

VISUALISATION ET MESURE DU FLUX D'ASPIRATION D'UNE SORBONNE

R. Schuster^{1,2,3}, D. Heitz^{2,3}, E. Mémin³

¹ Institut Technique des Gaz et de l'Air (ITGA), Saint-Grégoire Cedex 35768, France

² Institut National de Recherche en Sciences et Techniques pour l'Environnement et l'Agriculture (Irstea), UR OPAALE, Rennes Cedex F-35044, France

³ Institut National de Recherche en Informatique et Automatique (INRIA), Equipe FLUMINANCE, Campus universitaire de Beaulieu, Rennes Cedex 35042, France

1. INTRODUCTION

1.1. Sorbonne de laboratoire et contexte normatif

La sorbonne de laboratoire est un système de protection localisée généralement utilisé dans des lieux où des substances dangereuses sont manipulées. Sa mission est de limiter l'exposition des humains à ces substances nocives en captant et évacuant les vapeurs toxiques et autres poussières volatiles générées dans son enceinte et ce grâce à un flux d'aspiration d'air. Pour s'assurer du maintien de leurs performances au cours du temps les sorbonnes de laboratoire font l'objet de contrôles périodiques. Actuellement l'évaluation du fonctionnement des sorbonnes de laboratoire est soumise à la norme européenne EN 14175. Cette norme détaille la méthodologie à suivre pour évaluer les performances auxquelles doivent répondre les sorbonnes de laboratoire lors des essais de qualification, de réception ou de routine. Ainsi, lors d'un contrôle, des essais de vitesse d'air frontale à l'entrée de la sorbonne doivent être menés par anémométrie à fil chaud. De même un test de confinement au gaz traceur SF₆ doit aussi être réalisé ainsi qu'une visualisation qualitative de flux au fumigène. Or il a été montré par l'INRS qu'une conformité de la vitesse aux recommandations de la norme n'impliquait pas nécessairement une conformité au confinement (Dessagne et al., 2009), qui est le critère le plus discriminant pour juger du caractère protecteur d'une sorbonne. De ce fait il est apparu évident que les essais de vitesses d'air stipulés par la norme n'étaient pas forcément pertinents étant donné leur caractère éparse et moyenné. Par conséquent une visualisation et un suivi temporel de la distribution spatiale de la vitesse du flux d'aspiration apporterait une information plus complète sur le fonctionnement de la sorbonne. Ceci permettrait a priori de faciliter la détection/localisation de fuites ou de potentiels dysfonctionnements.

1.2. Méthode basée image pour la mesure et la visualisation de flux d'air

Pour réaliser une mesure spatiale instantanée de la vitesse de l'air, nous avons recours à ce qu'on appelle une méthode basée image. Concrètement il s'agit d'introduire un traceur (particules ou fumée dense) dans l'écoulement et de suivre les déplacements de ce traceur pour en déduire le mouvement sous-jacent de l'air qui le transporte. Pour mettre en évidence le traceur en question on l'éclaire avec une fine nappe de lumière qui va définir le plan de mesure. Dans le même temps une caméra faisant face au plan de mesure enregistre des images successives du traceur éclairé. Pour obtenir une mesure il faut pouvoir calculer précisément les déplacements du traceur entre images successives ce qui est rendu possible grâce à des algorithmes d'estimation de mouvement comme la corrélation (Raffel et al., 2018) ou le flot optique (Heitz et al., 2010). Une fois les déplacements du traceur calculés sur l'ensemble de l'image il est alors facile de remonter

au champ de vitesse sur la zone captée par l'image. L'intérêt d'une telle méthode est qu'elle est non-intrusive dans la mesure où le traceur ne perturbe pas l'écoulement. De plus elle permet de retrouver la vitesse sur toute la zone couverte par la caméra en une seule prise, là où il faudrait employer plusieurs sondes fil chaud pour réaliser la même mesure spatiale.

A notre connaissance le comportement aérodynamique de sorbonnes a déjà été exploré qualitativement par certaines études en utilisant la visualisation de fumée par tranche laser (Tseng et al., 2006; Chen, 2016). Si les observations faites dans ces travaux ont permis de mettre en évidence des structures tourbillonnaires, elles n'ont en revanche pas été jusqu'à la mesure quantifiée. En parallèle une étude numérique a aussi été réalisée pour caractériser l'écoulement généré par une sorbonne (Pietrowicz et al., 2018). Hormis ces travaux, aucune caractérisation expérimentale quantifiée n'a été relevée à ce jour.

Dans cet article nous souhaitons donc démontrer la faisabilité d'une mesure spatio-temporelle grand champ in situ du flux d'aspiration d'une sorbonne en conditions réelles de fonctionnement par le biais d'une méthode image.

2. MATERIEL ET METHODE

L'objectif de la campagne de mesures réalisée a été d'obtenir le champ de vitesse du flux d'aspiration d'une sorbonne de laboratoire suivant un plan vertical, perpendiculaire à sa façade d'entrée. La sorbonne de laboratoire qui a servi pour cette expérimentation est située dans les locaux d'Irstea-Rennes, et est toujours en service actuellement. Pour définir le plan de mesure, nous avons utilisé comme éclairage une rampe à LEDs couplée à une lentille de Fresnel linéaire. Ce système développé en partenariat avec la société EFFILUX, émet une nappe de lumière d'environ 1 cm d'épaisseur, 1.20 m de hauteur et dont la longueur d'onde d'émission est centrée autour de 462 nm. Dans notre configuration la rampe est positionnée verticalement comme le montre le schéma du dispositif expérimental illustré en **figure 1**.

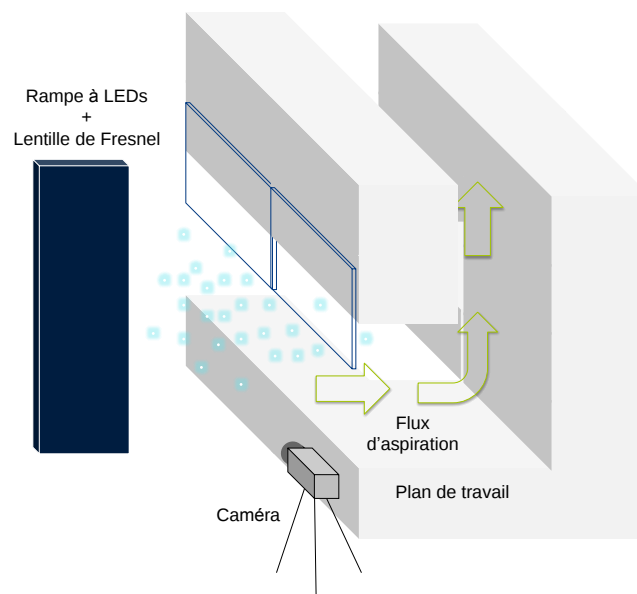


Figure 1 – Schéma du dispositif expérimental.

Concernant le traceur nous avons utilisé des bulles de savon gonflées à l'hélium (Helium Filled Soap Bubbles, HFSB). Pour produire ces bulles nous avons utilisé le générateur développé par la société LaVision. Ce système génère des bulles d'un diamètre de 300 μm à flottabilité neutre (Scarano et al., 2015). Nous avons introduit le traceur dans la pièce où se situe la sorbonne, en amont de la zone d'intérêt et dans l'axe de la nappe de

lumière. Pour l'acquisition des images nous avons utilisé une caméra Photron 1024 × 1024 pixel² enregistrant des images 16-bit à une fréquence fixée à 125 Hz. La mesure étant réalisée in situ nous étions contraints par la géométrie de la pièce pour le positionnement de la caméra ce qui explique que le champ d'observation soit limité notamment à l'intérieur de l'enceinte où le fond est tronqué (voir **figure 2**). Pour cette étude la sorbonne a été vidée de son matériel. Comme on peut le voir sur la figure 2 (photo de gauche) la pièce a dû être plongée dans l'obscurité mais aucun fond noir n'a été utilisé avec l'ensemencement HFSB. En effet les bulles ont la propriété de très bien rétro-diffuser la lumière et d'être distinguable même en cas de fond clair. L'une des difficultés majeure rencontrée lors de cette expérience in situ a été de confiner le traceur dans l'axe de la nappe lumière.

Pour le calcul des déplacements du traceur entre images successives, nous avons développé notre propre algorithme de flot optique. L'ensemble de la méthode (traceurs + éclairage LEDs + caméra Photron + algorithme, cf. **figure 3**) a été éprouvé en soufflerie sur des écoulements maîtrisés et a donné des résultats convaincants (Schuster et al., 2018), démontrant ainsi la fiabilité de la mesure.

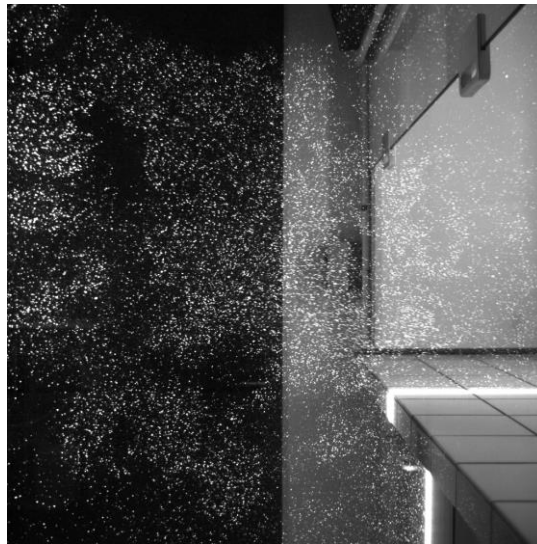


Figure 2 – Image de l'écoulement ensemencé avec des bulles éclairées par la nappe de lumière.

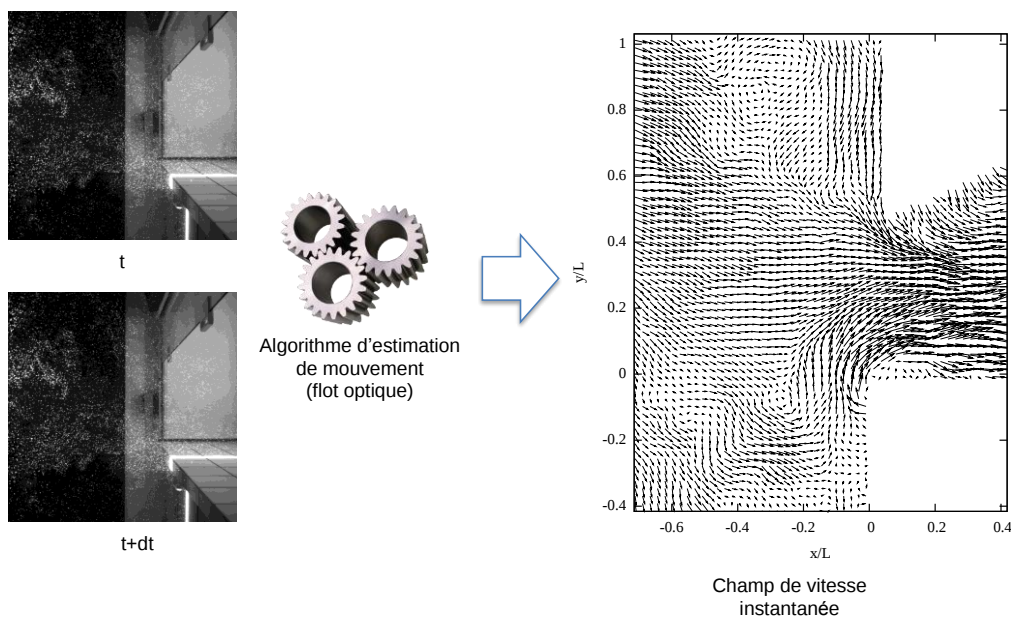


Figure 3 – Schéma récapitulatif du fonctionnement de la méthode.

3. RESULTATS

3.1. Analyse statistique

Les mesures ont été effectuées pour deux hauteurs $H = 500$ mm et $H = 350$ mm d'ouverture de la façade vitrée coulissante. En effet tous les opérateurs ne travaillant pas nécessairement avec la même surface d'ouverture, il est intéressant de voir l'effet de ce paramètre sur l'écoulement d'aspiration.

Nous avons enregistré pour chaque hauteur d'ouverture des séquences de 3000 images. Dans chacune de ces séquences, chaque couple d'images consécutives fournit un champ de vitesse instantanée à deux composantes, $\mathbf{v}(x, y, t) = (u(x, y, t), v(x, y, t))$. Ainsi pour chaque séquence nous avons calculé le champ moyen $\langle \mathbf{v} \rangle$ à partir de l'ensemble des champs instantanés.

La **figure 4** montre les champs de vitesse moyenne estimés pour les deux hauteurs d'ouverture. Les axes sont adimensionnés par la profondeur $L = 700$ mm de la sorbonne. La couleur représente la norme du vecteur vitesse adimensionnée par une vitesse $U_s = 0.4 \text{ m.s}^{-1}$ (vitesse arbitraire correspondant au seuil minimal généralement recommandé pour une sorbonne). Nous pouvons voir sur les deux cartes que la vitesse augmente à mesure que l'on approche de l'entrée de la sorbonne et qu'elle atteint son maximum à l'intérieur de l'enceinte ($x/L \geq 0$). Nous constatons que cette accélération est nettement plus marquée avec une hauteur d'ouverture $H = 350$ mm ($\|\langle \mathbf{v} \rangle\|/U_s \geq 1$) qu'avec une hauteur $H = 500$ mm ($\|\langle \mathbf{v} \rangle\|/U_s \leq 1$).

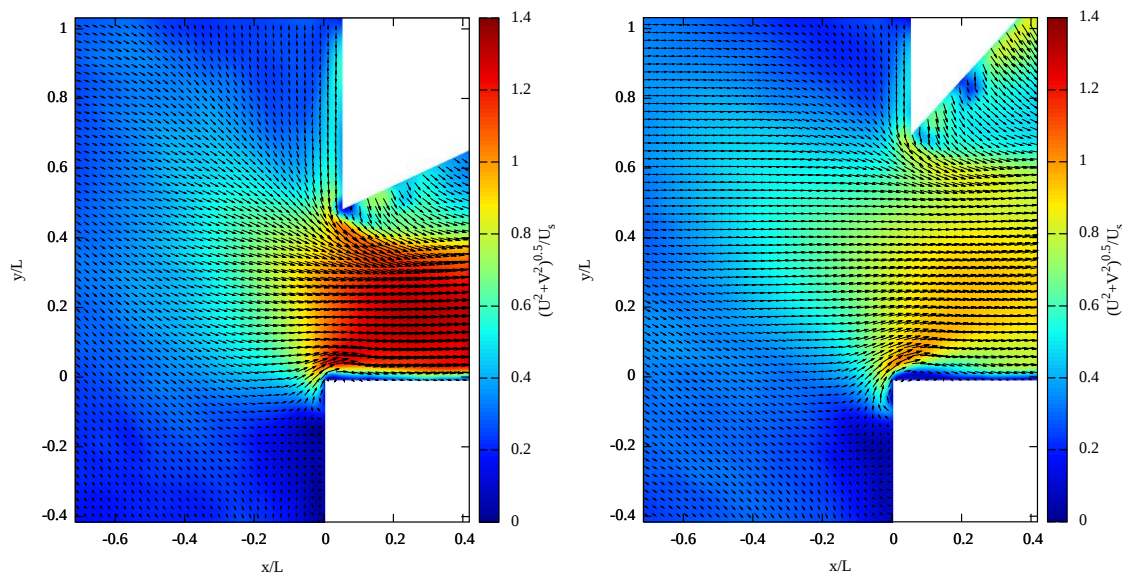


Figure 4 – Champs de vitesse moyenne pour des hauteurs d'ouverture $H = 350$ mm (gauche) et $H = 500$ mm (droite).

La vitesse d'aspiration varie donc avec la hauteur d'ouverture. Selon nous cette différence de vitesse s'explique par la conservation du débit. Cependant certaines sorbannes ajustent automatiquement la fréquence de leur ventilateur en fonction de la hauteur d'ouverture afin de conserver une vitesse d'aspiration constante quelque soit la hauteur d'ouverture.

Sur la **figure 5** nous présentons les cartographies de l'intensité de turbulence $\langle u'^2 \rangle / U_s^2$ estimée, où $u'(t) = u(t) - \langle u \rangle$ est la fluctuation instantanée de la vitesse par rapport à sa moyenne. Nous distinguons pour les deux hauteurs une forte zone de turbulence au niveau du bord du plan de travail ($y/L = 0$). Cette zone est plus prononcée et étendue pour une hauteur de 350 mm que pour une hauteur de 500 mm. Par ailleurs, pour $H = 350$ mm nous observons une autre zone de turbulence qui se développe dans le

sillage du bord inférieur de la façade coulissante. La hauteur d'ouverture influe donc aussi sur l'intensité turbulente de l'écoulement.

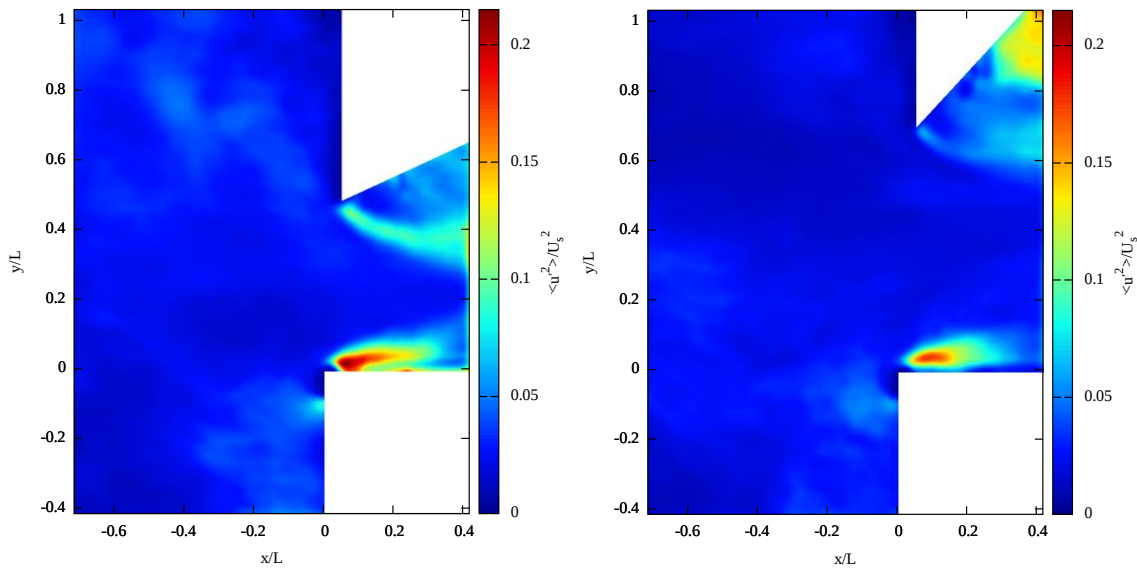


Figure 5 – Cartographies de l'intensité de turbulence pour des hauteurs d'ouverture H = 350 mm (gauche) et H = 500 mm (droite).

Sur la **figure 6** nous affichons les cartes de vorticité moyenne. La vorticité étant définie par $\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$, elle indique le caractère localement tourbillonnaire de l'écoulement. Comme nous pouvons le constater nous avons une zone de vorticité négative qui débute au bord du plan de travail ($x/L = 0$, $y/L = 0$) et s'étend ensuite dans la profondeur délimitant la couche limite du plan de travail. Une autre zone de vorticité, positive cette fois, est identifiable au niveau du bord inférieur de la façade coulissante ($x/L \approx 0.05$, $y/L \approx 0.5$ pour $H = 350$ mm et $y/L \approx 0.7$ pour $H = 500$ mm). Ces zones de vorticité coïncident avec les zones de turbulence identifiées plus haut et sont liées à la géométrie de la sorbonne. Selon leur position et leur intensité ces zones de vorticité peuvent engendrer la stagnation de contaminants voire même leur éjection en dehors de la sorbonne.

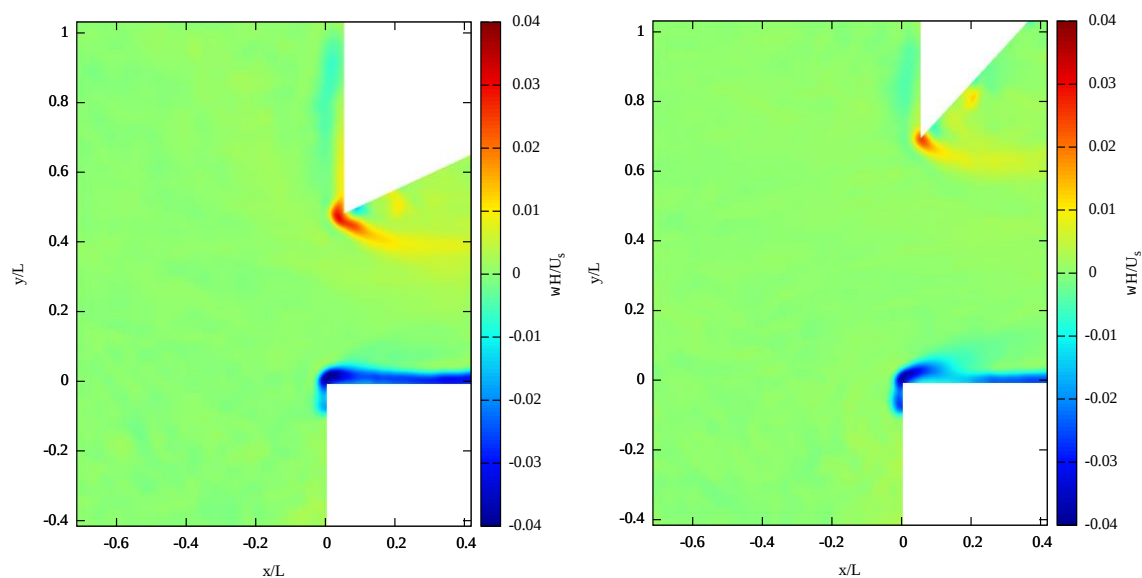
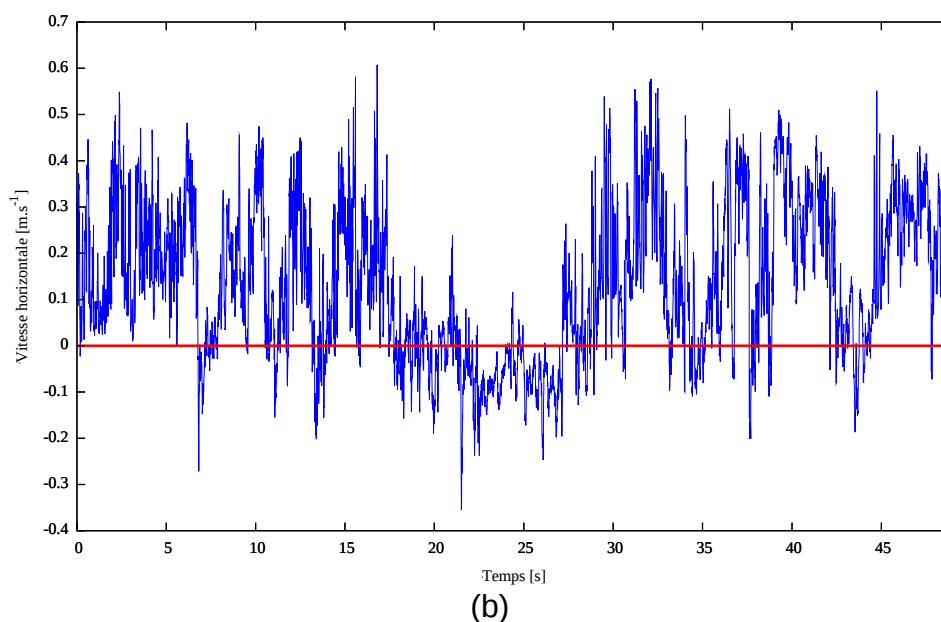
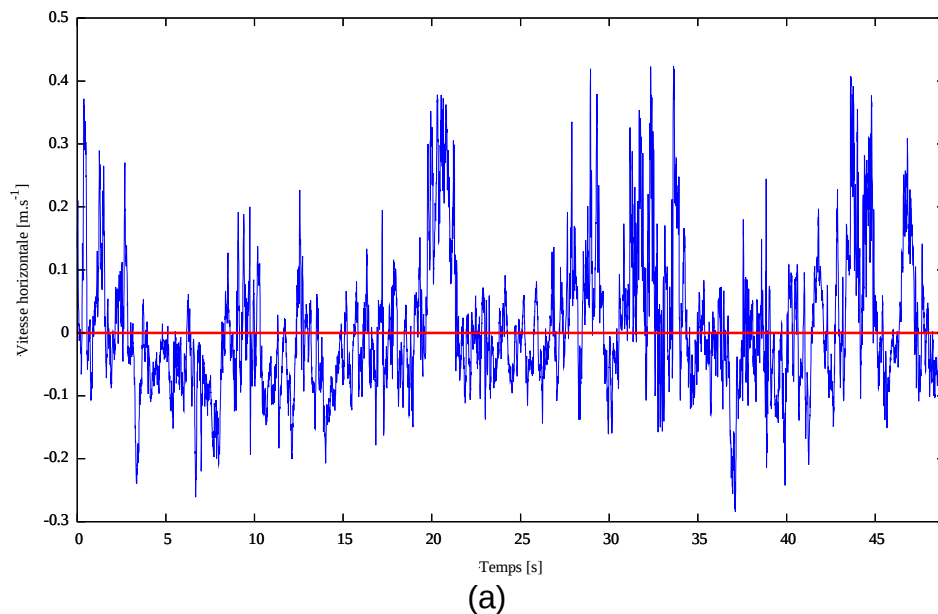


Figure 6 – Cartographies de vorticité moyenne pour des hauteurs d'ouverture H = 350 mm (gauche) et H = 500 mm (droite).

3.2. Analyse temporelle localisée

Notre méthode a aussi l'avantage de fournir une mesure instantanée qui permet de suivre la dynamique de l'écoulement. Cette analyse dynamique permet de repérer d'éventuels dysfonctionnements qui ne sautent pas naturellement aux yeux avec une simple analyse statistique.

Sur la **figure 7** nous avons tracé l'évolution temporelle de la vitesse horizontale $u(t)$ mesurée à la position longitudinale de la fenêtre coulissante ($x/L \approx 0.05$) pour des positions verticales proches du plan de travail ($y/L = 0.006$) et proches du bord inférieur de la façade coulissante ($y/L = 0.48$ pour $H = 350$ mm). Ce sont des positions où l'écoulement est le plus perturbé (cf. **figure 5**) et qui correspondent à des zones critiques (à proximité des sources d'émission de contaminants ou à proximité de la zone de respiration du laborantin). Comme nous pouvons le voir la vitesse mesurée devient négative par moments (i.e. orientée vers l'extérieur de la sorbonne) ce qui peut présenter un danger de fuite de polluants. Au niveau du plan de travail les passages en négatif sont plus fréquents pour une ouverture $H = 500$ mm (**figure 7(a)**) que pour une ouverture $H = 350$ mm (**figure 7(b)**).



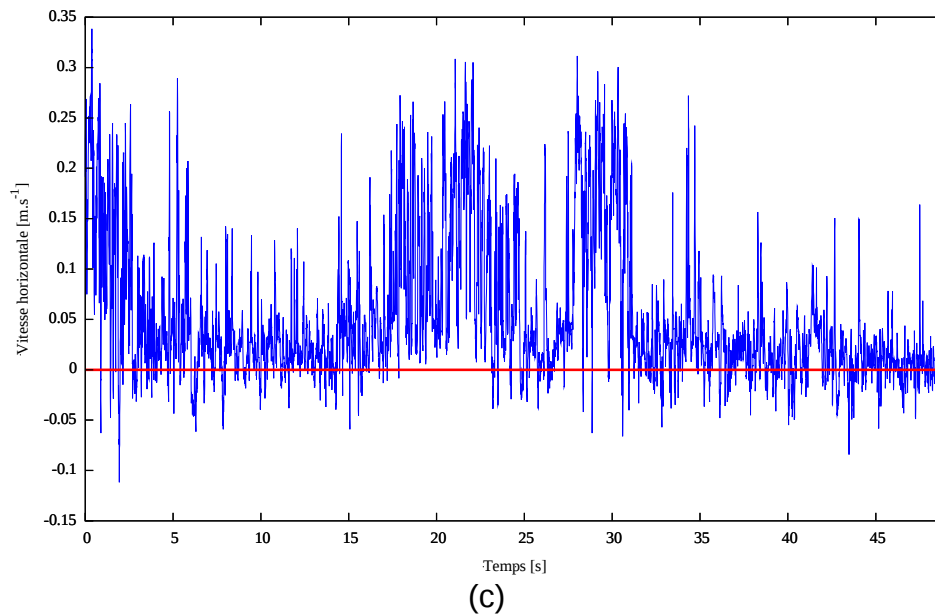


Figure 7 – Suivi temporel de la vitesse horizontale [m.s⁻¹]: pour une ouverture H de 500 mm - y/L = 0.006 (a), pour une ouverture H de 350 mm - y/L = 0.006 (b) et y/L = 0.48 (c).

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

A travers cette étude nous avons montré qu'il était possible de mener sur le terrain une mesure basée image grand champ pour caractériser à grande échelle le flux d'aspiration d'une sorbonne de laboratoire en conditions réelles de fonctionnement. Cette campagne exploratoire de mesures a été réalisée pour un plan vertical, orthogonal à l'entrée d'air de la sorbonne. Nous avons utilisé comme traceurs des bulles de savon gonflées à l'hélium.

La mesure obtenue avec cet ensemencement s'est révélée plutôt satisfaisante : grâce à notre méthode, nous avons été capable d'obtenir le champ de vitesse d'air, résolu en temps, sur une large zone d'intérêt. A partir des séquences de champs instantanés, nous avons pu calculer le champ de vitesse moyenne pour différentes hauteurs d'ouverture de la façade vitrée et ainsi évaluer l'influence de ce paramètre. Nous avons aussi confronté les résultats obtenus avec notre méthode à des mesures anémométriques au fil chaud en certains points (pas montré dans cet article, cf. Schuster et al., (2019)). La méthode basée image semble plus avantageuse que le fil chaud puisque pour une précision comparable, nous sommes capables de retrouver la distribution de vitesse à deux composantes avec une bonne résolution spatiale et temporelle sur un plan quand avec le fil chaud nous n'avons qu'une composante en quelques points de mesure dispersés.

Comme nous l'avons vu nous avons aussi été en mesure de quantifier et de cartographier l'intensité de turbulence de l'écoulement ainsi que sa vorticité. Ces informations permettent de repérer les zones d'instabilité et de recirculation du fluide. Elles sont généralement liées aux caractéristiques géométriques de la sorbonne. Selon leur localisation et leur force, ces instabilités peuvent être la source de fuites de contaminant. Outre l'aspect sanitaire, la présence de zones d'agitation causées par des obstacles saillants qui s'opposent au fluide peut dégrader l'efficacité énergétique de la sorbonne.

Toutes ces informations obtenues par la méthode image apportent donc une meilleure compréhension des installations de ventilation en général et peuvent aider à améliorer leur contrôle et leur conception dans l'optique d'optimiser leur efficacité.

Pour approfondir la caractérisation de la sorbonne, il serait intéressant d'effectuer une mesure image suivant plusieurs plans (verticaux et horizontaux) afin d'avoir une cartographie tridimensionnelle exhaustive de l'écoulement à la manière des travaux de

Li et al., (2015) ou de Pietrowicz et al., (2018). L'influence de la présence d'un opérateur, modélisée par un mannequin thermique, gagnerait aussi à être étudiée pour avoir une mesure dans un contexte d'utilisation de la sorbonne plus réaliste. En ce qui concerne le matériel utilisé, l'utilisation de caméras grands publics bon marché est une piste à envisager. En effet les flux aérauliques étant assez lents, les fréquences d'acquisition de ces caméras peuvent suffire pour ce genre d'application.

Pour conclure, cette étude nous laisse penser que la méthode développée pourrait être appliquée dans le cadre d'évaluation des performances de sorbonnes ou d'autres systèmes de ventilation au sein des bâtiments. Selon nous elle fournit une caractérisation de l'écoulement plus complète que les contrôles périodiques actuellement en vigueur basés sur des mesures ponctuelles moyennées par anémométrie à fil chaud.

5. REFERENCES

J.K. Chen (2016), Installation of a flow control device in an inclined air-curtain fume hood to control wake-induced exposure, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, p. 588-597

J.-M. Dessagne et J. Triolet (2009), Sorbonnes de laboratoire, Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS)

D. Heitz, E. Mémin et C. Schnörr (2010), Variational fluid flow measurements from image sequences: synopsis and perspectives, *Experiments in Fluids*, p. 369–393

J. Li, X. Cao, J. Liu, C. Wang et Y. Zhang (2015), Global airflow field distribution in a cabin mock-up measured via large-scale 2D-PIV, *Building and Environment*, p. 234-244

S. Pietrowicz, P. Kolasinski et M. Pomorski (2018), Experimental and numerical flow analysis and design optimization of a fume hood using the CFD method, *Chemical Engineering Research and Design*, p. 627-643

M. Raffel, C.E. Willert, F. Scarano, C.J. Kähler, S.T. Wereley et J. Kompenhans (2018), *Particle Image Velocimetry*, New York, NY : Springer Berlin Heidelberg

F. Scarano, S. Ghaemi, G.C.A. Caridi, J. Bosbach, U. Dierksheide et A. Sciacchitano (2015), On the use of helium-filled soap bubbles for large-scale tomographic PIV in wind tunnel experiments, *Experiments in Fluids*, p. 42-53

R. Schuster, D. Heitz et E. Mémin (2018), Motion Estimation under Location Uncertainty, Application to Large-scale Characterization of a Mixing Layer, *Proceedings of the 19th International Symposium on the Application of Laser and Imaging Techniques to Fluid Mechanics*, Lisbonne, Portugal

R. Schuster, D. Heitz, P. Georgeault et E. Mémin (2019), On-site airflow measurement of a laboratory fume hood using customized large-scale image-based velocimetry, *Indoor and Built Environment* (article soumis, en attente de révision)

L.C. Tseng, R.F. Huang, C.C. Chen et C.P. Chang (2006), Correlation Between Airflow Patterns and Performance of a Laboratory Fume Hood, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, p. 694-706