

Etude expérimentale préliminaire de l'influence d'un dispositif passif sur le développement d'un panache thermique

Vincent DAURENJOU*, Florian MOREAU, Didier SAURY

Institut Pprime UPR CNRS 3346, CNRS - ENSMA - Université de Poitiers
Téléport 2, 1 Avenue Clément Ader, BP40109, F-86961 Futuroscope Cedex, France
*vincent.daurenjou@ensma.fr

Résumé - Un panache thermique est généré au sein d'une cavité cubique de 1 m d'arête. Un dispositif passif est placé à la base du panache. Ce dispositif est constitué de huit ailettes sur lesquelles une plaque est positionnée. L'objectif est d'étudier l'influence de la présence de ce dispositif et de l'orientation des ailettes sur le développement du panache. Cette étude expérimentale préliminaire caractérise ainsi la dynamique du panache pour plusieurs configurations (avec et sans dispositif). Elle s'appuie sur des mesures de vitesse réalisées par PIV dans le plan vertical médian de la cavité ainsi que dans divers plans horizontaux.

Nomenclature

| | | | |
|------------------|--|-----------------------------|---|
| A_D | rapport de forme, $A_D = D/H$ | <i>Symboles grecs</i> | |
| D | diamètre de la source, m | α | diffusivité thermique, $m^2.s^{-1}$ |
| H | hauteur de l'enceinte, m | ε | émissivité thermique |
| Ra_D | nombre de Rayleigh, $\frac{g\beta\Delta T D^3}{\alpha\nu}$ | λ | conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$ |
| T | température, °C | ν | viscosité cinématique, $m^2.s^{-1}$ |
| \vec{u} | vecteur vitesse moyenne, $m.s^{-1}$ | | |
| $\overline{u_z}$ | composante verticale de vitesse moyenne sur l'axe du panache, $m.s^{-1}$ | <i>Indices et exposants</i> | |
| x, y, z | coordonnées cartésiennes, m | <i>amb</i> | ambient |

1. Introduction

Les écoulements de convection naturelle sont des types d'écoulements présents lorsqu'une masse de fluide se différencie de son environnement du fait d'une masse volumique distincte et de l'action résultante de la force de flottabilité. Cette dernière a alors pour effet d'élever (respectivement de descendre) le fluide dont le poids est plus faible (respectivement plus grand) que celui généré par un volume identique de fluide. Cette étude porte plus précisément sur des panaches. Ce sont des écoulements de convection naturelle se présentant sous la forme d'une colonne de fluide. Ils apparaissent lorsqu'une source de température horizontale (cylindre, plaque, etc...) chauffe (ou refroidit) un fluide environnant de température plus basse (resp. plus élevée). On les retrouve couramment dans la nature et dans de nombreux domaines industriels. L'origine physique de ce type d'écoulement, à savoir la présence d'un gradient thermique dans l'écoulement, a pour conséquence un fort couplage entre les champs de vitesse et de température ainsi qu'une forte sensibilité aux conditions limites et initiales.

L'objet de ce travail est d'étudier l'effet de l'ajout d'un dispositif passif à la source du panache sur le développement de celui-ci. Ce dispositif est pensé de sorte à tenter de créer un effet de rotation dans le panache. Faire cela passivement serait très utile car nous savons d'après la littérature (voir [1], par exemple) que lorsque la rotation du panache est suffisamment élevée, la

transition à la turbulence est plus précoce. Le mélange est alors augmenté. Ainsi, les échanges thermiques devraient être accrus. Cela permettrait de modifier passivement les transferts thermiques entre une paroi chaude et l'air extérieur. Le fait que ce dispositif soit passif le rend plus robuste qu'un dispositif actif, susceptible de tomber en panne. Cela est intéressant pour des applications dont la maintenance est complexe à entreprendre. De plus, comme il est passif, ce dispositif n'a pas besoin d'apport externe d'énergie pour fonctionner. Cela rendrait ainsi l'ensemble plus sobre.

Dans ce travail expérimental, le panache est généré dans une cavité cubique. Cela permet d'une part de bien contrôler les conditions aux limites du système et d'autre part, de fortement limiter les transferts de masse ou thermiques provenant de l'extérieur et perturbant le développement du panache.

Plusieurs études expérimentales et numériques portent sur la caractérisation d'un panache thermique d'air confiné en cavité. Pham et al. ont notamment proposé une série de trois études sur ce thème. La première [2] concerne la caractérisation du développement d'un panache thermique dans une configuration classique consistant en une cavité cubique de 2 m d'arête. La seconde [3] compare ces mesures avec une simulation numérique modélisant le même panache avec différentes approches (modèle de Smagorinsky classique, modèles lagrangiens). Enfin, la dernière [1] porte sur l'effet de la rotation de la source sur le développement du panache. Cette étude montre en particulier que la rotation de la source engendre à partir d'un certain seuil des effets importants sur le développement du panache. D'une part, la transition du régime laminaire au régime turbulent est plus précoce. D'autre part, les phases de contraction et d'expansion du panache sont accentuées ce qui accroît l'effet d'entraînement. Les transferts de masse et de chaleur sont donc amplifiés. La rotation du panache peut ainsi a priori être un moyen de dissiper plus efficacement la chaleur. Saeed et al [4] ont cherché quant à eux à mieux comprendre la nature physique des phénomènes en jeu dans le développement du panache thermique. Ils ont procédé tout d'abord à une analyse théorique des équations gouvernant la physique du panache. Ensuite, ils ont confronté cette analyse avec des expériences préalablement conduites dans la littérature. Ils ont notamment étudié le rôle que jouent la force de flottabilité et le mécanisme d'entraînement. Enfin, Chen et al [5] se sont intéressés numériquement à la dynamique de la vorticité dans le panache et le rôle de cette dernière.

La première partie de ce papier est consacr e à la description du dispositif expérimental et de la métrologie utilis e. La seconde partie est d di e à la caractérisation du panache dans le plan médian vertical avec et sans le dispositif passif. Enfin la dernière partie traite de la caractérisation du panache mais cette fois-ci dans divers plans horizontaux.

2. Dispositif expérimental et métrologie

2.1. Dispositif expérimental

Cette étude porte sur le développement d'un panache thermique confiné dans une cavité cubique d'1 m³. Le montage expérimental est représenté en figure 1(a). Deux échangeurs à eau maintiennent les parois latérales en aluminium à $T = T_{amb}$. Les parois hautes et basses sont isol es à l'aide de styrodur (polystyrène extrudé de conductivité $\lambda = 0,035 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$). Leur émissivité ε est de l'ordre de 0,6 . Les parois avant et arrière sont quant à elles constitu es de grandes vitres à double vitrage.

Un cylindre en aluminium de $D = 4 \text{ cm}$ de diamètre et d'1 cm d'épaisseur est placé au centre de la cavité. Il est incrusté dans un pavé d'isolant en Siporex de dimension $15 \times 15 \times$

5 cm³. Il est chauffé à une température supérieure à l'air ambiant de 130°C (soit environ 150°C avec les conditions usuelles de la salle). Néanmoins, il n'est pas porté au-delà afin de limiter la dégradation des particules d'ensemencement utilisées. En effet, ce phénomène est observé nettement vers 200°C. La température est régulée au moyen d'un boîtier de régulation type TOR (Tout ou Rien). Cela correspond ici à un nombre de Rayleigh $Ra_D = 8,5 \times 10^5$ pour un rapport de forme $A_D = D/H = 0,04$.

Le dispositif passif est posé sur la surface supérieure du bloc d'isolant dans lequel est incrustée la source, à la base de la génération du panache. Il est composé de huit ailettes en PVC disposées radialement autour de la source cylindrique. Une plaque en PVC est positionnée sur les ailettes. Elle est destinée à amplifier l'entraînement d'air à la base du panache. Deux configurations sont étudiées : l'une avec les ailettes orientées radialement autour de la source nommée "Ailettes radiales", l'autre avec les ailettes orientées de façon tangentielle, "Ailettes tangentes". Enfin, une troisième configuration sans le dispositif est analysée comme référence. Cela permet d'avoir une configuration qui peut être comparée à la littérature. L'espace entre deux ailettes successives est de 1 cm. Le schéma de la figure 1(b) représente les trois configurations étudiées.

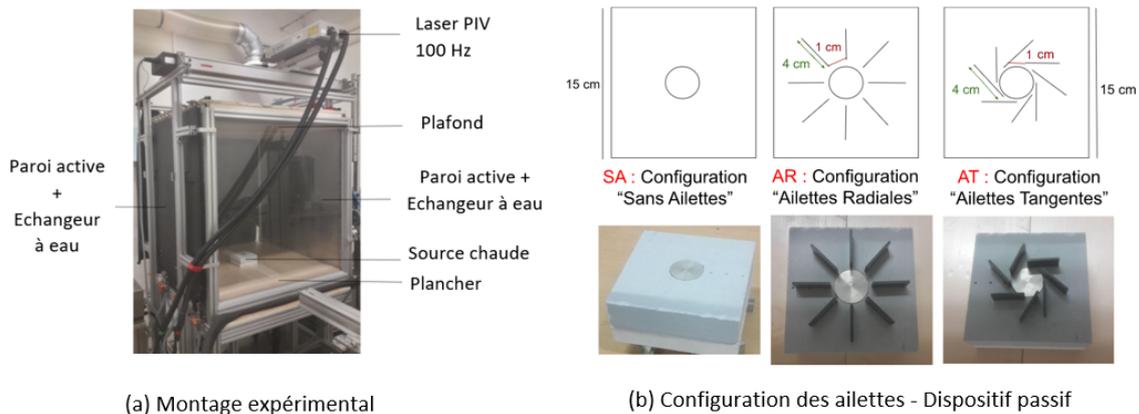


Figure 1 : Montage expérimental et dispositif passif

2.2. Mesures de vitesses par PIV

Les mesures du champ de vitesse sont effectuées par vélocimétrie par images de particules (PIV). Un laser de type Nd-YAG Litron à double tête est utilisé. Il émet successivement deux impulsions lumineuses de longueur d'onde 532 nm et d'énergie 60 mJ pendant 5 à 8 ns. De plus, l'enregistrement des images de particules se fait à l'aide d'une caméra imager sCMOS de la marque LaVision. Elle possède un double obturateur et capture deux images successives avec un temps de latence de 120 ns. Le capteur a une résolution de 2560×2160 pixels² pour une fréquence d'acquisition de 50 Hz. Les pixels ont une taille de $6,5 \mu\text{m}$. Enfin, un filtre est positionné devant l'objectif pour ne laisser passer que les ondes de longueur d'onde à 532 nm correspondant à l'émission du laser. Pour l'ensemencement, des particules d'huile de paraffine Ondina Shell 917 sont choisies. Elles possèdent une masse volumique de $851,7 \text{ kg/m}^3$ à 20°C, une viscosité dynamique de $35,7 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ et un diamètre de $5 \mu\text{m}$.

Afin de couvrir toute la hauteur de la cavité, il a été nécessaire de faire plusieurs champs verticaux. Nous en avons réalisé entre quatre et cinq selon la configuration. Ensuite, le logiciel DAVIS 10 (LaVision) a été utilisé pour effectuer le traitement des images. Une première passe

est conduite avec des fenêtres d'interrogation de taille 64×64 pixels². Une deuxième passe est ajoutée sur des fenêtres de 24×24 pixels² pour capturer au mieux les plus petites vitesses. Un "overlapping" de 50% est choisi pour augmenter la quantité de vecteurs calculés dans chaque fenêtre. Enfin, pour s'assurer de la bonne convergence des quantités étudiées, une acquisition de 8000 images sur le champ du haut et de 5000 sur les quatre autres champs a été effectuée à la fréquence de 25 Hz.

3. Résultats pour $Ra_D = 8,5 \times 10^5$ et $A_D = 0,04$

L'étude présentée ici constitue une étude préliminaire du panache. Ce dernier a été caractérisé dans des plans verticaux et horizontaux avec une situation de référence permettant de comparer les résultats à ce qui a été fait dans la littérature. Puis, l'influence du dispositif passif dans les configurations "Ailettes tangentes" et "Ailettes radiales" a été étudiée. Une première partie présente l'influence du dispositif dans le plan médian vertical. La seconde abordera l'influence du système passif dans divers plans horizontaux.

3.1. Mesures préliminaires

Des tests de convergence ont permis de vérifier pour chaque champ que le temps d'acquisition et le nombre d'acquisitions étaient suffisants.

3.2. Étude de l'influence dans le plan médian vertical

3.2.1. Champs verticaux de la vitesse moyenne

L'influence du dispositif passif a été étudiée en réalisant tout d'abord des mesures dans le plan médian vertical. Les champs 2D de la vitesse moyenne sont tracés ci-dessous sur la figure 2.

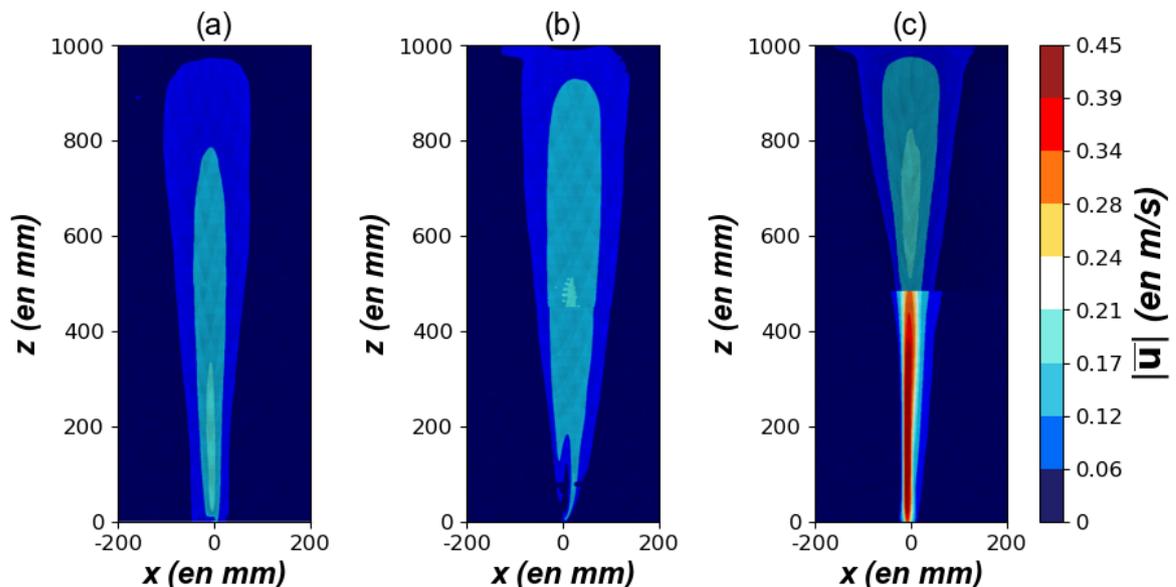


Figure 2 : Champs 2D de la vitesse moyenne (a) : Configuration "Sans Ailettes", (b) : Configuration "Ailettes Tangentes", (c) : Configuration "Ailettes Radiales", Barre des couleurs : norme de la vitesse moyenne

Sur cette figure et quelle que soit la configuration, un écoulement ascendant au niveau de l'axe central est observé ; il correspond au panache thermique. On note cependant un comportement dynamique très différent entre la configuration "Ailettes radiales" et les deux autres. En effet, dans la première, le panache thermique est plus concentré et la norme de la vitesse est environ deux fois plus élevée. Aussi, la vitesse moyenne devient négligeable (de l'ordre de quelques cm/s) pour une hauteur plus basse pour les configurations "Sans Ailettes" et "Ailettes tangentes" par rapport à "Ailettes Radiales". Pour cette dernière, on observe une interaction non négligeable avec le plafond. Cela a pour effet un aplatissement du panache sur ce dernier. A contrario, il n'y a pas d'interaction notable en l'absence du dispositif perturbateur.

3.2.2. Profils horizontaux de vitesse moyenne

L'évolution des profils horizontaux de la composante verticale de la vitesse moyenne ($\overline{u_z}$) présentée sur la figure 3 suit une évolution caractéristique des panaches thermiques. Ainsi, quelle que soit la configuration, la forme du profil présente une pointe et tend vers une valeur nulle à ses extrémités. De plus, les profils deviennent plus larges lorsque la hauteur z augmente. Ils tendent vers une distribution gaussienne, caractéristique de la zone pleinement turbulente [2].

La distinction entre la configuration "Ailettes radiales" et les deux autres peut là encore être faite. Cela indique que l'orientation des ailettes joue un rôle non négligeable dans la modification du développement du panache. L'orientation radiale (cas c) a pour effet d'augmenter significativement la composante verticale de la vitesse moyenne en plus de la concentrer sur l'axe. Cette dernière a une valeur deux fois plus élevée au coeur du panache par rapport aux autres cas d'étude. De plus, la décroissance de la vitesse moyenne et l'adoption d'une distribution gaussienne, caractéristique du régime pleinement turbulent, s'opèrent à une hauteur z plus élevée que pour la situation de référence. A contrario, l'orientation tangentielle des ailettes (cas b) ne semble pas générer de différences significatives visibles sur les champs par rapport au cas de référence. Ces résultats se retrouvent dans les profils verticaux de vitesse moyenne ($\overline{u_z}$) présentés dans la section suivante.

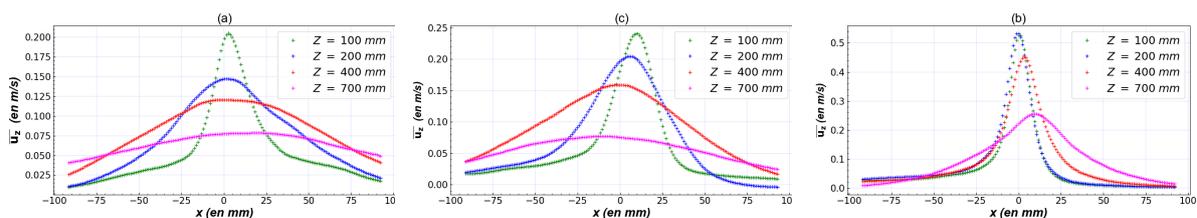


Figure 3 : Profils horizontaux de la composante verticale de la vitesse à différentes hauteurs (a) : Configuration "Sans Ailettes", (b) : Configuration "Ailettes Tangentes", (c) : Configuration "Ailettes Radiales"

3.2.3. Profils verticaux de vitesse moyenne

La forme des courbes de tendance de la figure 4(a) ressemble pour chaque configuration à ce qui est observé dans la littérature 4(b) (voir [3]). Une phase de croissance brusque puis une phase de décroissance avec une pente quasiment constante peuvent ainsi être observées. Cependant, dans le cas de la configuration "Ailettes Radiales", des sauts non physiques sont observés lors du passage d'un champ à un autre. Les causes de ces anomalies sont en cours d'ana-

lyse. Une piste d'explication serait la présence d'une fluctuation lente induisant des variations entre chaque zone de mesures. Plus généralement, les mesures effectuées sont préliminaires. Leur intérêt réside essentiellement dans les tendances qu'elles dégagent et les comparaisons qu'elles permettent entre chaque configuration. Enfin, les mêmes remarques peuvent être faites que précédemment pour la comparaison dynamique entre les configurations étudiées.

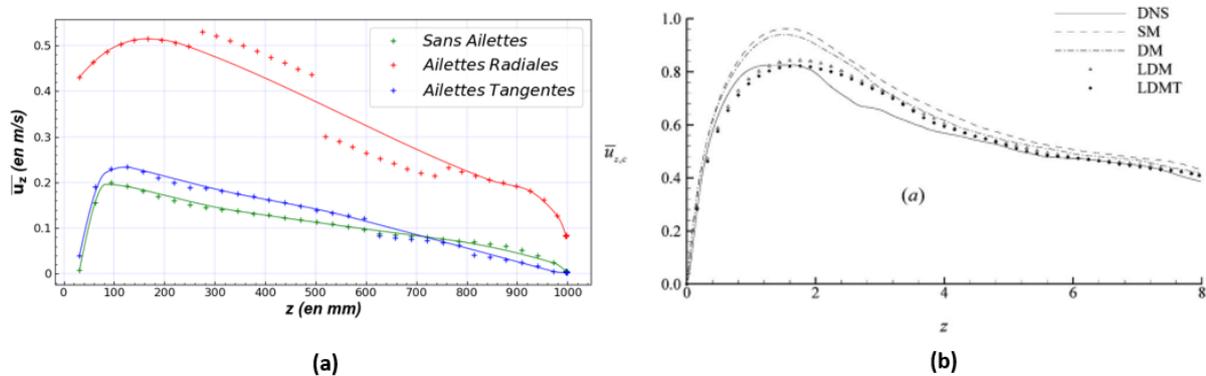


Figure 4 : Profils verticaux de la composante verticale de la vitesse moyenne : (a) mesures expérimentales, (b) : simulations numériques [3]. ((+) points expérimentaux, (-) courbe de tendance)

3.3. Étude de l'influence dans les plans horizontaux

3.3.1. Caractérisation dans la configuration "Ailettes tangentes"

Afin de caractériser le comportement du panache dans la configuration "Ailettes tangentes", des mesures ont été réalisées pour des plans horizontaux situés à différentes hauteurs z vis-à-vis de la source : 30 mm, 50 mm, 100 mm, 200 mm et 400 mm. La température de la source était là encore fixée à 130°C au-dessus de la température ambiante (environ 20°C).

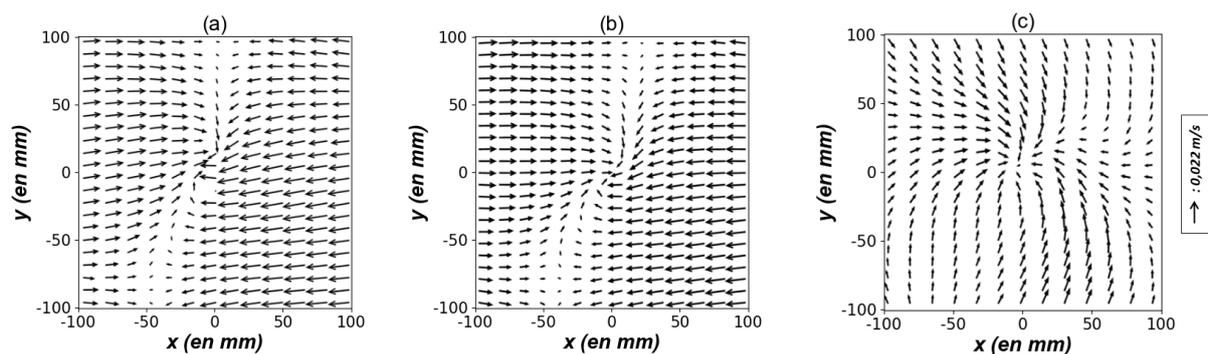


Figure 5 : Champs 2D de la vitesse moyenne dans la configuration "Ailettes tangentes" : (a) : $z = 30\text{mm}$, (b) : $z = 50\text{mm}$, (c) : $z = 200\text{mm}$

D'après les expériences réalisées, les champs horizontaux ne présentent pas de symétrie radiale. Quelle que soit la hauteur, l'écoulement présente un comportement similaire sur la figure 5 : la vitesse moyenne est orientée vers le coeur du panache sur les côtés droit et gauche de la figure pour $z = 30$ et $z = 50$ mm. A $z = 200$ mm le motif est quelque peu différent, le champ

semble plus orienté radialement en direction du coeur de la source qu'auparavant. La norme du champ de vitesse n'est pas uniforme non plus puisqu'elle est bien plus importante sur les côtés (environ 0,02 m/s) que sur le haut et le bas de la figure (quelques mm/s). Cela signifie que l'écoulement est "fortement" aspiré par effet d'entraînement vers le coeur du panache sur l'axe joignant les parois actives de la cavité. Aussi, il s'annule sur un axe oblique presque vertical. Ensuite, l'effet de rotation recherché dans cette configuration d'ailettes, s'il existe, n'est pas clairement identifiable sur les champs. Des traitements plus approfondis doivent être menés, par exemple en analysant la vorticité. Enfin, la norme du champ de vitesse moyenne diminue à partir d'une certaine hauteur (ici dès que le plan est à $z = 30$ mm) comme cela est attendu du fait des phénomènes de diffusion et de dissipation d'énergie cinétique.

3.3.2. Étude de l'influence dans un plan horizontal

Diverses expériences préliminaires ont été menées dans le plan horizontal situé à $z = 30$ mm de hauteur afin de comparer le comportement de chaque configuration. La source était là encore portée à une différence de température de 130°C au dessus de la température ambiante.

Il peut être observé sur la figure 6 que la forme du champ varie assez fortement selon les configurations. Néanmoins la symétrie radiale n'est observée dans aucun des cas d'étude. Enfin, l'ordre de grandeur de la vitesse moyenne dans les plans horizontaux est comparable entre chaque configuration et est plutôt faible, de l'ordre du centimètre par seconde.

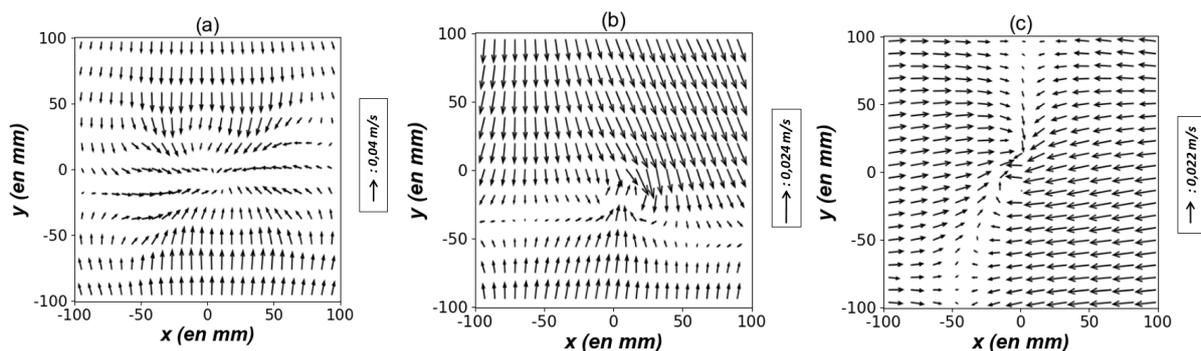


Figure 6 : Champs 2D de la vitesse moyenne dans le plan horizontal de hauteur $z = 30$ mm : (a) : Sans ailettes, (b) : Ailettes radiales, (c) : Ailettes tangentés

4. Conclusion

En conclusion, d'après les expériences préliminaires ayant pu être menées sur le plan médian vertical, il semble que l'orientation des ailettes dans le dispositif modifie significativement la dynamique du panache. Ainsi, en disposant les ailettes de façon tangente à la source cylindrique, aucune différence significative ne peut être observée dans le plan médian vertical par rapport au cas où le dispositif est absent. A contrario, lorsque les ailettes sont disposées radialement, la norme de la vitesse moyenne est doublée, l'effet d'entraînement de fluide est amplifié, le panache est plus resserré et concentré et le régime pleinement turbulent est atteint à une hauteur z plus élevée. Il a aussi été possible de retrouver les tendances d'évolution de la vitesse moyenne sur l'axe du panache observées dans la littérature. Cependant, des anomalies non physiques entre champs de mesure perturbent les données relevées. L'étude de divers plans horizontaux a quant à elle mis en évidence une dissymétrie de l'écoulement radial pour les configurations "Ailettes tangentés" et "Ailettes radiales". De plus, le motif formé par le champ dans le cas

”Ailettes tangentes” se maintient jusqu’à environ 200 mm de la source. Enfin, les champs de vitesse moyenne dans les plans horizontaux sont insuffisants pour savoir si le dispositif passif est bien en mesure de générer une rotation du panache thermique.

Ainsi, des études plus approfondies doivent être menées. Tout d’abord, les champs dans les plans horizontaux doivent être examinés plus en profondeur. Ensuite, il faudra comprendre d’où viennent les anomalies présentes sur le profil vertical de \overline{u}_z dans la configuration ”Ailettes Radiales”. Afin d’améliorer la reproductibilité de l’expérience et la qualité des résultats, un dispositif passif (ailettes et capot) en un seul bloc va être fabriqué avec une imprimante 3D. Cela permettra de bien maîtriser la position des ailettes sous le capot. En effet, il est possible que la forme dissymétrique des champs horizontaux des configurations ”Ailettes tangentes” et ”Ailettes radiales” provienne en partie d’une variation d’angle non voulue des ailettes. Par ailleurs, le dispositif va être incrusté dans le plancher afin de limiter les perturbations de l’écoulement dues à son élévation. Enfin, il sera nécessaire de vérifier si les valeurs expérimentales obtenues sans le dispositif passif correspondent quantitativement à celles présentes dans la littérature. Il serait par exemple intéressant de comparer les valeurs de la composante verticale de la vitesse moyenne adimensionnée et de l’intensité turbulente avec celles numériques et expérimentales obtenues par [3] et de quantifier l’influence du dispositif sur ces grandeurs. L’analyse et la comparaison avec les valeurs numériques exposées par [5] de la densité spectrale de puissance moyenne pour la composante verticale de vitesse ainsi que de la distribution de vorticité pourraient également être réalisées.

Références

- [1] M. V. Pham, F. Plourde, and S. D. Kim. Effect of swirl on pure turbulent thermal plume development. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 27 :502–513, 2006.
- [2] M. V. Pham, F. Plourde, and S. D. Kim. Three-dimensional characterization of a pure thermal plume. *Journal of Heat Transfer*, 127 :624–636, 2005.
- [3] M. V. Pham, F. Plourde, and S. D. Kim. Direct and large-eddy simulations of a pure thermal plume. *Physics of Fluids*, 19 :1–13, 2007.
- [4] Z. Saeed, E. Weidner, B. A. Johnson, and T. L. Mandel. Buoyancy-modified entrainment in plumes : Theoretical predictions. *Physics of Fluids*, 34 :1–12, 2022.
- [5] C. H. Chen and K. Bhaganagar. New findings in vorticity dynamics of turbulent buoyant plumes. *Physics of Fluids*, 33 :1–12, 2021.

Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude au personnel ayant contribué à la mise en place du dispositif expérimental, en particulier H. Arlaud, C. Fuentes, R. Kari et N. Papin. Ce travail a  ete r ealis e dans le cadre du programme ”Investissement d’Avenir” mis en place par l’Etat français (LABEX INTERACTIFS, reference ANR-11-LABX-0017-01).