



**HAL**  
open science

# Impact des éléments architecturaux d'une pièce sur le comportement d'un jet d'air asymétrique turbulent vertical - Caractérisation expérimentale

Chi-Kien Nguyen, Damien David, Frédéric Kuznik, Gilles Rusaouen

## ► To cite this version:

Chi-Kien Nguyen, Damien David, Frédéric Kuznik, Gilles Rusaouen. Impact des éléments architecturaux d'une pièce sur le comportement d'un jet d'air asymétrique turbulent vertical - Caractérisation expérimentale. Conférence IBPSA France 2018, May 2018, Bordeaux, France. hal-01849034

**HAL Id: hal-01849034**

**<https://hal.science/hal-01849034>**

Submitted on 25 Jul 2018

**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.

# Impact des éléments architecturaux d'une pièce sur le comportement d'un jet d'air asymétrique turbulent vertical - Caractérisation expérimentale

Chi-Kien Nguyen<sup>\*1</sup>, Damien David<sup>1</sup>, Frédéric Kuznik<sup>1</sup>, Gilles Rusaouën<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Lyon, CNRS, INSA de Lyon, UCBL  
CETHIL UMR5008, 69621 Villeurbanne cedex, France

\*chi.nguyen@insa-lyon.fr

---

*RESUME.* L'étude expérimentale d'un jet d'air asymétrique turbulent au plafond a été effectuée dans une cellule d'essai entièrement contrôlée à l'échelle réelle (6.2 x 3.1 x 2.5 m). Notre configuration d'écoulement présente des éléments d'architecture qui font interagir le jet d'air avec la pièce : un plénum, une grille d'ailettes, des bouches d'extraction et une paroi proche. Les déviations concernant la trajectoire du jet réel ont été observés et analysés en détail. Les effets combinés des éléments architecturaux de la pièce ont considérablement dévié et déformé le développement du jet d'air. Une méthode a été proposée pour quantifier la déformation du jet basé sur un soi-disant indicateur de déformation. Ces résultats obtenus permettent d'autres études de cas dans des conditions anisothermes, avec la présence d'humidité et de la condensation. Des données expérimentales détaillées pourraient être utilisées comme étude de benchmark pour l'évaluation des modèles CFD pour les configurations avec rupture de symétrie.

*MOTS-CLÉS.* jet asymétrique, interaction, éléments architecturaux, indicateur de déformation.

---

---

*ABSTRACT.* Experimental investigation of ceiling turbulent asymmetrical air jets was conducted in a full-scale entirely controlled test room (6.2 x 3.1 x 2.5 m). Our realistic case study introduces architectural elements which make the air jet interacted with the room : a plenum box, a grille diffuser, air exhausts and a side wall near the air inlet. Deviations concerning the trajectory of the studied jet were observed and analyzed. Combined effects of room architectural elements have significantly deviated and deformed the air jet development. A method has been proposed to quantify the jet deformation based on a so-called deformation indicator. These results obtained allow for further cases studies under non-isothermal and moisture conditions with condensation. Detailed experimental data could be used as a benchmark study for CFD models evaluation for configurations with rupture of symmetry.

*KEYWORDS.* asymmetrical jet, interaction, architectural elements, deformation indicator.

---

## 1 INTRODUCTION

La compréhension de la distribution de l'air ambiant est essentielle à la conception des systèmes de ventilation des bâtiments, au confort thermique des occupants et aux contrôles de la qualité de l'air intérieur. Il est évident que la distribution d'air dans les zones d'occupation est

l'un des facteurs déterminants de la qualité de l'air intérieur et du confort. Par exemple, un taux de renouvellement d'air trop faible piège tous les polluants, les contaminants nuisent à la santé des occupants alors qu'un courant d'air à vitesse élevée peut provoquer une sensation d'inconfort.

L'étude de la distribution de l'air intérieur implique deux méthodes courantes : la simulation numérique et les expérimentations à l'échelle réelle 1 :1. En utilisant le modèle CFD (Computational Fluid Dynamics), la simulation numérique est la plus pratique et la plus efficace pour prédire la distribution d'air et la performance des systèmes de ventilation dans les bâtiments (Chen, 2009). Néanmoins, leur précision et leur fiabilité demeurent une préoccupation majeure, étant donné le manque d'études de validation approfondies, en particulier des études de validation à l'échelle 1 :1 qui peuvent fournir des données utiles et pertinentes sur les caractéristiques de l'écoulement d'air intérieur, y compris les caractéristiques d'écoulement turbulent.

Dans la littérature, afin d'étudier la distribution de l'air intérieur et les caractéristiques du jet d'air pour l'évaluation de la performance des systèmes de ventilation par mélange, de nombreuses recherches ont été menées, soit par des méthodes empiriques (Rajaratnam, 1976), (Li et al., 1993), (Grimtlyn et Pozin, 1993) ; soit par des méthodes expérimentales et numériques CFD (Sun et al., 2004), (Kuznik et al., 2007), (Nielsen et al., 2010), (Hurnik et al., 2015). Bien que des configurations de jets d'air anisothermes, des impacts des obstructions ou de sources de chaleur internes ont été envisagés, on peut noter un problème commun dans l'emplacement bouches de soufflage et d'extraction. Ils étaient tous situés symétriquement par rapport à la géométrie de la pièce. Cette disposition a probablement été faite pour que le jet d'air ait un développement quasi-libre et symétrique ; et ainsi les investigations ont été effectuées simplement dans l'axe de la pièce, c'est-à-dire le plan médian.

En effet, si cette configuration peut être suffisante pour une étude de base, ou pour des modélisations/expérimentations plus simples, elle ne représente pas une configuration réaliste dans laquelle le jet d'air n'est pas développé librement et symétriquement ; d'où l'intention de cette étude expérimentale. L'objectif principal est de caractériser un jet d'air vertical asymétrique issu d'une grille d'ailettes au plafond dans une pièce à l'échelle réelle. Le jet d'air interagit avec les éléments architecturaux de la pièce et présente ainsi sa déviation de trajectoire et sa déformation de forme. Traitant de tels jets d'air, une analyse avancée des écoulements d'air en 3D est fortement recommandée. Des données détaillées à partir de cette étude expérimentale à l'échelle 1 :1, accompagnées de conditions aux limites bien connues, pourraient être suffisamment fiables pour servir de test de benchmark pour la validation des modèles CFD, en particulier pour les configurations d'écoulement avec rupture de symétrie.

## 2 DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX ET MÉTROLOGIE

### 2.1 CELLULE MINIBAT

Le banc d'expérimentation est basé sur une cellule d'essais intitulée "MINIBAT". Elle est localisée au laboratoire CETHIL – INSA de Lyon, France. Elle se compose de trois parties distinctes : une cellule d'essais, une garde thermique et un caisson climatique. La cellule d'essais, qui a pour dimensions 6.20 x 3.10 x 2.50 m, est l'endroit où l'expérimentation est réalisée (Fig.1). Cinq de ses faces sont entourés par une garde thermique qui permet de maintenir une température stable. La face au Sud est une face vitrée qui est en contact avec le caisson climatique. Ce dernier fonctionne comme un simulateur de climat qui est capable de simuler des conditions de températures extérieures. Les détails sur la géométrie et l'enveloppe de la cellule d'essais MINIBAT sont donnés dans (Nguyen et al., 2017a).

### 2.2 CONFIGURATION D'ÉCOULEMENT

L'air dans la cellule d'essais est ventilé au moyen d'une centrale de traitement d'air fonctionnant en boucle fermée. La bouche de soufflage au plafond ( $\varnothing 160$  mm) est située à 1 m de

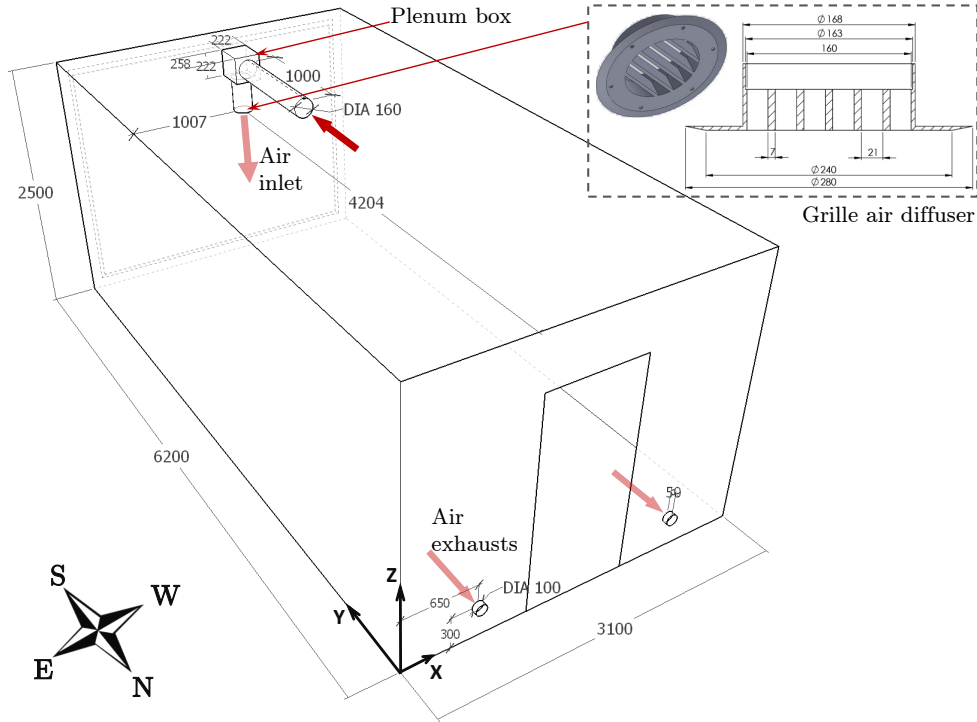


FIGURE 1. Cellule d'essais MINIBAT avec la configuration d'écoulement

la paroi Est et à 4.2 m de la paroi Nord. Elle est équipée de fixes ailettes avec un ratio surface nette/surface totale de 76% (ASHRAE, 2017). Ces ailettes sont disposées parallèlement à la direction de  $X$ . Les deux bouches d'extraction ( $\varnothing 100$  mm), sont placées sur la paroi Nord, à 0.3 m du sol et à 0.65 m des parois verticales adjacentes.

Notre configuration approche des cas réels dans les bâtiments. En effet, compte tenu de la disponibilité de l'espace au-dessus du faux-plafond suspendu, un plénum pourrait être installé avant l'entrée d'air (Smoljan et Balen, 2010). Compte tenu des dimensions limitées d'une pièce, la bouche de soufflage pourrait par la suite être située à proximité d'un mur vertical et ainsi le jet d'air ne se développerait pas symétriquement. Ces éléments architecturaux auront nécessairement un impact sur le comportement et les caractéristiques du jet.

### 2.3 MÉTROLOGIE ET PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Pour les conditions aux limites, un réseau de 180 sondes Pt100 a été mis en œuvre sur les côtés externes et internes des six parois de la cellule d'essais pour mesurer leur température sur les différents cas de test. Le débit et la température de l'air au soufflage ont été régulés à l'aide d'un débitmètre à hélice et de sondes Pt100 respectivement. Un anémomètre à boule chaude est mis avant le plénum pour mesurer la vitesse de l'air soufflé ainsi que son intensité de turbulence.

Pour la métrologie de champs intérieurs de la cellule, un robot mobile muni de capteurs a été conçu par nos soins (Fig.2). Le déplacement du robot est contrôlé par un microcontrôleur Arduino<sup>TM</sup>. Ce dernier est piloté par un mini-PC Intel® NUC (4). La position exacte du robot dans la pièce est mesurée par un LiDAR (1) (télé-détection par laser).

La mesure de température sur le robot se fait à l'aide de thermocouples de diamètre 25  $\mu\text{m}$  (3), permettant ainsi un temps de réponse rapide et une haute précision de  $\pm 0.06$  °C (valeur moyennée). Les mesures d'humidité relative sont réalisées avec des sondes numériques SHT75 (3) qui affichent une précision absolue de  $\pm 1.8$  %HR. Les mesures de vitesses se font à l'aide d'anémomètres à boule chaude Schilknecht ThermoAir. Ces anémomètres affichent une précision de  $\pm 0.5\%$  pleine échelle +  $\pm 1.5\%$  valeur mesurée.

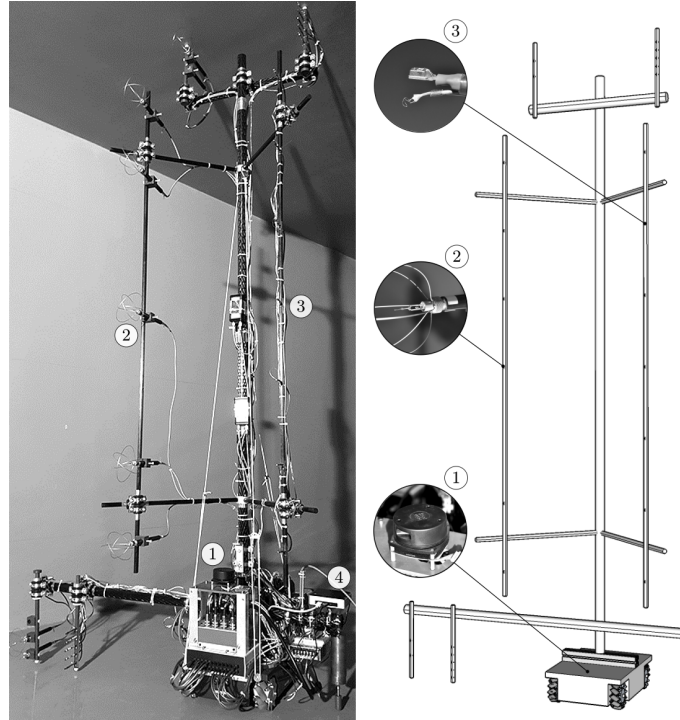


FIGURE 2. Robot mobile muni de capteurs

Par rapport au système de bras mobile sur rail utilisé auparavant par (Hohota, 2003) et (Kuznik, 2005), le système de robot mobile présente deux avantages principaux : réduction des perturbations de l'écoulement et libre accès à tout le volume de la cellule.

Pour chaque campagne de mesure, la cellule doit subir une étape de mise en régime qui dure trois jours. Durant cette phase, les consignes de température et de débit d'air soufflé sont fixes. Une fois la mise en régime établie, le robot mobile est utilisé pour scruter la zone intéressée ( $1 \times 1 \text{ m}$  autour de la bouche de soufflage avec un maillage de  $0.05 \text{ m}$ ).

Pour une position du robot, la vitesse et la température sont mesurées avec une fréquence d'acquisition de  $10 \text{ Hz}$  (une mesure tous les  $100 \text{ ms}$ ). Les valeurs sont ensuite moyennées sur 2000 mesures, soit  $200 \text{ s}$  afin de réduire les erreurs fluctuantes. Le temps entre deux positions est de 5 minutes. Il comprend le déplacement du robot et le temps d'attente avant l'acquisition des données.

### 3 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET DISCUSSIONS

Dans cet article, le cas d'un jet isotherme est analysé. Les conditions aux limites sur la température des parois ainsi que sur les paramètres de ventilation sont récapitulées dans les Tableaux 1 et 2. Le modèle empirique du jet libre ainsi que les caractéristiques du jet ne sont pas décrites dans cet article. Elles sont basées sur les ouvrages de (Goodfellow, 2001), (Awbi, 2003) et sont détaillées dans (Nguyen et al., 2017b). Les résultats expérimentaux du jet sont analysés dans l'environnement Spyder (codes Python) et sont visualisés dans le logiciel ParaView.

	Plafond	Sol	S	N	E	W
			(°C)			
Moyenne	20.7	20.9	20.9	20.6	20.5	20.5
Ecart-type	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2

TABLE 1: Températures moyennes des parois

Débit	$U_0$	$Re_0$	$T_0$
( $\text{m}^3/\text{h}$ )	( $\text{m}/\text{s}$ )	(-)	(°C)
119.99	2.18	17268	19.98
0.75	0.1	-	0.06

TABLE 2: Paramètres de ventilation

### 3.1 TRAJECTOIRE DU JET ET LA DÉCROISSANCE DES VITESSES MAXIMALES

Dans un premier temps, les valeurs de vitesse de l'air acquises sont interpolées pour pouvoir déterminer les vraies valeurs de vitesse maximale dans chacun des six plans horizontaux mesurés. La figure 3 présente une visualisation qualitative de la trajectoire du jet ainsi que la courbe des vitesses maximales.

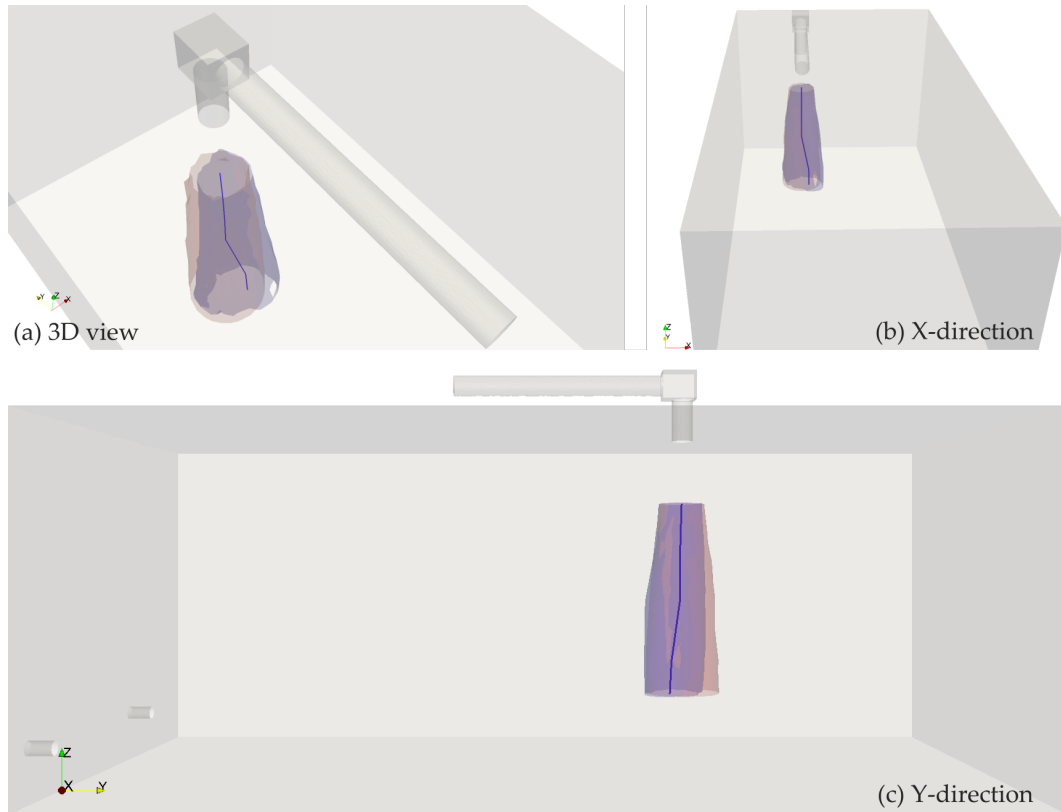


FIGURE 3. Déviation du jet et la courbe des vitesses maximales  
Avec : *Rouge* - jet libre axisymétrique ; *Bleu* - jet expérimental  
Valeur prise pour le tracé des contours : 0.25 m/s

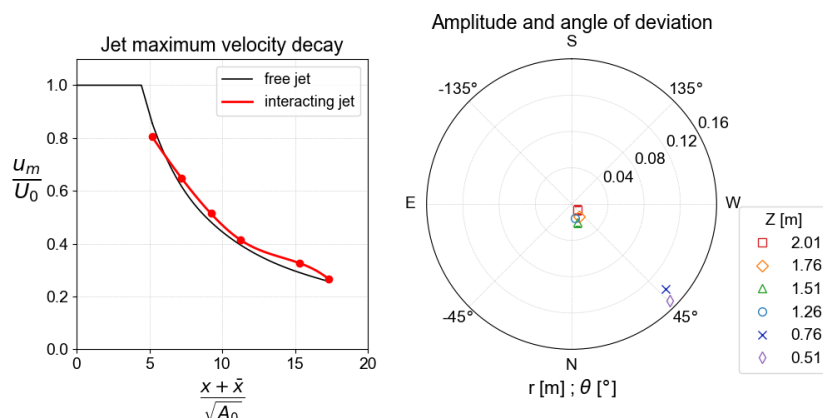


FIGURE 4. Décroissance des vitesses maximales - Amplitude et angle de déviation du jet

On constate donc une asymétrie, voire une déviation de la trajectoire du jet réel (en bleue) par rapport à celle du jet théorique (en rouge). Le jet se développe dans le sens Nord-Ouest : vers les bouches d'extraction (côté Nord) et vers la paroi lointaine Ouest. Ce comportement du jet expérimental est probablement dû au mur proche, aux bouches d'extraction ainsi qu'au plénum.

Cette déviation montre bien l'impact des éléments architecturaux sur le comportement du jet : la perturbation du mur proche (Est) et l'aspiration des bouches d'extraction.

La figure 4 fournit une description quantitative de l'amplitude ainsi que l'angle de déviation du jet réel. La décroissance des vitesses maximales d'un jet libre et du jet étudié est aussi présentée dans cette figure. Dans la région proche de la grille, le jet ne se dévie pas visiblement, l'amplitude de déviation reste minimale (1 cm à 2 cm). Néanmoins, dans la région dite éloignée ( $Z = 0.75$  m et 0.5 m), la déviation du jet est beaucoup plus visible avec une amplitude atteignant 15 cm et un angle de  $45^\circ$ . En ce qui concerne la décroissance de la vitesse maximale du jet, malgré le comportement du jet d'air, la courbe de décroissance ne diffère pas beaucoup de celle du jet libre. Il est donc possible de déduire que les éléments architecturaux peuvent avoir dévié la trajectoire du jet mais que l'on retrouve à peu près les mêmes valeurs de vitesse maximale par rapport à un jet libre.

### 3.2 CONTOUR DU JET ET PROFILS TRANSVERSAUX DE VITESSES MOYENNES DU JET

Dans cette section, on analyse la distribution et la déformation des profils de vitesse dans la section transversale du jet. Le jet d'air s'est propagé de manière asymétrique, il faudrait une méthode pour quantifier cette déformation. Pour cela, les contours de vitesse moyenne ( $> 0.25$  m/s) du jet selon les six plans de mesures ont été tracés et sont présentés dans la figure 5. La position  $(X; Y) = (0; 0)$  correspond au centre de la bouche de soufflage. Il est possible de remarquer une propagation non circulaire du jet suivant la direction X (Est-Ouest) dans la région proche de la grille. Cette déformation est probablement due à la direction des ailettes de la grille. Dans la région éloignée, la propagation du jet d'air est clairement asymétrique et sa forme semble plutôt se déformer sous l'impact de la géométrie de la pièce que la grille.

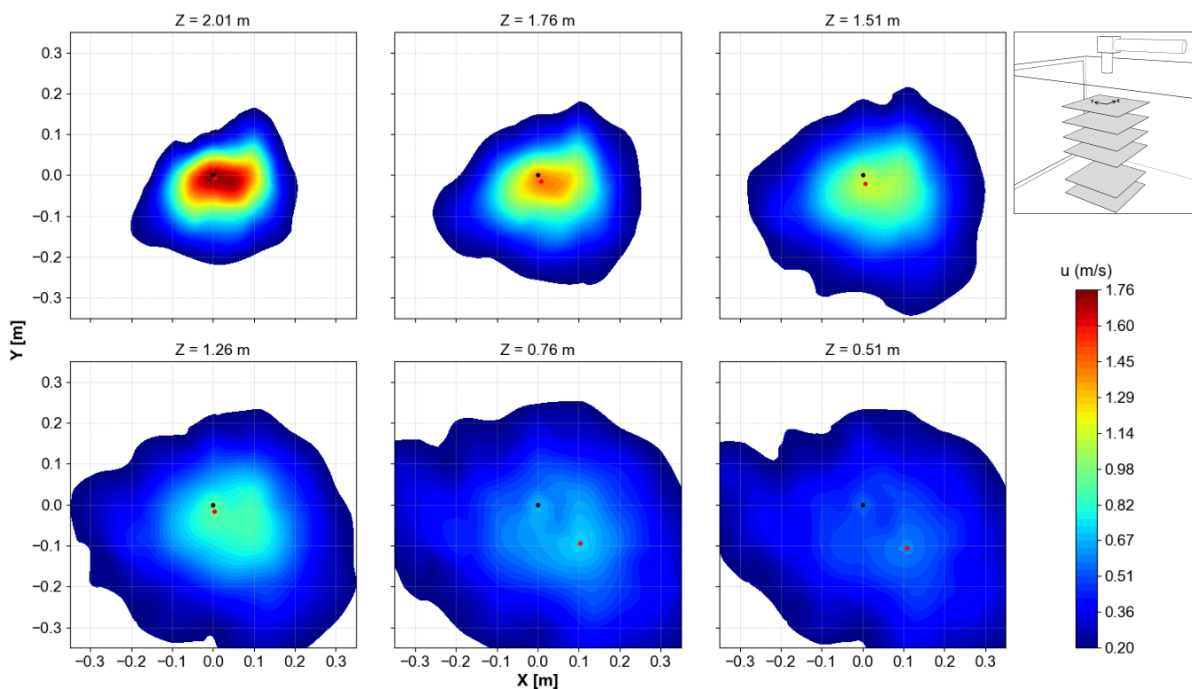


FIGURE 5. Contours de vitesse du jet d'air selon Z

Dans la littérature, pour la caractérisation des profils transversaux de vitesse moyenne d'un jet d'air, plus souvent on évalue le rapport adimensionnel  $u/u_m$  en termes des distances radiales adimensionnelles  $r/b(Z)$ , à condition que le jet soit axisymétrique (Awbi, 2003). Pour rappel,  $b(z)$  représente la distance radiale à laquelle  $u(r = b) = 0.5u_m$  et  $u_m$  représente la vitesse maximale du jet à chaque hauteur  $z$ .

Toutefois, étant donné que notre jet étudié n'a pas de direction privilégiée par rapport aux autres, l'analyse selon les directions  $X$  et  $Y$  se montre incomplète. Ainsi, on définit le rayon hydraulique ( $r_h$ ) et le rayon de disque équivalente ( $r_{Deq}$ ) des contours du jet, qui sont donnés par les formules suivantes :

$$r_h = \frac{2S}{P}; r_{Deq} = \sqrt{\frac{S}{\pi}}$$

avec  $S$  et  $P$  sont respectivement la surface et le périmètre des contours. Ces formules ont été appliquées pour déterminer le rayon hydraulique et de disque équivalente des contours de vitesse normalisés présentés sur la figure 5, c'est-à-dire pour les contours  $u/u_m = (0.2...1)$ . Nous définissons l'indicateur de déformation des profils de jet ( $DI$ ) comme le rapport  $r_h/r_{Deq}$ . Une valeur de  $DI = 1$  signifie un contour circulaire.

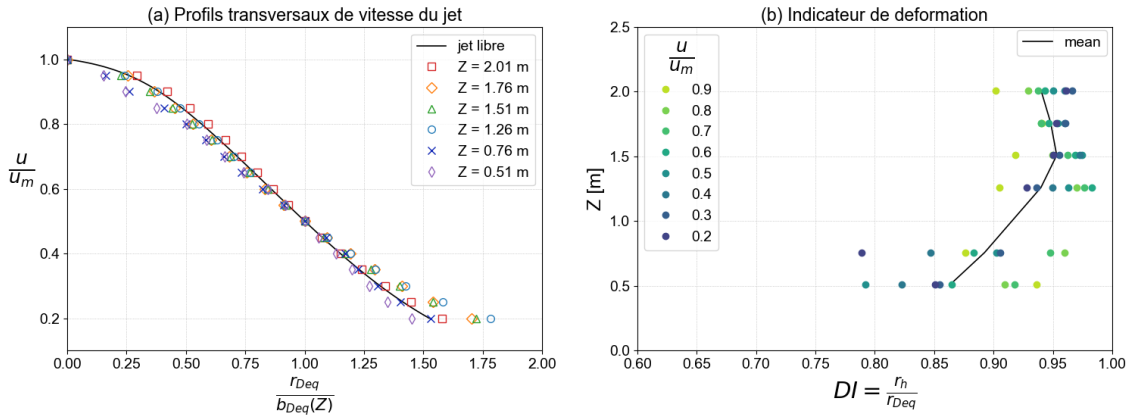


FIGURE 6. Profils transversaux de vitesse moyenne - Indicateur de déformation des profils du jet

Le tracé des profils transversaux de vitesse moyenne du jet  $u/u_m$  en fonction de  $r_{Deq}/b(Z)$  est présenté dans la figure 6. Le profil du jet libre peut être exprimé par une seule courbe de fonction d'erreur de Gauss. Il est possible de remarquer l'auto-similarité de tous les six profils transversaux malgré leur asymétrie. Le profil correspondant au plan  $Z = 2\text{ m}$  se développe un peu plus large qu'un jet libre axisymétrique. Les profils  $Z = 0.76$  et  $0.51$  montrent une propagation moins large que les autres, probablement due à une perte de moment d'inertie.

Si les profils transversaux du jet asymétrique sont à peu près les mêmes que ceux du jet libre, comment peut-on quantifier la déformation de ce jet? D'où l'intention de l'indicateur de déformation  $DI$ . Pour les quatre plans  $Z = 1.26...2.01\text{ m}$ , leurs valeurs  $DI$  varient entre 0.9 et 0.98. Les deux derniers plans montrent une plus grande variation, leurs valeurs varient entre 0.78 et 0.95. Il est alors possible de conclure que pour un contour de vitesse normalisé, plus la valeur  $DI$  est inférieure à 1, plus la déformation est importante.

## 4 CONCLUSION

1. Alors que les jets d'air libre axisymétriques ont été largement étudiés dans le passé, peu ont étudié un jet d'air réaliste ayant une interaction avec la pièce. Par conséquent, le présent article présente une caractérisation expérimentale à l'échelle 1 :1 d'un jet d'air vertical asymétrique. Le jet d'air interagit avec les éléments architecturaux de la pièce et présente ainsi un développement dévié et déformé.
2. La perturbation de la paroi latérale près de la bouche de soufflage, l'aspiration des bouches d'extraction, la présence du plénum et la grille des ailettes ont significativement dévié la trajectoire du jet et ainsi déformé la forme du jet.



3. Une méthode a été proposée pour évaluer les profils transversaux de vitesse du jet et pour quantifier leur déformation. C'est une méthode graphique basé sur le rayon hydraulique, le rayon de disque équivalente et l'indicateur de déformation.
4. Suite à cette étude, les résultats expérimentaux des jets non isothermes ainsi que des champs dynamiques turbulents intérieurs sont en cours d'analyse. D'autre part, les résultats encourageants obtenus permettent des essais expérimentaux plus approfondis avec la présence d'humidité et la condensation sur une paroi froide.
5. Les données détaillées issues de cette étude pourraient être suffisamment fiables pour servir de test de benchmark pour la validation des modèles CFD, en particulier pour les configurations d'écoulement avec rupture de symétrie.

## RÉFÉRENCES

- ASHRAE (2017). *2017 ASHRAE handbook : fundamentals*. ASHRAE. OCLC : 988844741.
- Awbi, H. B. (2003). *Ventilation of buildings*. Spon Press, London. OCLC : 300230189.
- Chen, Q. (2009). Ventilation performance prediction for buildings : A method overview and recent applications. *Building and Environment*, 44(4) :848–858.
- Goodfellow, H. D. (2001). *Industrial Ventilation Design Guidebook*. Academic Press.
- Grimityn, M. et Pozin, G. (1993). Fundamentals of Optimizing Air Distribution in Ventilated Spaces. *ASHRAE Transactions*, 99(1) :1128–1138.
- Hohota, R. S. (2003). *Modélisation de l'humidité dans un code CFD (basses vitesses en grande cavité) : comparaison avec l'expérimental*. Ph.D. thesis, INSA de Lyon.
- Hurnik, M., Blaszcok, M., et Popiolek, Z. (2015). Air distribution measurement in a room with a sidewall jet : A 3d benchmark test for CFD validation. *Building and Environment*, 93 :319–330.
- Kuznik, F. (2005). *Etude expérimentale des jets axisymétriques anisothermes horizontaux se développant près d'une paroi. Application à la modélisation numérique des cavités ventilées*. Ph.D. thesis, INSA de Lyon, Lyon.
- Kuznik, F., Rusaouën, G., et Brau, J. (2007). Experimental and numerical study of a full scale ventilated enclosure : Comparison of four two equations closure turbulence models. *Building and Environment*, 42(3) :1043–1053.
- Li, Z., Zhang, J., Zhivov, A., et Christianson, L. (1993). Characteristics of diffuser air jets and airflow in the occupied regions of mechanically ventilated rooms - a literature review. *ASHRAE Transactions*, 99 :1119–1127.
- Nguyen, C.-K., David, D., Kuznik, F., et Rusaouën, G. (2017a). Etude expérimentale d'un jet axisymétrique vertical dans une cavité ventilée mécaniquement. In *XIIIe CIFQ sur la Thermique des Systèmes*, Saint-Lô, France.
- Nguyen, C.-K., David, D., Kuznik, F., et Rusaouën, G. (2017b). Full-scale experimental study of ceiling turbulent air jets in mechanically ventilated rooms. In *38th AIVC conference*, Nottingham, England.
- Nielsen, P. V., Rong, L., et Olmedo, I. (2010). The IEA Annex 20 Two-Dimensional Benchmark Test for CFD Predictions. In *Clima 2010*.
- Rajaratnam, N. (1976). *Turbulent Jets*. Elsevier.
- Smoljan, D. et Balen, I. (2010). Influence of a plenum box design on uniformity of the radial air jet issuing from a vortex diffuser. *Strojarstvo*, 52(3) :379–386.
- Sun, Y., Tan, Z., Zhang, Y., et Zhao, L. (2004). Comparison of Six CFD Models for Room Airflow Study with PIV measurement Data. ASABE Paper No. 044097. ASAE.