

# Application de la stéréo PIV pour la mesures des écoulements bidirectionnels de fumée d'incendie traversant une trémie horizontale

Patricio Becerra Barrios, Kevin Varrall, Hugues Pretrel, Samuel Vaux, Olivier Vauquelin

## ► To cite this version:

Patricio Becerra Barrios, Kevin Varrall, Hugues Pretrel, Samuel Vaux, Olivier Vauquelin. Application de la stéréo PIV pour la mesures des écoulements bidirectionnels de fumée d'incendie traversant une trémie horizontale. 16ème Congrès Francophone de Techniques Laser pour la mécanique des fluides, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris Saclay, IRSN, Sep 2018, Dourdan, France. hal-02097661

**HAL Id: hal-02097661**

**<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02097661>**

Submitted on 12 Apr 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.

# Application de la stéréo PIV pour la mesure des écoulements bidirectionnels de fumée d'incendie traversant une trémie horizontale

Patricio BECERRA BARRIOS<sup>1,3</sup>, Kevin VARRALL<sup>1</sup>, Hugues PRETREL<sup>2</sup>,  
Samuel VAUX<sup>2</sup> et Olivier VAUQUELIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire IUSTI, UMR CNRS 7343, Aix Marseille Université, 13453 Marseille Cedex 13, France

<sup>2</sup>Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (PSN-RES/SA2I), Laboratoire de recherche ETiC, Centre de Cadarache, Bâtiment 346, 13115 Saint-Paul-Lez-Durance, France

<sup>3</sup>School of Mechanical Engineering, University of Costa Rica, San José, Costa Rica

Email auteur correspondant : patricio.becerra@ucr.ac.cr

L'écoulement des fumées à un passage d'une ouverture horizontale reliant deux compartiments superposés est étudié expérimentalement. Dans cette étude la technique de stéréo PIV est appliquée pour l'écoulement en convection mixte et en convection naturelle. Cet échange est gouverné à la fois par les effets de flottabilité dûs à une différence de température du fluide contenu dans les deux compartiments, et les effets d'une ventilation mécanique appliqué dans le compartiment inférieur. Une telle configuration entraîne un échange uni- ou bi-directionnel à travers l'orifice. Dans les expériences, la flottabilité est induite dans le compartiment inférieur grâce à une résistance électrique. Les résultats en convection naturelle montrent une forte similitude avec les résultats en convection mixte dans le régime bi-directionnel.

## 1 Introduction

Depuis quelques années, les techniques de mesure laser sont utilisées de plus en plus régulièrement pour des études expérimentales sur les incendies et plus particulièrement sur la caractérisation des écoulements de fumées ([1, 2, 3]). Lors de scénarios d'incendie dans des ensembles de pièces connectées entre elles et ventilées, les jeux de pression, engendrés par la complémentarité ou l'opposition de la flottabilité et de la quantité de mouvement, génèrent, au sein d'un orifice, un écoulement qui selon le cas peut être bi-directionnel ou uni-directionnel.

Dans le cas d'un ouvrant vertical tel qu'une porte ou une fenêtre, l'organisation de l'écoulement (en régime établi) est déterminé par le gradient de pression hydrostatique au sein du local et le fluide léger (fumée) occupe la partie haute de l'ouverture tandis que le fluide lourd entre en partie basse. Dans ce cas, la ventilation mécanique n'a pour seul effet sur cette organisation que de déplacer verticalement l'interface entre les deux fluides. Cette organisation hydrostatique permet une étude des flux échangés, basée sur une prédiction simple de la hauteur de plan neutre (hauteur où l'écart de pression entre l'intérieur et l'extérieur est nul). Ainsi, selon la localisation de celui-ci à l'intérieur ou l'extérieur de l'ouvrant, l'écoulement sera prédit bi ou uni directionnel respectivement. Cette théorie a également pu être éprouvée lors d'étude par SPIV lors expérimentations incendie à grande échelle (voir [4] et [5]).

Dans le cas d'un ouvrant horizontal (ou trémie) la superposition du fluide lourd sur le fluide léger crée une situation instable. En cas de confinement important du compartiment inférieur, la structure de l'écoulement qui en résulte est bi-directionnel et s'avère complexe : la localisation du fluide montant et descendant à travers la section est indéfinie et varie dans le temps (voir [6]) ne permettant pas a priori d'estimer simplement les flux échangés. La perte de confinement, qu'elle soit liée à une ventilation mécanique ou naturelle entraîne un déséquilibre des flux montant et descendant rendant alors l'écoulement uni-directionnel (montant ou descendant selon le cas).

Les principales contributions à la compréhension de ces écoulements ont été apportées par [7] et [8] qui ont proposé, à partir d'expériences sur maquettes mettant en jeu de l'eau douce et de l'eau salée, des lois empiriques exprimant le débit échangé ainsi que les condition critiques, de disparition de l'écoulement bi-directionnel, en fonction des masses volumiques des fluides et de la géométrie de l'ouvrant. Dans ces études, l'utilisation de fluides incompressibles permet, par conservation du volume, de calculer les débits à travers l'ouvrant par la variation de la masse volumique dans un des deux compartiments.

Ces mesures indirectes ont été corroborées par d'autres études mettant en oeuvre des techniques laser ponctuelles ([9], [10]). D'autres auteurs ont également étudié les transitions entre les écoulements bi et uni-directionnels en ventilation naturelle dans un processus de vidange [11] sur des maquettes utilisant mélanges d'eau douce et salée. Malgré cela, seules des observations faites durant les expériences permettent de décrire le comportement des fluides à travers l'ouvrant. De plus, les points expérimentaux dans la zone de transition sont peu nombreux. Ainsi les modèles corrélatifs disponibles ([12, 13, 14]) demeurent imparfaits et faiblement validés.

C'est dans ce cadre que l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire et le Laboratoire IUSTI de l'Université d'Aix-Marseille ont entrepris des travaux expérimentaux de caractérisation des écoulements à travers une trémie horizontale en utilisant la technique stéréo PIV. Cette étude a pour objectif de caractériser finement la nature de l'écoulement, de décrire les différents régimes afin d'améliorer et de valider les approches corrélatives existantes.

En mettant l'accent sur la mise en oeuvre et la pertinence de la stéréo PIV pour l'étude de tels écoulements, cet article présente et compare les résultats d'une étude antérieure obtenus en ventilation mécanique [6], avec de nouvelles données obtenues en ventilation naturelle, dans la phase de transition entre un écoulement bi-directionnel et uni-directionnel comme se montre sur la Figure 1. L'article est organisé selon le plan suivant : le dispositif d'essai ainsi que le protocole expérimental commun aux deux campagnes expérimentales sont présentés en §2. En §3, la description de l'organisation des fluides au sein de l'orifice est détaillée pour les nouveaux résultats en convection naturelle et sont comparés aux résultats obtenus en ventilation mécanique par Varrall et al.[6].

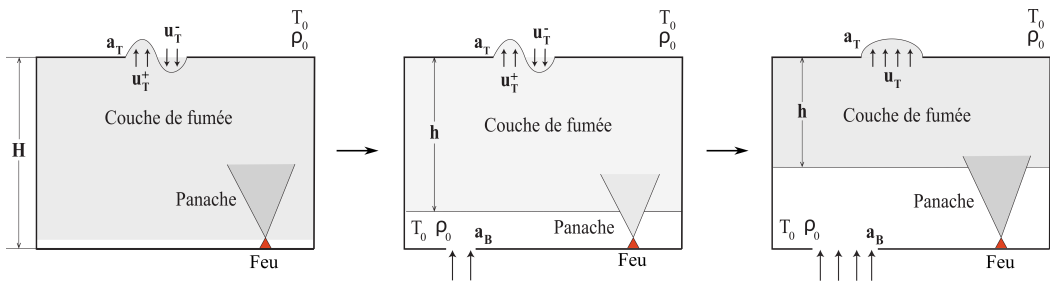


FIGURE 1: Transition entre un écoulement bi-directionnel au niveau de l'ouverture horizontale dans un espace confiné et un écoulement uni-directionnel en augmentant la surface d'entrée d'air  $a_B$  en partie basse.

## 2 Approche expérimentale

### 2.1 Dispositif d'essai

Le dispositif expérimental présenté dans la Figure 2a est constitué de deux compartiments superposés connectés par une ouverture horizontale circulaire de surface variable  $a_T = \pi D^2/4$ , où  $D$  est le diamètre, et d'épaisseur (ou profondeur)  $L = 38$  mm. Les dimensions intérieures sont  $1\text{ m} \times 1.5\text{ m} \times 1\text{ m}$  pour le local bas et  $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$  pour le haut. Les parois horizontales (plancher et plafond du compartiment inférieur) sont en silicate de calcium de 38 mm d'épaisseur. Le châssis en acier permet une importante modularité pour les parois latérales qui peuvent être en matériaux réfractaires, acier de 3 mm ou en verre de 5 mm pour l'accès optique pendant les expériences. La source incendie localisée au sol du local inférieur est simulée par une résistance électrique de 2 kW et 180 mm de diamètre, permettant de produire un panache thermique sans suies ni apport de masse. Des écarts de températures d'environ  $50^\circ\text{C}$  entre les deux côtés de la trémie sont obtenues pour cette puissance électrique. Des thermocouples type K de 0.5 mm répartis sur plusieurs mâts permettent de estimer l'évolution des températures dans les deux enceintes. Afin d'atténuer l'effet de l'écoulement produit par le panache thermique sur l'écoulement à la trémie, la résistance électrique est décalé de l'axe de l'ouverture et un déflecteur grillagé est positionné (partie concave vers l'orifice) sur toute la hauteur du compartiment inférieur.

Pour les expériences en ventilation mécanique, un écoulement d'air forcé par un ventilateur est appliqué dans le local inférieur via une bouche d'admission de 40 mm de diamètre. Deux modes de ven-

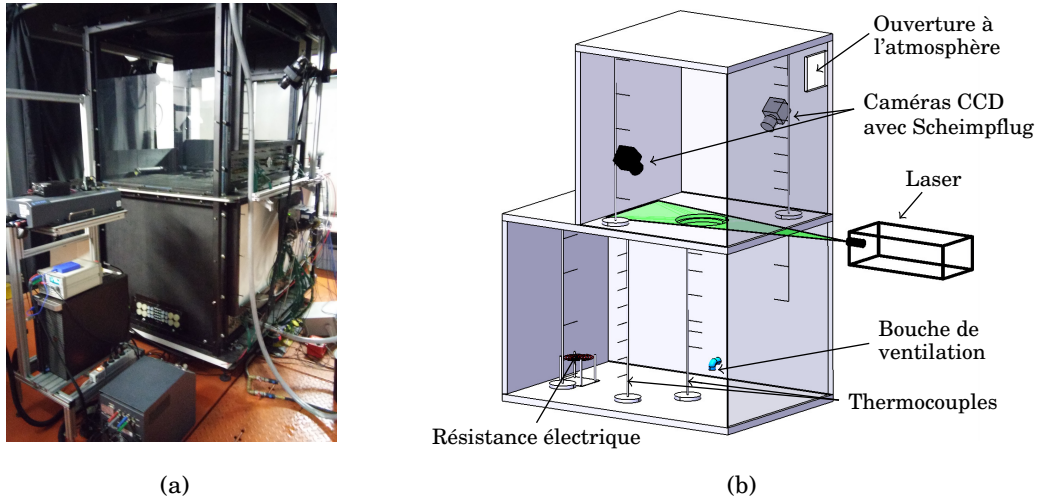


FIGURE 2: Dispositif expérimental : (a) Photographie du dispositif en convection naturelle et (b) Schéma du système SPIV en convection mixte [6].

tilation mécanique sont étudiés : extraction (les gaz chauds sont extraits du local inférieur) et soufflage (de l'air frais est injecté également dans le local inférieur). Le local supérieur quant à lui est toujours connecté à l'ambiance du laboratoire par une ouverture. Le débit de ventilation  $q_v$  est contrôlé par un variateur et couvre une gamme de  $-20 \text{ m}^3/\text{h}$  à  $20 \text{ m}^3/\text{h}$  (les valeurs négatives de  $q_v$  représentent le mode d'extraction et les valeurs positives le mode de soufflage). Ce débit est mesuré via un transmetteur de pression EMERSON Rosemount 3051 CD relié à un élément primaire à orifice intégré Rosemount 1195, garantissant une erreur inférieure à 2%.

Pour les expériences en ventilation naturelle, le déséquilibre des flux montant et descendant au sein de l'orifice est induit par une perte du confinement du local inférieur généré par une ouverture située en partie basse du local sur la paroi opposée à la résistance électrique. Cette fuite, de surface  $a_B$ , est composée d'une série de sections circulaires de 20 et 40 mm de diamètre permettant de maîtriser la surface d'amenée d'air (voir partie basse de la paroi latéral du dispositif en acier de la Figure 2a).

Les thermocouples permettant d'évaluer les gradients thermiques dans les locaux et les transmetteurs de pression sont branchés à un châssis NI CompactDAQ Ethernet et l'acquisition des signaux se fait grâce au logiciel NI Signal Express qui couvre une gamme de fréquence entre 1 Hz à 15 Hz.

## 2.2 Système de mesure stéréo PIV

La Figure 2b présente le module utilisé pour les mesures SPIV comprenant un laser Nd-YAG New Wave à 532 nm synchronisé à deux caméras CCD double frames d'une résolution de  $2048 \text{ px} \times 2048 \text{ px}$ , modèle 630091PowerView 4MP-HS. Ces caméras montées sur Scheimpflug sont situées de chaque côté avec un angle d'environ  $45^\circ$  par rapport au plan de symétrie vertical. Cette figure montre également la nappe laser éclairant un plan horizontal à raz de l'ouverture sur le plancher du local supérieur permettant de mesurer un champ d'environ  $300 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ . L'énergie du laser utilisé est de  $200 \text{ mJ/pulse}$  avec une durée d'impulsion de 5 ns. L'épaisseur de la nappe laser au niveau de l'orifice est estimée entre 3 mm et 4 mm. L'acquisition des images et leur post-traitement sont effectués avec le logiciel Insight 4G de TSI. La fréquence d'acquisition est fixée à 2.5 Hz. Un algorithme multi-passes pour obtenir les vecteurs valides a été employé dans la présente étude. Pour la première passe, une fenêtre d'interrogation de  $128 \text{ px} \times 128 \text{ px}$  (ce qui correspond à environ  $12 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$  pour les champs considérés) avec un recouvrement de 50% a été utilisée avec un calcul de corrélation basé sur la Transformée de Fourier Rapide (FFT) jusqu'à une fenêtre ou spot final de  $32 \text{ px} \times 32 \text{ px}$  ce qui correspond à une résolution dans le plan horizontal ( $x, y$ ) d'environ  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ . Les vecteurs faux sont isolés par un seuil du Rapport Signal sur Bruit à 1.10 suivi d'une validation locale basé sur un filtre médian sur et remplacés par interpolation basée sur la médiane locale sur un voisinage de  $5 \times 5$  cellules.

## 2.3 Protocole de mesure

Les mesures SPIV pour les deux études ont été réalisées à partir d'un état thermique stationnaire atteint par le dispositif. Pour chaque essai, la résistance chauffe de façon continue l'air dans le compartiment inférieur jusqu'à obtenir un premier état stationnaire après environ 4 h, pour un confinement total du compartiment et sans ventilation mécanique [15]. Cette première étape engendre au sein du dit compartiment une ambiance dont le gradient thermique vertical est linéaire, et est commune aux essais en ventilation naturelle et mécanique. Par la suite, la ventilation mécanique est activée ou une surface de fuite est libérée. Un nouvel état stationnaire est alors atteint au bout d'environ 30 mn au débit de ventilation ou la surface d'amenée d'air choisi.

Un générateur de gouttelettes d'huile d'olive (modèle 9307-6 de TSI) est utilisé pour ensemençer l'air afin de réaliser les mesures SPIV. Le débit des particules est d'environ  $1000 \text{ L min}^{-1}$  avec un diamètre de particules compris entre  $0.5 \mu\text{m}$  et  $3 \mu\text{m}$ . Le protocole d'ensemencement a été défini afin de ne pas perturber le débit de ventilation ni générer de surpression dans les locaux. Comme le montre la Figure 3a, pour le mode de soufflage de l'étude de [6], les gouttelettes sont entraînées avec l'air extérieur en amont du ventilateur. En ventilation naturelle pour cette étude (voir la Figure 3b), les gouttelettes sont générées devant l'ouverture en partie basse et au niveau du plancher du local supérieur. Pour chaque configuration de ventilation mécanique ou naturelle, les compartiments supérieur et inférieur étaient donc ensemençés lors de l'obtention de l'état stationnaire, ce qui a permis de mesurer simultanément l'écoulement montant et descendant au niveau de l'orifice.

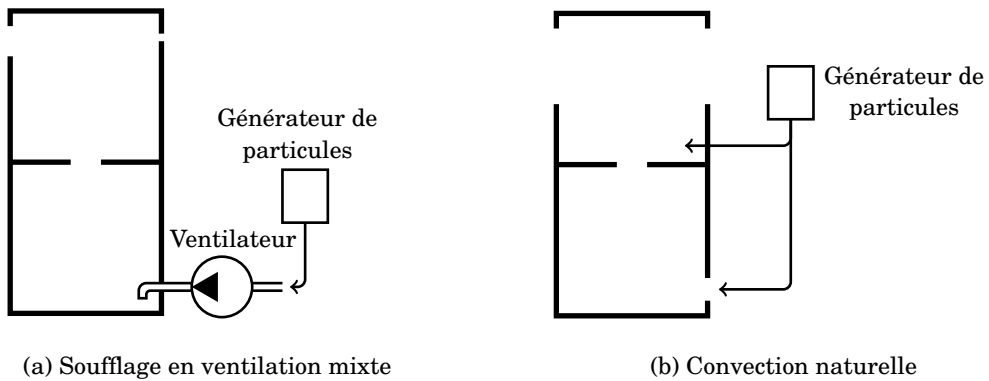


FIGURE 3: Protocole d'ensemencement (a) de l'étude de [6] en ventilation mécanique et (b) de la présente étude en ventilation naturelle.

## 3 Résultats

### 3.1 Étude de convergence à la moyenne

On s'intéresse dans cette étude à la mesure des débits moyens d'air chaud montant et d'air frais descendant à travers la trémie. L'intérêt se porte donc sur le champ de vitesse verticale  $w(x, y, t)$  obtenu par SPIV pour laquelle il convient de différencier les valeurs positives (fluide montant) et négative (fluide descendant). Le signal 2D  $w(x, y, t)$  étant discret, le débit montant (respectivement descendant) est donné par sommation des vitesses positives (respectivement négatives) multiplié par les surfaces élémentaires  $\Delta x \times \Delta y$  correspondantes. Pour réduire l'incertitude lié au calcul de la moyenne temporelle de ce débit, une étude de convergence a été menée. Cette étude permettant d'estimer le nombre minimum de doublets d'images nécessaires à l'obtention d'une valeur convergée, est basée sur la comparaison du débit moyenné sur  $n$  clichés consécutifs  $q_n$  par rapport au débit moyenné  $q_\infty$  qui aurait été obtenu en moyennant sur une infinité de clichés (on a considéré que 4000 clichés semblent suffire à l'évaluation de ce critère de convergence). Lors de ces études préliminaires, la convergence  $q_n = 0.975 q_\infty$  a été atteinte pour  $1600 < n < 1800$  clichés, pour un temps physique supérieur à 10 min. Dans les analyses qui suivent, les débits sont moyennés sur 2000 clichés.

### 3.2 Fiabilité des mesures SPIV

Une étude a été menée afin d'évaluer la fiabilité des mesures SPIV. Le débit massique net à travers l'orifice issu des mesures SPIV a été comparé au débit massique imposé par la ventilation mécanique. Ce premier débit massique a été calculé à partir de  $q(t)$  pondéré par la masse volumique de l'air ( $\rho^+$  pour l'écoulement montant et  $\rho^-$  pour l'écoulement descendant). Ces masses volumiques ont été estimées à partir des mesures de température. La comparaison entre le débit massique net à l'orifice  $\dot{m}_{net} = |q^+ \rho^+| - |q^- \rho^-|$  et le débit massique imposé par la ventilation  $\dot{m}_v = q_v \rho_v$  présente un accord satisfaisant dans la gamme de débits étudiés [6].

### 3.3 Analyse de l'écoulement en convection naturelle

Dans un premier temps, les écoulements obtenus pour un confinement total du local inférieur (sans ventilation et  $a_B = 0$ ) sont discutés. La Figure 4 présente une séquence de champs de vitesse instantanés  $w(x, y, t)$  successifs ( $\Delta t = 0.4s$ ). Les espaces occupés par les fluides montant et descendant migrent et se déforment au cours du temps au sein de la trémie. Cette variation temporelle de la physionomie de l'écoulement caractérise un certain taux d'instationnarité du phénomène. Les variations spatiales sont analysées à travers le changement de signe de la vitesse verticale  $w(x, y, t)$ . Au cours du temps, il n'existe aucun lieu où la vitesse soit toujours positive ou soit toujours négative. La section de passage des écoulements n'est pas stationnaire mais se déplace constamment au cours du temps. Ces observations rejoignent celles faites par [6] pour des conditions identiques (enceinte inférieure fermée).

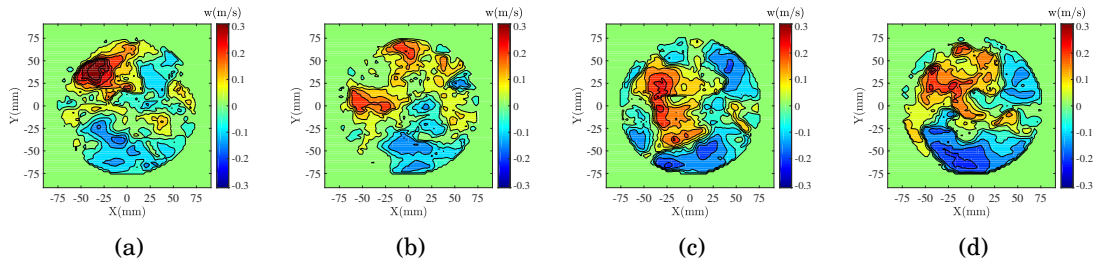


FIGURE 4: Champs de vitesse instantanées  $w(x, y, t)$  à différents instants consécutifs entre les images ( $\Delta t = 0.4s$ ) pour un diamètre de trémie  $D = 152$  mm et un confinement total.

Dans un second temps, l'influence de la section  $a_B$  sur l'écoulement est étudiée. Pour ce faire, des champs de vitesse moyennés sont calculés et présentés en Figure 5 pour trois sections de  $a_B$ .

Concernant l'organisation moyenne au cours du temps, l'analyse des champs  $w(x, y)$  présentés montre que les fluides montants et descendant ont tendance à être cantonné chacun dans un hémicycle de la trémie, ce qui contraste avec les observations de [6] qui observaient une tendance du fluide léger à monter dans la partie centrale de l'ouvrant et la fluide froid à s'écouler de façon annulaire au premier. Par ailleurs, l'augmentation de la section  $a_B$  contribue à réduire la section de l'écoulement descendant.

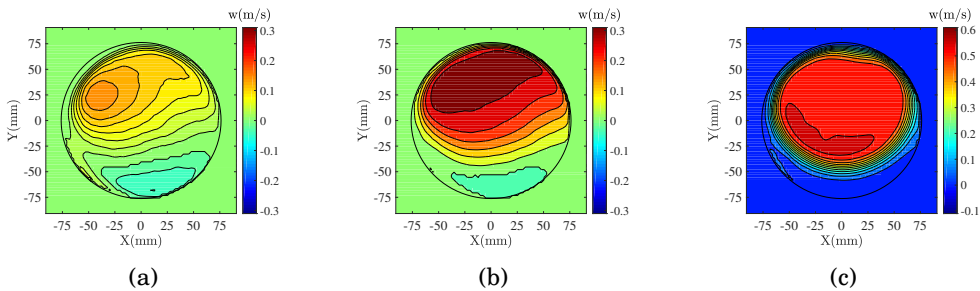


FIGURE 5: Champs de vitesse moyenné  $w(x, y)$  en  $\text{m s}^{-1}$  pour un diamètre  $D = 152$  mm et différentes surfaces d'entrée d'air  $a_B$  en  $\text{cm}^2$ . (a)  $a_B = 9 \text{ cm}^2$  ( $a_B/a_T = 0.05$ ), (b)  $a_B = 19 \text{ cm}^2$  ( $a_B/a_T = 0.10$ ) et (c)  $a_B = 50 \text{ cm}^2$  ( $a_B/a_T = 0.27$ ).

Pour chaque section d'arrivée d'air  $a_B$ , les débits massiques montant et descendant sont calculés et présentés sur la Figure 6a pour un diamètre de trémie de  $D = 152$  mm en fonction du ratio entre les surfaces de fuite et de l'orifice horizontal  $a_B/a_T$ . Pour une section nulle, les débits montant et descendant sont égaux. Avec l'augmentation de la section  $a_B$ , le débit montant croît et celui descendant diminue. La section critique pour laquelle l'écoulement descendant s'annule et l'ensemble de l'écoulement à la trémie devient alors uni-directionnel montant est obtenue pour une valeur de l'ordre de 15% de la section de la trémie ( $a_B/a_T \sim 0.15$ ). Au delà de cette valeur, le débit montant augmente à nouveau jusqu'à atteindre une valeur asymptotique et le débit descendant s'annule.

Ces résultats peuvent être comparés à ceux de Varrall et al. en ventilation forcée [6] et montrés en Figure 6b. Pour le régime bidirectionnel, l'évolution des débits (ascendant et descendant) en fonction de la surface  $a_B$  pour les expériences de convection naturelle et l'évolution des débits en fonction du débit de ventilation pour les expériences de convection forcée sont très semblables. La différence majeure concerne l'évolution du débit en régime mono-directionnel. En convection naturelle, celui-ci atteint une valeur asymptotique constante lorsque  $a_B$  augmente. Cette condition asymptotique s'observe dans un régime uni-directionnel en ventilation par déplacement dans le modèle de remplissage-vidange d'un local (voir [16] et [11]). En convection forcée, le débit augmente linéairement avec le débit de soufflage [6]. La zone de transition entre le régime bi-directionnel et le régime uni-directionnel est observée pour un débit massique montant à la trémie de l'ordre de 12 kg/h, et ce quelque soit le régime de ventilation (mécanique ou naturelle).

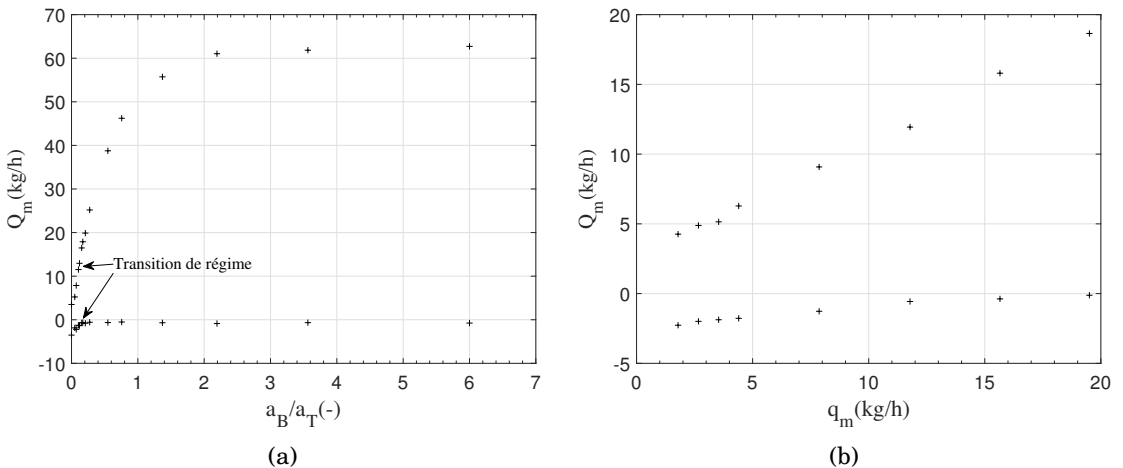


FIGURE 6: Comparaison entre l'évolution des débits massiques à la trémie en fonction du rapport  $a_B/a_T$  en ventilation naturelle en (a) et des débits massiques à la trémie en fonction du débit massique de soufflage en ventilation forcée de l'étude [6] en (b).

## 4 Conclusions

Cette étude traite de l'écoulement thermo-convectif à travers un orifice horizontal reliant deux compartiments superposés quand le compartiment inférieur contient un fluide de masse volumique inférieure à celle du fluide qui le surplombe. En l'absence de ventilation, l'écoulement à travers l'ouvrant est bi-directionnel et les flux échangés se compensent. Cette situation est déséquilibrée lorsque l'on considère une ventilation (mécanique ou naturelle), et l'accroissement d'intensité de cette ventilation fait passer l'écoulement de bi-directionnel à uni-directionnel. C'est cette phase de transition qui a été étudiée ici pour des expérimentations réalisées en ventilation naturelle et mécanique. Pour cela des mesures SPIV ont été effectuées sur un dispositif à échelle réduite. La flottabilité est induite par une résistance chauffante et les mesures SPIV sont réalisées à fleur de l'orifice dans le compartiment supérieur. L'analyse des champs de vitesse verticale permet de constater que l'écoulement présente une instationarité géométrique dans l'organisation des fluides montant et descendant, mais qu'ils tendent en moyenne à

s'organiser distinctement. L'analyse des débits montant et descendant montre une forte similitude entre les écoulements de convection naturelle et de convection forcée dans le régime bi-directionnel.

## Références

- [1] I. Horvath, J. van Beeck, and J-M Buchlin. Large-scale particle image velocimetry on a full-scale pool fire. *16th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, 2012.
- [2] B. Giachetti, D. Couton, and F. Plourde. Smoke spreading analysis from an experimental subway scale model. *Fire Safety Journal*, 86 :75–82, 2016.
- [3] F. Morandini, X. Silvani, J-L. Dupuy, and A. Susset. Fire spread across a sloping fuel bed : Flame dynamics and heat transfers. *Combustion and Flame*, 190 :158–170, 2018.
- [4] R.A. Bryant. 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.
- [5] A Koched, H Pretrel, O Vauquelin, and L Audouin. Experimental determination of the discharge flow coefficient at a doorway for fire induced flow in natural and mixed convection. *Fire and Materials*, 40(1) :114–128, 2016.
- [6] K. Varrall, H. Pretrel, and O. Vaux, S.and Vauquelin. Stereoscopic particle image velocimetry investigations of the mixed convection exchange flow through a horizontal vent. *Experiments in Fluids*, 58(10) :151, 2017.
- [7] M. Epstein. Buoyancy-driven exchange flow through small openings in horizontal partitions. *Journal of Heat Transfer*, 110(4a) :885–893, 1988.
- [8] M. Epstein and M.A. Kenton. Combined natural convection and forced flow through small openings in a horizontal partition, with special reference to flows in multicompartement enclosures. *Journal of Heat Transfer*, 111(4) :980–987, 1989.
- [9] T.A. Conover, R. Kumar, and J.S. Kapat. Buoyant pulsating exchange flow through a vent. *Journal of Heat Transfer*, 117(3) :641–648, 1995.
- [10] Z. Li. *Characteristics of buoyancy driven natural ventilation through horizontal openings*. PhD thesis, Aalborg University, 2007.
- [11] G.R. Hunt and C.J. Coffey. Emptying boxes-classifying transient natural ventilation flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 646 :137–168, 2010.
- [12] L.Y. Cooper. *Calculation of the flow through a horizontal ceiling / floor vent An algorithm and associated computer subroutine for calculating flow through a horizontal ceiling / floor vent in a zone-type compartment fire model*. NIST, 1990.
- [13] L.Y. Cooper. Combined buoyancy and pressure-driven flow through a shallow, horizontal, circular vent. *Journal of Heat Transfer*, 117(3) :659–667, 1995.
- [14] H.W. Emmons. The calculation of a fire in a large building. *Journal of Heat Transfer*, 105(1) :151–158, 1983.
- [15] K. Varrall, H. Pretrel, S. Vaux, and O. Vauquelin. Stereoscopic particle image velocimetry investigation of the bidirectional natural convection flow through a horizontal vent. *Fire Technology*, 52(6) :2027–2041, 2016.
- [16] P.F. Linden, G.F. Lane-Serff, and D.A. Smeed. Emptying filling boxes : The fluid mechanics of natural ventilation. *Journal of Fluid Mechanics*, 212 :309–335, 1990.