Carole Gobin, Franck Lefebvre, Gilles Godard, Benjamin Betting, Béatrice Patte-Rouland

▶ **To cite this version:**

Emilien Varea, Bertrand Lecordier, Carole Gobin, Franck Lefebvre, Gilles Godard, et al.. Analyse de la dynamique des fumées dans les incendies confinés par PIV à grande échelle. Congrès Francophone de Techniques Laser (CFTL 2022), Sep 2022, Louvain, Belgique. hal-03859495

HAL Id: hal-03859495
https://hal.science/hal-03859495

Submitted on 18 Nov 2022

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.

ANALYSE DE LA DYNAMIQUE DES FUMEES DANS LES INCENDIES CONFINES PAR PIV A GRANDE ECHELLE

Emilien Varea [a,*], Bertrand Lecordier [a], Carole Gobin [a], Franck Lefebvre [a], Gilles Godard [a], Benjamin Betting [a], Béatrice Patte-Rouland [a]

(a) Normandie Univ, INSA Rouen, UNIROUEN, CNRS, CORIA, 76000 Rouen, France

*Correspondant: emilien.varea@coria.fr

Résumé : Dans cette étude, nous proposons un dispositif expérimental dédié à la mesure PIV à grande échelle à l'intérieur d'une enceinte représentative des incendies confinés à échelle 1. Deuxièmement, les champs de vitesse responsables du transport sont évalués par la PIV dans cette configuration confinée pour différentes puissances de feu. Enfin, la transition entre les conditions de feu ventilé et de feu sous ventilation est évaluée.

1 Introduction

Lors d'un feu de compartiment, les fumées d'incendie, bien que particulièrement dangereuses, sont une véritable source d'informations. En effet, une analyse détaillée de ces dernières permet d'obtenir de nombreux éléments d'information sur le foyer, son évolution, sa composition ou encore la possibilité d'apparition de phénomènes thermiques fortement redoutés par les pompiers. Pour ces différentes raisons, l'analyse des fumées s'est développée ces dernières années, notamment au travers de l'étude de sa température, de sa composition chimique, de son opacité, de sa toxicité ou encore de sa vitesse. En effet, certains travaux mettent en évidence un lien entre la vitesse des fumées et l'évolution de la température [1].

Généralement, la dynamique des fumées est étudiée en utilisant différents dispositifs ou techniques comme des sondes de Pitot et des sondes bidirectionnelles ou des sondes de McCaffrey, [2]. Toutefois, ces sondes sont intrusives et peuvent affecter la dynamique des fumées. De plus, seules les données en un point sont évaluées. Les techniques laser telles que la PIV peuvent être mises en place, [3-5] pour observer et analyser des champs bidimensionnels. Une extension naturelle de cette technique reste l'application de la PIV à proximité de la zone de sortie des gaz afin de mettre en évidence les échanges entre les fumées d'échappement chaudes et l'air frais entrant. L'utilisation de cette technique est rendue difficile par les conditions extrêmes qu'il est possible de retrouver dans les incendies. En effet, les températures élevées, le rayonnement important mais aussi la forte production de suies complique l'obtention de mesures expérimentales. Cependant, malgré ces contraintes expérimentales, la PIV est utilisée depuis plusieurs années pour l'étude des vitesses des fumées d'incendies [6,7]. Dans certains cas, il est possible d'utiliser cette méthode pour réaliser des mesures en configuration "grands champs", permettant ainsi d'obtenir des informations sur de grandes surfaces pouvant être de l'ordre du m2.

Ce dernier point s'avère particulièrement intéressant dans l'étude des incendies. En effet, de par leur dynamique et leur ampleur, ils nécessitent bien souvent une étude à grande échelle afin de bien cerner tous les mécanismes qui entrent en jeu au cours d'un sinistre. Suite à ce constat, de nombreux travaux ont utilisés la PIV grand champ pour étudier l'incendie dans différentes configurations. En effet, bien que difficile à mettre en place, cette technique s'est avérée très intéressante, que ce soit pour l'étude des feux de bâtiment ou pour des feux de végétaux. Ces études ont été principalement menées dans de bonnes conditions de ventilation [8-15].

C'est dans ce contexte que cette étude est menée. Cette étude vise à améliorer la compréhension de la dynamique des fumées d'incendie lors des feux de compartiments. Pour cela, deux caissons maritimes ont été installés sur le site de formation des sapeurs-pompiers de Seine-Maritime. Les containers de bateaux sont régulièrement choisis pour les entrainements des sapeurs-pompiers car ils présentent un volume assez proche d'un bureau ou d'une cuisine, feux majoritairement rencontrés en intervention. Il est alors possible d'observer de nombreux phénomènes thermiques et de s'entrainer à les combattre [16]. Dans le cadre de cette étude, un caisson a été modifié et équipé d'un brûleur au propane pouvant fournir une puissance de feu allant jusqu'à 1MW et ainsi produire des fumées dont la température est proche de 500°C. La présence d'une paroi amovible et de deux exutoires permet d'étudier différentes configurations, en conditions ventilées ou sous-ventilées. Le deuxième container permet d'installer le matériel nécessaire à la mise en place de la PIV grand champ. Des mesures de vitesses sur un champ de 1m² sont réalisées au cours de ces travaux.

Les objectifs de l'article sont triples :

- Premièrement, nous proposons un dispositif expérimental dédié à la mesure PIV à grande échelle à l'intérieur d'une enceinte représentative des incendies confinés à échelle 1.
- Deuxièmement, les champs de vitesse responsables du transport sont évalués par la PIV

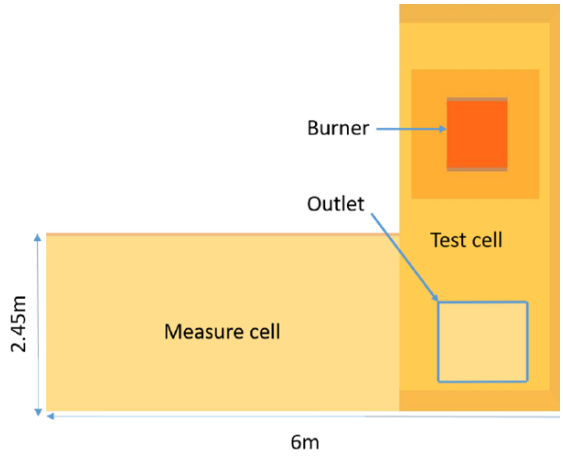


Figure 1 : Schéma des deux cellules d'essai et de mesure

Figure 2 : Matrice de 36 brûleurs et images de flamme pour deux puissances -minimum et maximum

dans une configuration dite « ventilée » et une autre « confinée » pour différentes puissances de feu.

- Troisièmement, la transition entre les conditions de feu ventilé et de feu sous ventilation est évaluée.

2 Dispositif expérimental

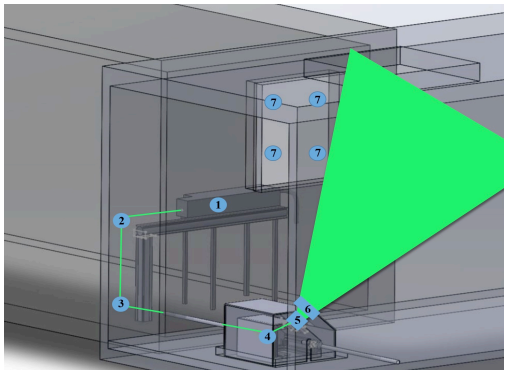
Cette cellule est constituée de deux containers maritimes installés perpendiculairement. Ils sont respectivement appelés « cellule mesures » ainsi que « cellule essais ». L'installation expérimentale dans son ensemble est représentée sur la Figure 1. La taille standard des caissons maritimes est de 6m de long, 2.59m de haut et 2.45m de large soit un volume d'environ 38m3. Initialement, ces structures sont apparues comme outils de formation dans les services de secours afin d'entrainer les sapeurs-pompiers à détecter les signes annonciateurs de phénomènes thermiques et ainsi lutter efficacement contre ces derniers [16]. Par ailleurs, le volume de ces caissons est proche de celui d'une chambre ou d'une cuisine de taille standard. Ce type de feux est régulièrement rencontré dans les interventions de lutte contre l'incendie.

Pour reproduire les conditions d'un incendie, un brûleur alimenté en propane a été installé. Ce dernier est constitué d'une matrice de 36 brûleurs, répartis sur une surface d'1m² pouvant atteindre une puissance de 1MW et des températures avoisinant les 1000°C, Figure 2.

Afin d'étudier précisément l'écoulement et la dynamique des fumées d'incendies, des mesures de vitesses ont été réalisées dans les gaz chauds issus du brûleur.

La PIV à grande échelle révèle un véritable défi quant au compromis entre la résolution spatiale et le champ de mesure. Dans cette installation des particules d'alumine (Al2O3 - 50 µm diamètre) sont choisies car elles résistent à des températures élevées de la combustion [17]. Ces particules sont injectées par une couronne d'alimentation en air ensemencé placée sous le brûleur. Les particules sont injectées de telle sorte que la dynamique de l'injection d'air frais ne soit que peu modifiée.

(a)



(b)

Figure 3 : Représentation du faisceau laser (a) et photo de la nappe en condition réelle (b).

L'emplacement de la nappe laser par rapport aux cellules essais et mesures est visible sur la Figure 3. Pour rappel, le positionnement des deux containers est disponible sur la Figure 1.
Afin de détailler précisément le cheminement optique, un zoom est présenté à la Figure 3a. Sur cette image, il est possible d'observer le départ du faisceau laser dans la cellule mesures (noté 1). Il est orienté par un premier miroir de renvoi (noté 2) sur un deuxième miroir (noté 3) afin de passer dans un tube métallique faisant la liaison avec la cellule essais. Le faisceau chemine ensuite dans une boîte métallique fabriquée afin de protéger le système optique des suies. Un nouveau miroir de renvoi (noté 4) dirige le faisceau vers une lentille divergente -12.5mm (notée 5) pour produire la nappe qui conserve comme épaisseur celle du faisceau en sortie de laser. Ce montage permet d'obtenir une nappe suffisamment grande et épaisse pour effectuer des mesures PIV sur une surface d'1m². L'intervalle de temps entre deux images consécutives est compris entre 1 et 2,5ms, en fonction des puissances et donc de la vitesse d'écoulement. Pour finir, les 4 caméras CCD sont disposées dans la cellule mesures (notées 7). Une photo prise au cours d'un essai porte ouverte est disponible sur la Figure 3b. Cette dernière permet d'observer la taille de la nappe réalisée ainsi que sa position réelle dans la cellule essais.

La combinaison des images est faite en utilisant un modèle de caméra polynomiale de 5ème ordre pour compenser la distorsion optique et l'inclinaison de chaque caméra. Le repositionnement relatif des images a été estimé à 0,1 pixel à partir de l'analyse des zones de visualisation superposées. Les Figure 4a et Figure 4b présentent respectivement la reconstruction à partir de l'enregistrement sur les 4 caméras de l'image de mire et un exemple d'image de particule. Sur l'image de particule, dont les niveaux ont été adaptés pour l'affichage, nous distinguons les zones de recouvrement entre les images des caméras afin d'assurer une continuité pour les mesures de vitesse. Un prétraitement spécifique pour réduire la corrélation sur les structures identifiées résultant de la génération locale de suie ou des interfaces dues à l'air frais non ensemencé provenant de l'ouverture a été développé. Un exemple d'une image brute enregistrée par la caméra 4 est présenté sur la Figure 5a. Nous distinguons clairement des zones sans ensemencement en bas de l'image et des volutes plus ou moins intenses montrant les zones de suies. Sur la Figure 5b, où nous présentons le zoom de l'angle en bas à gauche de l'image précédente, nous distinguons très clairement les variations de signal de fond. Avant de pouvoir effectuer des mesures de vitesse par corrélation, nous avons réduit ce fond parasite qui

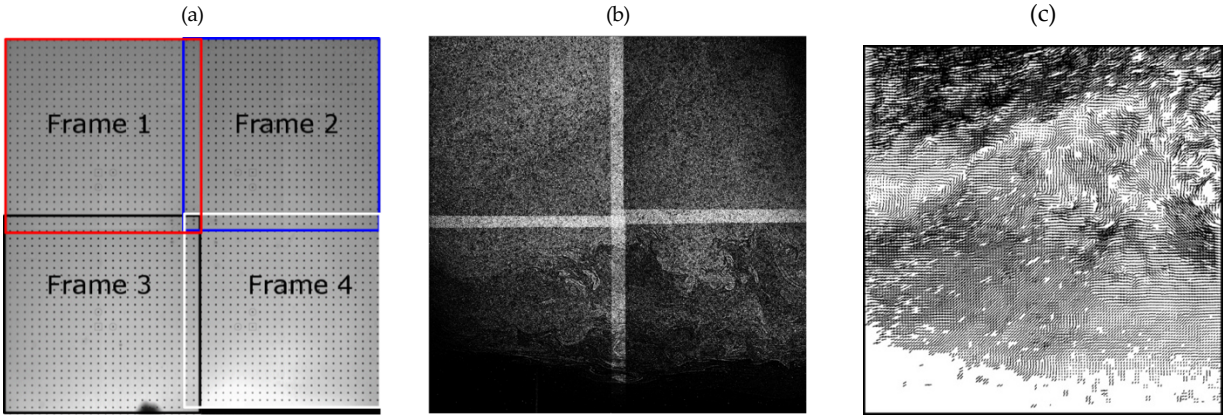


Figure 4 : (a) Reconstruction de la mire, (b) exemple d'image reconstruite (contraste forcé pour affichage), (c) champ de vitesse instantané correspondant l'image (5-b)

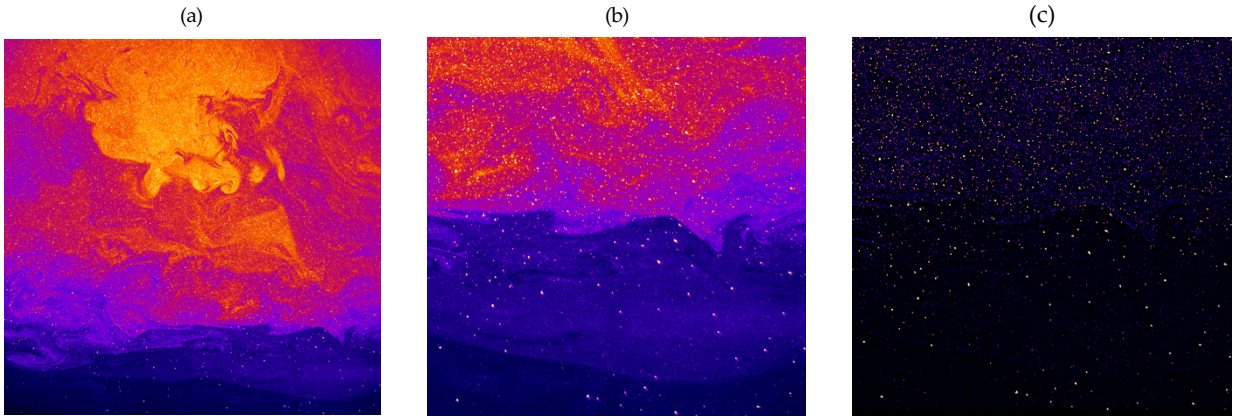


Figure 5 : Traitement du fond sur les images PIV (a) Exemples d'une image instantanée (camera 4) et Zoom du coin inférieur droit de l'image instantanée (b) et de l'image corrigée (c)

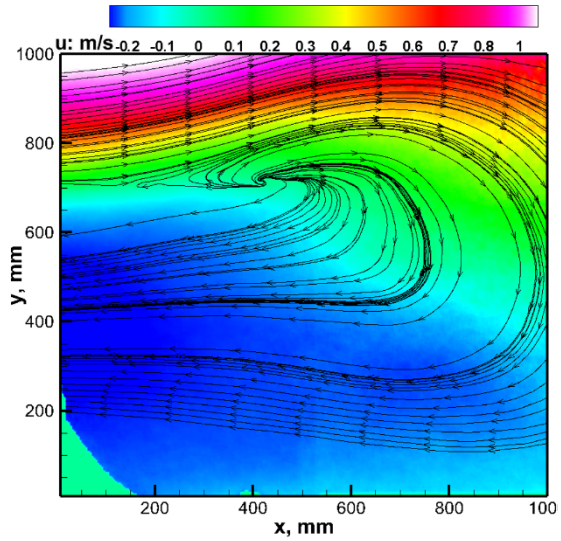


Figure 6 : Champ PIV moyen, puissance 300kW

perturberait fortement la qualité des mesures de vitesse. Une première étape consiste à obtenir une image instantanée du fond en supprimant le signal des particules par un filtrage passe-bas de l'image brute. Cette image est utilisée pour supprimer les variations instantanées du fond. Dans une deuxième étape, une image moyenne est calculée à partir de la série des images corrigées pour être utilisée avant le calcul PIV pour supprimer le signal de fond général et ainsi que les variations d'éclairage.

Le traitement PIV est effectué en utilisant une technique de corrélation croisée entre les paires d'images successives obtenues après recombinaison des images. Les outils d'analyse PIV sont intégralement développés au CORIA. La taille des fenêtres d'interrogation de la PIV est de 64pixel² avec un chevauchement de 50%. Une résolution spatiale maximale de 2,5cm est atteinte. Pour tenir compte de la variation de densité en particule sur les images, le calcul de corrélation s'effectue uniquement si le niveau moyen et la RMS de signal dans les mailles d'analyse sont dans une gamme préajustée initialement à partir des caractéristiques des images. Ce conditionnement statistique permet de ne calculer les vitesses que dans les zones où des particules sont présentes, mais également de supprimer dynamiquement sans utiliser un procédé de masquage, des régions où les variations de concentration sont trop fortes (ex : bord d'un tourbillon) ou qu'il existe une saturation locale (agglomera de particule) ou la présence d'un objet. Il en résulte, comme le montre la Figure 4c, une répartition non uniforme des vecteurs dans les champs instantanés. Le calcul des statistiques de vitesse (champ moyen et rms), tient compte de cette répartition non uniforme en ne retenant que les valeurs mesurées localement après filtrage des niveau et validation des mesures. Un exemple de champ moyen à 300kW est représenté sur la Figure 6. Sur l'ensemble des 600 couples d'image, nous constatons une bonne continuité du champ de vitesse malgré un nombre de vecteur considéré pouvant varier d'un point à l'autre du champ. Cela montre que ce procédé permet par exemple dans le coin inférieur gauche et en bas du champ de ne pas tenir compte des vitesses moyennes suite à un nombre trop faible de mesure sur les champs instantanés.

3 Resultats

3.1. Configuration ventilée

La première configuration étudiée correspond au cas largement ventilé, dite configuration grand volume porte ouverte. La porte opposée au bruleur est laissée ouverte, l'exutoire au-dessus de la zone de mesure est fermé. Les essais présentés ci-dessous ont été réalisés pour des puissances -HRR, Heat Release Rate- de 100kW à 1MW. Pour chaque acquisition, 600 couples d'images PIV sont enregistrés et post-traitées.

La Figure 7 permet de situer l'emplacement des mesures PIV. Ces dernières sont représentées par le cadre bleu. La flèche verte permet quant à elle d'indiquer le sens de l'écoulement du foyer vers la porte.

La Figure 8 montre un champ de vitesse instantané obtenu pour une puissance de 100kW. Sur cette dernière, une distribution de vitesse est visible. En effet, la majeure partie des vitesses en partie haute avoisinent les 0,6 m/s jusqu'à atteindre 0,1 m/s en partie basse. Les valeurs négatives, représentées en bleue, correspondent à l'air frais extérieur qui vient alimenter le foyer en dioxygène.

Pour des raisons de place, les champs entre 200kW et 900kW ne sont pas représentés. Cependant, une corrélation de la vitesse maximale obtenue dans le caisson en configuration porte ouverte est donnée dans la Figure 10. Le HRR utilisé est noté en abscisse alors que la vitesse moyenne maximum (en m/s) observée dans la cellule est tracée en ordonnée. Sur cette figure, il est possible d'observer une augmentation « quasi linéaire » sur cette gamme de puissance.

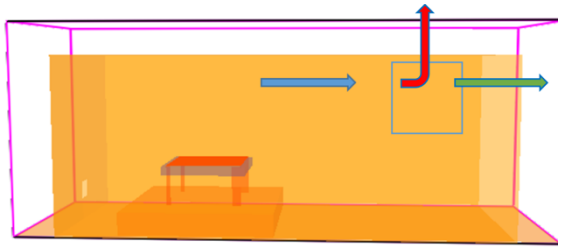


Figure 7 : Configuration ventilée, emplacement des mesures PIV. Le cadre bleu représente la zone de mesure PIV. Fleche verte -configuration ventilée- Flèche rouge -configuration sous ventilée.

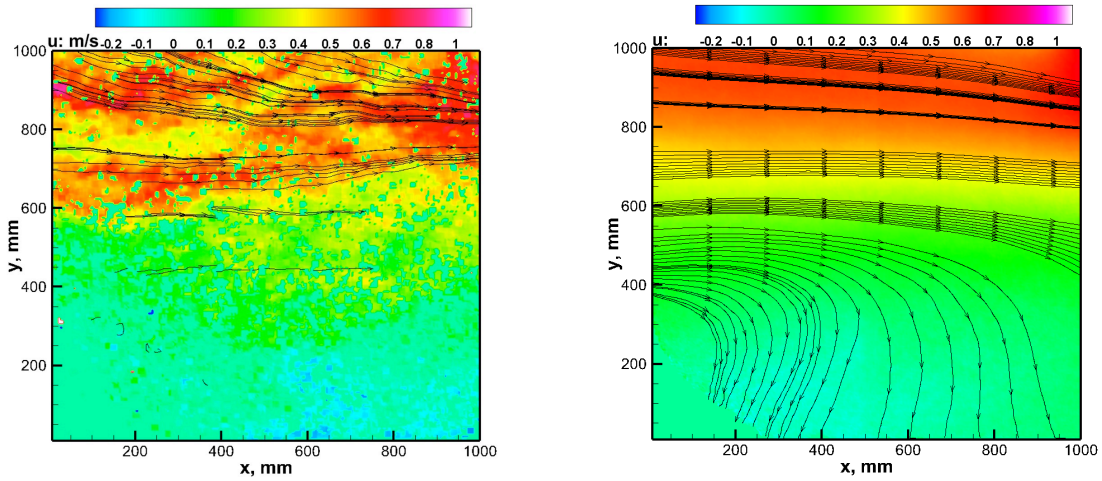


Figure 8 : Champs de vitesse instantané et moyen en configuration porte ouverte, 100kW.

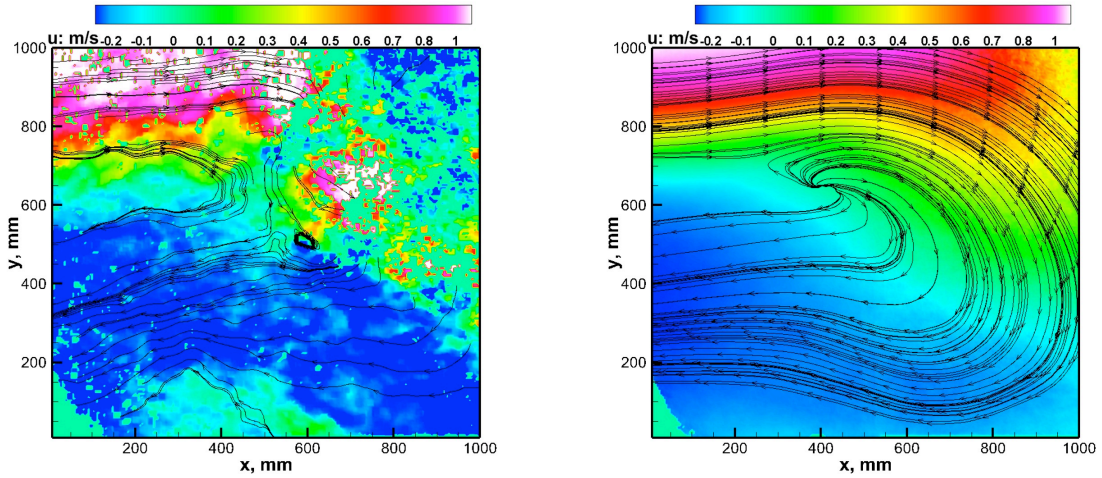


Figure 9 : Champs de vitesse instantané et moyen en configuration exutoire ouvert, 100kW.

4 Configuration sous-ventilée

Afin d'étudier la dynamique des fumées lors d'un feu de compartiment en condition de sous ventilation, la configuration grand volume exutoire ouvert a été mise en place. La porte est maintenant fermée et les fumées s'échappent par l'exutoire situe à l'aplomb de la zone de mesure PIV, flèche rouge Figure 7.

La Figure 9 montre les champs de vitesses instantanés et moyens pour un HRR de 100kW. La dynamique des fumées est bien différente de celle observée en configuration porte ouverte. Sur la Figure 9, on observe que les gaz chauds provenant du brûleur (en partie haute du volume) sont évacués par l'exutoire. D'autre part, les vecteurs vitesses indiquent un retour d'air frais, nécessaire au bon fonctionnement du foyer.

De même que précédemment avec la configuration porte ouverte, on représente sur la Figure 11, l'évolution de la vitesse maximale dans le volume en fonction du HRR.

Sur la Figure 11, on observe une augmentation nette des vitesses pour des puissances allant de 100kW à 300kW, puis de 400kW et 500kW, la vitesse maximale semble atteindre un plateau. À partir de 600kW, la vitesse maximale présente dans le caisson chute fortement avant de remonter légèrement. Cette signature peut s'expliquer par la forte sous ventilation qui empêche l'alimentation correcte du bruleur en air et implique une compétition entre la sortie des fumées à l'exutoire, et l'entrée d'air par la même zone.

Sur la Figure 12, on représente la composante verticale des profils de vitesse horizontaux à l'interface avec l'exutoire et l'air extérieur. Les puissances de 200 kW, 500 kW et 800 kW sont reportées. On peut voir que pour les trois cas, les premiers 500 mm indiquent des vitesses positives, ce qui correspond à la fumée chaude sortant de l'enceinte. De plus, plus la puissance est élevée, plus les vitesses sont élevées. Ceci est lié aux flux de fumées chaudes qui sont libérées avec des puissances plus élevées.

Dans la deuxième partie de l'image de 500 à 1000 mm des vitesses négatives sont observées. Il existe donc un retour d'air frais pour les puissances de 200 kW et 500 kW. Pour le cas de puissance 800 kW, aucun retour d'air frais n'est observé. Suite à cette observation, les fumées chaudes sortant du volume interfèrent avec l'entrée d'air frais, ce qui ne donne que des vitesses positives en moyenne.

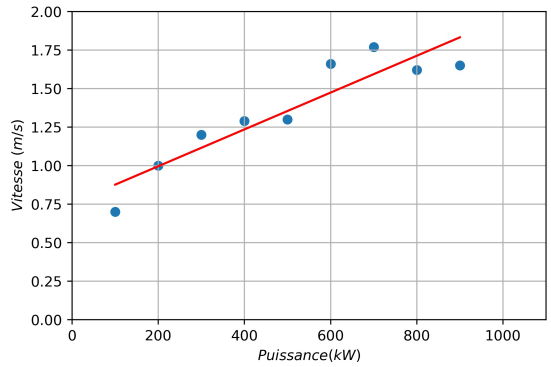


Figure 10 : Évolution de la vitesse moyenne maximale en fonction de la puissance, configuration porte ouverte.

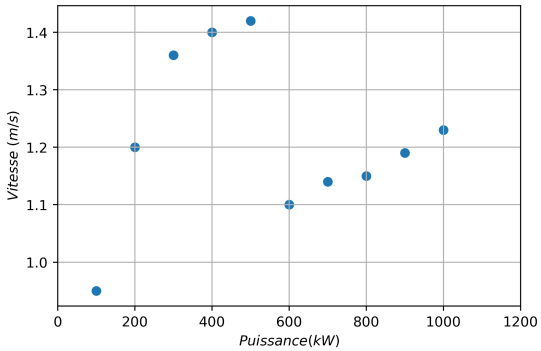


Figure 11 : Évolution de la vitesse moyenne maximale en fonction de la puissance, configuration sous-ventilée.

5 Conclusion

Dans ce travail, nous avons mis en place un dispositif expérimental dédié à la mesure PIV à grande échelle à l'intérieur d'une enceinte permettant de reproduire des incendies dits « ventilés » ou « sous ventilés ».
L'analyse porte sur l'exploitation des champs de vitesse dans l'enceinte pour différentes puissances de feu dans deux configurations.
Grace à l'analyse des champs PIV, nous avons montré que la dynamique de sortie des fumées était différente pour les cas « ventilé » et « sous ventilé ». En effet, dans la première configuration ventilée, vitesse et puissance sont corrélés. Par contre, dans le cas sous ventilé, il existe un ratio puissance/volume, i.e. puissance/vitesse critique ou les conditions incendie passent de feu ventilé à feu sous ventilé avec l'augmentation de la puissance au bruleur. Cette transition est liée à la dynamique de l'écoulement à l'exutoire où gaz chaud et frais rentrent et sortent par le même endroit, créant ainsi un phénomène pouvant aller jusqu'à des feux pulsés.

6 Remerciements

Le soutien financier de l'Agence Nationale de la Recherche Française, dans le cadre du projet "Firediag", est vivement remercié. Ce projet a été financé avec le soutien de l'Union Européenne par le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER) et du Conseil Régional de Normandie.

7 References

[1] D. MADRYKOWSKI and S. KERBER. Nist technical note 1618, fire fighting tactics under wind driven conditions : Laboratory experiments. National Institute of Standards and Technology, 2009

[2] B. MCCAFFREY, G. HESKESTAD, A robust bidirectional low-velocity probe for flame and fire application, Combustion and Flame 26 (1976) 125 – 127. .

[3] S. TIESZEN, T. O'HERN, R. SCHEFER, E. WECKMAN, and T. BLANCHAT. Experimental study of the flow field in and around a one meter diameter methane fire. Combustion and Flame, 129(4) :378–391, 2002.

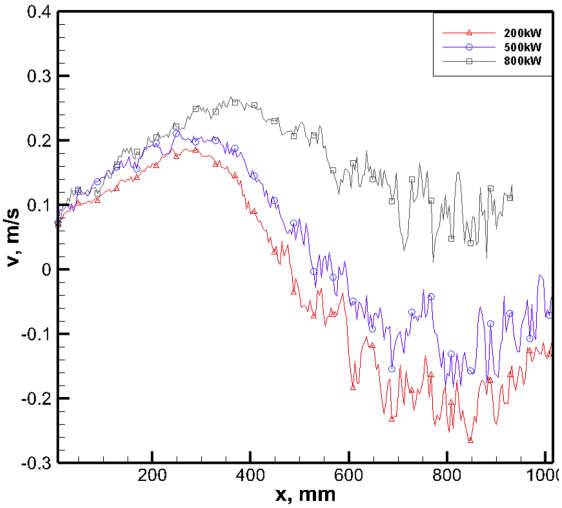


Figure 12 : Profils de vitesse axiaux à l'exutoire pour des puissance de 200, 500 et 800kW.

[4] Hou X. C., Gore J. P., Baum H. R., Measurements and prediction of air entrainment rates of pool fires, Vol. 26, 1996, pp. 1453 – 1459.

[5] Koched A., Pretrel H., Vauquelin O., Audouin N, L., Utilisation de la stereo piv pour l'optimisation des mesures de vitesse de fumee d'incendie a un passage de porte par des sondes bidirectionnelles, 14eme Congrés Francophone de Techniques Laser (CFTL2014) Marseille.

[6] Gore J. P., BAUM H. R., Measurements and prediction of air entrainment rates of pool fires. In Symposium (International) on Combustion, volume 26, pages 1453–1459. Elsevier, 1996.

[7] Sun L., Zhou X., Mahalingam S., Weise D. R., Experimental investigation of the velocity field in buoyant diffusion flames using piv and tpiv algorithm. 2006.

[8] Bryant R. A., The application of stereoscopic piv to measure the flow of air into an enclosure containing a fire. Experiments in fluids, 47(2) :295–308, 2009.

[9] Merci B., Beji, T., Fluid mechanics aspects of fire and smoke dynamics in enclosures. CRC Press, 2016.

[10] Pretrel H., Le Saux W., Audouin L., Pressure variations induced by a pool fire in a well-confined and force-ventilated compartment. Fire safety journal, 52 :11–24, 2012.

[11] Silvani X., Metrology for fire experiments in outdoor conditions. Springer, 2013.

[12] Varrall K., Etude expérimentale de l'écoulement de convection mixte à travers un orifice horizontal reliant deux compartiments. PhD thesis, Aix-Marseille, 2016.

[13] Bepoix P., Les phénomènes thermiques. 2015.

[14] Rogaume T., La formation incendie. 2016

[15] Narayanaswamy V., Clemens N., Simultaneous lii and PIV measurements in the soot formation region of turbulent non-premixed jet flames. Proceedings of the Combustion Institute, 34(1) :1455–1463, 2013

[16] Bryant R. A., A comparison of gas velocity measurements in a full-scale enclosure fire. Fire safety journal, 44(5) :793–800, 2009.

[17] Bryant R. A., Mulholland G. W., A guide to characterizing heat release rate measurement uncertainty for full-scale fire tests. Fire and materials, 32(3) :121–139, 2008.

[18] Horvath I., Buchlin J.-M., Extreme piv applications: simultaneous and instantaneous velocity and concentration measurements on model and real scale car park fire scenarios. 2012.