



HAL
open science

Simulations aux Grandes Echelles basées sur la méthode de Boltzmann sur réseau d'un jet axisymétrique et isotherme se développant dans une pièce

Teddy Gresse, Lucie Merlier, Jérôme Jacob, Frédéric Kuznik

► To cite this version:

Teddy Gresse, Lucie Merlier, Jérôme Jacob, Frédéric Kuznik. Simulations aux Grandes Echelles basées sur la méthode de Boltzmann sur réseau d'un jet axisymétrique et isotherme se développant dans une pièce. Conférence IBPSA France 2022, May 2022, Chalon en Champagne, France. hal-04259440

HAL Id: hal-04259440

<https://hal.science/hal-04259440v1>

Submitted on 26 Oct 2023

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.

Simulations aux Grandes Echelles basées sur la méthode de Boltzmann sur réseau d'un jet axisymétrique et isotherme se développant dans une pièce

Teddy Gresse*¹, Lucie Merlier², Jérôme Jacob³, Frédéric Kuznik¹

¹ : Univ Lyon, INSA Lyon, CNRS, CETHIL, UMR5008
Villeurbanne, F-69621, France

² : Univ Lyon, UCBL, INSA Lyon, CNRS, CETHIL, UMR5008
Villeurbanne, F-69621, France

³ : Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, M2P2 UMR 7340
Marseille, 13451, France

*teddy.gresse@insa-lyon.fr

RESUME. L'objectif de cette étude est d'évaluer les performances d'une approche de Simulation aux grandes Echelles (LES – Large Eddy Simulation) par la méthode de Boltzmann sur réseau (LBM – Lattice Boltzmann Method) pour simuler l'écoulement d'un jet axisymétrique et isotherme se développant près du plafond d'une cellule test échelle 1 MINIBAT (Kuznik 2005). Pour cela, les résultats numériques sont comparés avec les données expérimentales en termes de taux d'expansion verticale et latérale des jets, de profils de vitesse moyenne au sein du jet et de quantités turbulentes. Les résultats montrent un bon accord qualitatif et quantitatif entre les données numériques et expérimentales : l'anisotropie de l'expansion du jet est bien retrouvée et la forme des profils ainsi que les valeurs maximales de la vitesse moyenne sont cohérents. Les principaux mécanismes turbulents dans la zone de développement du jet sont également capturés. L'approche de modélisation adoptée se révèle ainsi adaptée à l'application bâtiment visée.

MOTS-CLÉS : jet axisymétrique et isotherme, LBM-LES, validation

ABSTRACT. This study aims to evaluate the performance of a Large Eddy Simulation (LES) approach using the Lattice Boltzmann Method (LBM) to simulate the flow of an axisymmetric and isothermal jet developing near the ceiling of a scale 1 test cell called MINIBAT (Kuznik 2005). To this end, numerical results are compared with experimental data in terms of vertical and lateral jet expansion rates, mean velocity profiles within the jet and turbulent quantities. The results show a good qualitative and quantitative agreement between numerical and experimental data: the anisotropy of the jet expansion is well recovered and the shape of the profiles as well as the maximum values of the mean velocity are consistent. The main turbulent mechanisms in the jet development zone are also captured. Hence, the modelling approach adopted proves to be appropriate for the intended building application.

KEYWORDS: axisymmetric and isothermal jet, LBM-LES, validation

1. INTRODUCTION

Les flux convectifs induits par les systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (CVC) jouent un rôle important pour le confort thermique des bâtiments. Il est donc essentiel de comprendre et prévoir les écoulements d'air dans les environnements clos. Cependant, la complexité des écoulements d'air intérieurs rend les études expérimentales difficiles et coûteuses et les études CFD nécessitent une attention particulière quant au choix des modèles et à la mise en place des simulations.

Historiquement, la plupart des simulations d'écoulements au sein des bâtiments se base sur les modèles de turbulence statistiques de moyennage des équations de Navier-Stokes (RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes). Cependant, si ces modèles peuvent être utilisés pour des écoulements simples et sont souvent suffisants pour évaluer les champs moyens de vitesse et de température, ils montrent des faiblesses dans les zones à faible vitesse d'écoulement mixte et où la turbulence est anisotrope (Zhai, et al. 2007) (Kuznik, et al. 2008). Or, ces zones sont souvent présentes dans les environnements intérieurs. De plus, ils ne permettent pas d'étudier des phénomènes d'instabilité ou fondamentalement instationnaires et transitoires de l'écoulement. Une alternative dynamique aux approches statistiques RANS est la Simulations aux Grandes Echelles (LES – Large Eddy Simulation) (Sagaut 2006). Avec cette approche, les tourbillons les plus porteurs d'énergie et les plus dépendants du problème sont résolus. Inversement, les tourbillons plus petits que le filtre spatial -typiquement la maille de la grille- sont modélisés par un modèle sous-maille. Elle apparait ainsi plus adaptée à l'étude des écoulements internes mais elle induit un coût de calcul plus important (Blocken 2018).

Récemment, la méthode de Boltzmann sur réseau (LBM - de Lattice Boltzmann Method) (Krüger, et al. 2016) a été introduite dans l'application bâtiment. Du fait de sa formulation, cette méthode est intrinsèquement parallèle et permet de prétraiter facilement les simulations. La LBM s'avère ainsi très efficace pour traiter les écoulements séparés à bas Mach dans des géométries complexes telles que les bâtiments. Plus particulièrement, des études portent d'une part sur l'application directe de la LBM-LES dans des environnements intérieurs. (Crouse, et al. 2002) ont par exemple mis en œuvre avec succès une simulation d'écoulement thermique au sein d'une configuration de bâtiment réel. D'autres études se sont concentrées sur la comparaison avec des approches classiques basées sur les équations de Navier-Stokes et la méthode des volumes finis (FVM – Finite Volume Method). (Han, et al. 2018) ont par exemple effectué des simulations d'un cas de référence de convection forcée isotherme intérieur basés sur les approches LBM-LES et FVM-LES et ont notamment montré la capacité de la LBM à simuler de manière satisfaisante les caractéristiques physiques de l'écoulement, tout comme le fait la FVM.

Bien que plusieurs tentatives aient été faites pour démontrer la faisabilité des simulations d'écoulements intérieurs par la LBM, aucune contribution ne propose à notre connaissance de validation approfondie par comparaison avec des mesures expérimentales d'écoulement intérieur dans une configuration réaliste. Ainsi, l'objet de cette contribution est d'évaluer la capacité d'une modélisation LBM-LES à prédire un écoulement de jet se développant dans une configuration équipée d'un système de ventilation. Les simulations effectuées avec le logiciel ProLB (www.prolb-cfd.com) sont validées en termes de vitesse et de quantités turbulentes à l'aide d'un vaste ensemble de données expérimentales portant sur la cellule test échelle 1 équipée d'un système de ventilation mécanique MINIBAT (Kuznik 2005).

2. CELLULE EXPERIMENTALE MINIBAT

2.1. PRESENTATION GENERALE

La géométrie de la cellule test expérimentale échelle 1 MINIBAT est représentée sur la Figure 1. Le dispositif est constitué d'une pièce dont les dimensions sont 3,10m, 3,10m, 2,50m respectivement aux axes (x, y, z). La face sud vitrée est en contact avec une enceinte climatique dont la température

est contrôlée par un système de traitement d'air et maintenue constante. Une garde thermique régule la température de l'air autour de la cellule à 21.5°C.

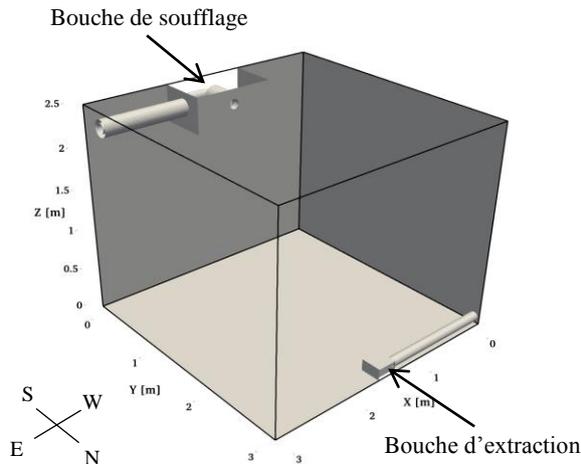


Figure 1 : Schéma de la cellule expérimentale MINIBAT

Grandeur mesurée	Instrument	Résolution / Incertitude
Débit de ventilation	débitmètre	$\pm 0,5 \text{ m}^3/\text{h}$
Température de soufflage et de surface	Thermocouple type K	$\pm 0,4^\circ\text{C}$
Température d'air	Sonde Pt100	$\pm 0,2^\circ\text{C}$
Vitesse d'air	Sonde à trois fils chaud	0,05 m/s

Tableau 1 : Métrologie de la cellule expérimentale MINIBAT

Un jet axisymétrique est généré par un système de ventilation situé sur la partie supérieure de la paroi sud. Sa géométrie a été spécifiquement conçue pour obtenir la structure axisymétrique du jet sachant que la gaine d'amenée d'air est positionnée sur un axe perpendiculaire par rapport à l'axe du jet (Kuznik et Brau 2005). La bouche de ventilation de diamètre $D=12\text{cm}$ se trouve donc décalée de 57cm de la paroi sud et de 18cm du plafond. L'extraction est réalisée par une bouche disposée sur la partie basse de la paroi opposée à la ventilation. La métrologie mise en œuvre dans la cellule lors des campagnes expérimentales est présentée dans le Tableau 1.

2.2. CAS ETUDIE

Plusieurs cas de jet isotherme, chaud et froid ont été étudiés dans (Kuznik 2005). Nous nous intéressons dans cette étude uniquement au jet isotherme avec les conditions expérimentales données dans le Tableau 2.

T_0 [°C]	Re_0	U_0 [m/s]
21.8	23680	2.96

Tableau 2 : Conditions expérimentales du jet isotherme

avec T_0 , la température de soufflage, Re_0 le nombre de Reynolds basé sur le diamètre du jet et U_0 la vitesse en sortie de bouche.

3. MODELISATION NUMERIQUE

La LBM permet de simuler le comportement macroscopique des fluides. Cependant, à la différence des solveurs conventionnels basés sur des approches de Navier-Stokes adoptant une description macroscopique de l'écoulement, la LBM dérive de la théorie cinétique et de l'équation de Boltzmann basée sur une description mésoscopique de l'écoulement. La dynamique des fluides est simulée au moyen d'étapes de propagation et de collision. Il est possible de retrouver les équations de Navier-Stokes 3D faiblement compressibles au second ordre en utilisant la théorie de Chapman-Enskog pour

les petits nombres de Knudsen. De plus amples détails sur le LBM peuvent être trouvés dans (Krüger, et al. 2016).

Sur la base du cadre général de la méthode LBM, différents développements ont été apportés au solveur ProLB afin d'améliorer la stabilité du calcul tout en conservant la simplicité et la précision du schéma (Jacob, et al. 2018). L'approche LBM-LES avec le solveur ProLB a notamment été validée pour la dispersion de polluants et des écoulements urbains dans des géométries complexes (Jacob, et al. 2021).

Le modèle sous-maille utilisé dans le cadre de la présente étude est le « Shear-Improved Smagorinsky Model » (Lévêque, et al. 2007).

Les conditions aux limites du domaine utilisées pour la simulation du jet isotherme sont détaillées dans le Tableau 3.

Entrée	Sortie	Gaine de soufflage / extraction	Parois
Débit massique constant	Débit massique constant	Adiabatique	Loi de paroi (Afzal 1996)

Tableau 3 : Conditions aux limites du domaine

Les conditions d'entrée et de sortie en débit sont imposées à des sections éloignées de la bouche de soufflage et d'extraction, où le fluide peut être considéré en régime pleinement établi.

Le domaine de calcul est discrétisé en plusieurs volumes imbriqués de mailles cartésiennes uniformes. Le maillage est particulièrement raffiné dans la conduite d'amenée d'air et la zone de développement du jet avec une taille de maille minimale $\Delta x_{min} = D/35$. La conduite d'évacuation est quant-à-elle discrétisée avec une taille de maille $\Delta x = D/17.5$ et le reste du domaine avec une taille de maille $\Delta x = D/2.1875$. Des zones de transition à $\Delta x = D/17.5$, $\Delta x = D/8.75$ et $\Delta x = D/4.375$ sont automatiquement ajoutées entre la zone de développement du jet et le reste du domaine de même qu'entre la conduite d'évacuation et le reste du domaine. Ainsi, le maillage utilisé dans ce calcul se compose de 31.2 millions de nœuds et représenté Figure 2. Une étude de convergence en maillage menée au préalable a montré que ce choix du maillage est un bon compromis entre coût de calcul et convergence des champs de vitesse moyenne dans la zone de développement du jet. L'état d'équilibre a été atteint après $75T^*$ avec $T^*=Lc/Uc$ le temps convectif calculé à partir de la longueur caractéristique $Lc=4.65m$ et la vitesse caractéristique $Uc=2m/s$ et toutes les statistiques présentées sont calculées sur $15T^*$.

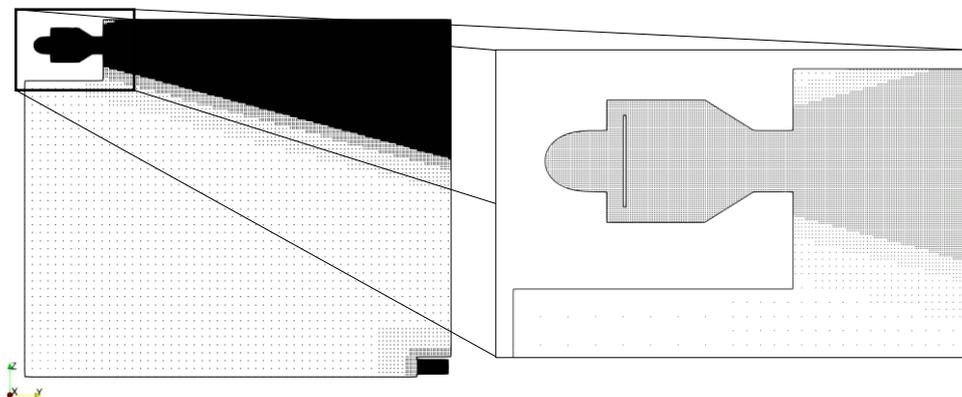


Figure 2 : Maillage dans le plan médian de la cellule

4. ANALYSE DU JET ISOTHERME

4.1. TAUX D'EXPANSION

Les taux d'expansion verticale et latérale sont définis comme la variation de la distance entre la position du maximum de la vitesse moyenne suivant l'axe du jet et la moitié de la vitesse maximale respectivement perpendiculairement et parallèlement à la paroi comme défini sur la Figure 3. Le Tableau 4 récapitule les valeurs expérimentales et numériques des taux d'expansion α_{ver} et α_{lat} . Le rapport $\alpha_{ver}/\alpha_{lat}$ est également calculé et permet de rendre compte de l'anisotropie de l'expansion. Le jet isotherme expérimental présente un taux d'expansion verticale plus élevée que le taux d'expansion latérale avec un rapport de 1.8 témoignant ainsi d'une anisotropie importante dans l'expansion du jet. Cette tendance est retrouvée pour le jet simulé mais avec un rapport légèrement inférieur de 1.56. Outre le rapport entre les expansions verticales et latérales, les valeurs des taux d'expansions prédites et expérimentales restent cohérentes malgré des écarts atteignant 38% pour l'expansion latérale du jet.

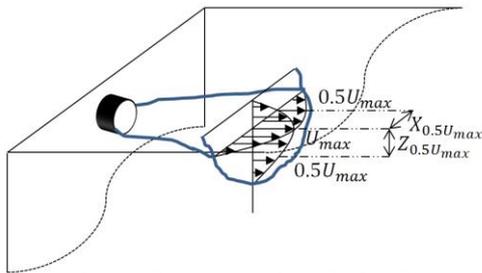


Figure 3 : Expansion du jet de paroi - définitions

	α_{ver}	α_{lat}	$\alpha_{ver}/\alpha_{lat}$
Expérimental	0.103	0.056	1.8
Simulation	0.12	0.077	1.56

Tableau 4: Taux d'expansion expérimentaux et simulés

4.2. PROFILS DE VITESSE MOYENNE

La Figure 4 montre sept profils de vitesse moyenne mesurée et simulée à différentes abscisses dans le plan médian de la cellule au niveau de l'axe du jet, soit à des distances allant de 0.03m à 1.83m de la bouche de soufflage. La forme des profils simulés est en bon accord avec les profils expérimentaux avec une bonne prédiction de la valeur et la position de vitesse maximale pour $y < 2.1m$. Des différences notables sont cependant à constater dans la zone proche de la paroi ($2.32m < z < 2.5m$) alors que les vitesses moyennes dans la zone éloignée de la paroi ($2m < z < 2.32m$) sont très bien prédites. Ces écarts peuvent s'expliquer notamment par une faiblesse de la modélisation proche paroi adoptée.

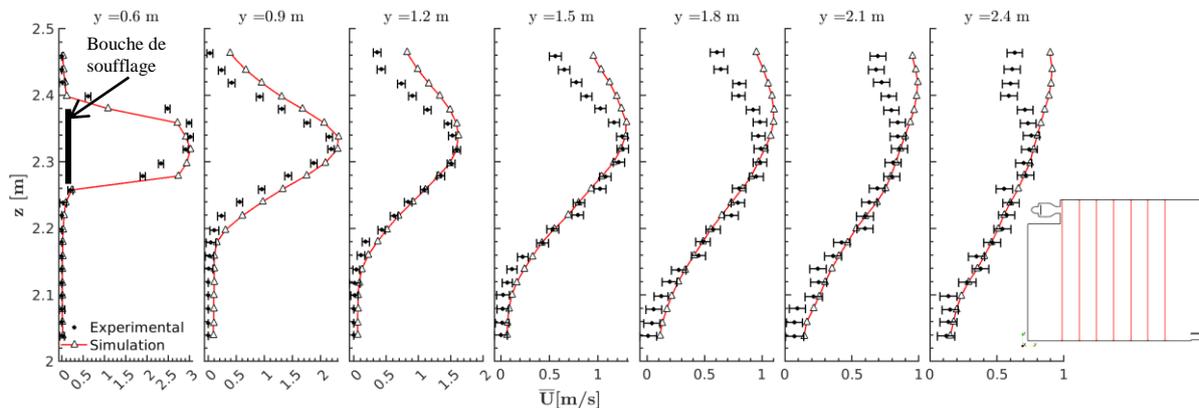


Figure 4 : Profils de vitesse moyenne dans le plan median

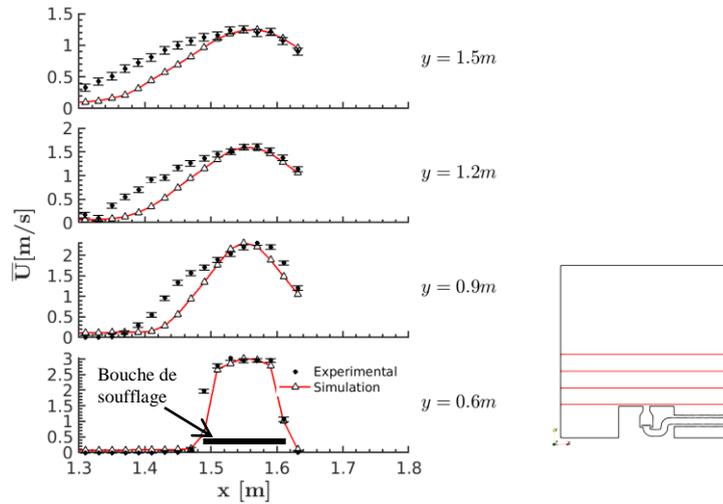


Figure 5 : Profils de vitesse moyenne dans le plan horizontal

La Figure 5 montre quatre profils de vitesse moyenne mesurée et simulée à différentes abscisses dans le plan horizontal au niveau de l'axe du jet, soit à des distances allant de 0.03m à 0.93m de la bouche de soufflage. La prédiction de la valeur et la position de la vitesse maximale est en bon accord avec l'expérimental. La forme des profils est également bien prédite mais à mesure qu'on s'éloigne de la bouche, l'expansion latérale du jet est sous-estimée.

4.3. REPARTITION DE LA TURBULENCE

4.3.1. Profils d'énergie cinétique turbulente

Une première analyse de la répartition de la turbulence peut être effectuée avec l'étude de l'énergie cinétique turbulente du jet se définissant comme la moitié de la somme des variances des fluctuations des composantes du vecteur vitesse. La Figure 6 montre sept profils de l'énergie cinétique turbulente mesurée et résolue à différentes abscisses dans le plan médian de la cellule au niveau de l'axe du jet. Les profils diffèrent principalement proche de la bouche de soufflage à $y=0.6m$, $y=0.9m$, $y=1.2m$. L'allure du profil à $y=0.6m$ diffère particulièrement dans la zone centrale du jet résultant de la modélisation de l'écoulement dans la conduite d'amenée d'air. Les profils tendent ensuite à s'améliorer pour se trouver en très bon accord dans la zone lointaine de développement du jet à partir de $y=1.2m$.

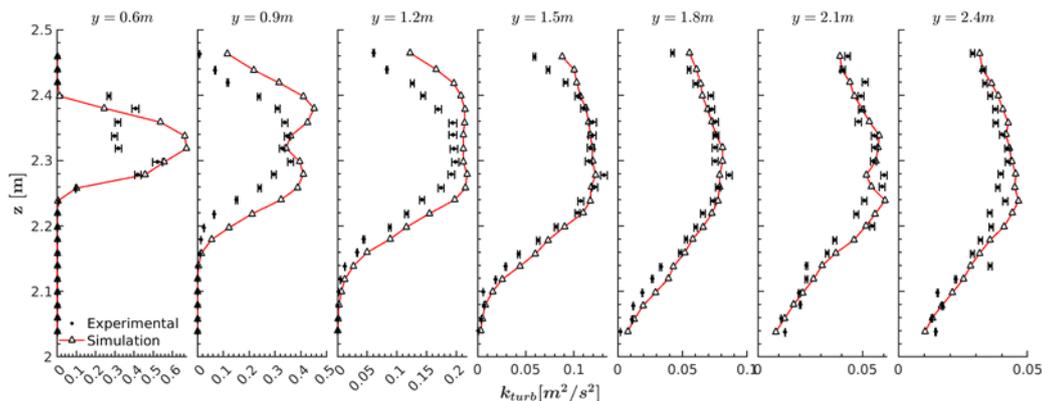


Figure 6 : Profils d'énergie cinétique turbulente dans le plan médian

4.3.2. Analyse qualitative et typologie de l'écoulement de jet : triangle de Lumley

Le triangle de Lumley (Lumley 1979) est une représentation des invariants du tenseur d'anisotropie de Reynolds défini par $b_{ij} = \frac{R_{ij}}{2k} - \frac{1}{3}\delta_{ij}$, avec R_{ij} les composantes du tenseur de Reynolds et k

l'énergie cinétique turbulente. Les 3 invariants principaux du tenseur d'anisotropie, nommée I, II et III, sont calculés à partir des valeurs propres du tenseur. Le premier invariant étant égal à zéro, le triangle de Lumley représente alors la carte des invariants dans le plan $(-II, III)$, la limite gauche étant représentative d'une turbulence en expansion axisymétrique en forme de disque et la limite droite étant liée à une turbulence en contraction axisymétrique en forme de cigare. Nous utiliserons dans cette étude une représentation linéarisée des invariants II^* et III^* (Pope 2000) afin d'obtenir des caractérisations de la turbulence plus discriminantes. La Figure 7 compare le triangle de Lumley des points de mesure obtenu dans (Kuznik 2005) à celui issu de la simulation appartenant au plan médian du jet. Au niveau des résultats expérimentaux, la turbulence du jet montre principalement une contraction axisymétrique tendant vers une turbulence unidimensionnelle dans certaines zones. Une expansion axisymétrique est observée proche de l'orifice de soufflage ($y < 1.2m$) témoignant de la présence de structures cohérentes en anneaux (Kuznik 2005). La simulation permet de retrouver les principales caractéristiques de la turbulence du jet expérimental. En effet, les résultats montrent une turbulence principalement en contraction axisymétrique avec quelques points tendant vers une expansion axisymétrique proche de la bouche de soufflage. L'expansion axisymétrique reste toutefois moins marquée que l'expérimental avec une turbulence tendant un peu plus vers l'isotropie.

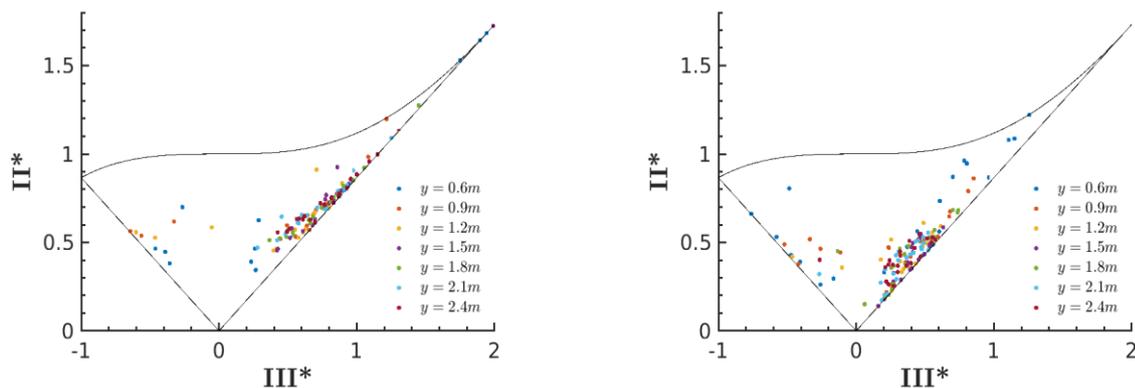


Figure 7 : Triangles de Lumley, expérimental (à gauche) et simulé (à droite)

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les jets horizontaux se développant le long d'une paroi générés par les systèmes de ventilation ont la particularité de présenter une turbulence fortement anisotrope difficile à prédire pour les modèles statistiques stationnaires de type RANS. En se basant sur la configuration expérimentale MINIBAT et le cas du jet axisymétrique isotherme se développant près du plafond étudié dans (Kuznik 2005), cette contribution propose la validation d'une modélisation de type LBM-LES avec le code ProLB. Les résultats montrent une bonne prédiction des profils de vitesse moyenne du jet malgré quelques faiblesses dans la zone proche de la paroi. L'étude de la turbulence au travers des profils d'énergie cinétique turbulente et de l'analyse des triangles de Lumley révèlent la capacité de la modélisation adoptée à reproduire la répartition de la turbulence dans le jet. Ainsi, cette approche de modélisation s'avère adaptée à l'application bâtiment visée et peut-être appliquée plus généralement à la simulation des écoulements isothermes se développant au sein des bâtiments. En continuité de ce travail, la simulation des jets anisothermes chaud et froid est en cours d'étude afin d'évaluer la prise en compte des effets thermiques couplés à la turbulence. Il est également envisagé de coupler la modélisation du

jet chaud avec un modèle de bâtiment haute résolution (Gresse, et al. 2021). Ce couplage permettra de prendre en compte des conditions limites dynamiques aux parois de la pièce plus réalistes et d'évaluer finement la dynamique du transfert thermique en paroi et du confort.

6. REMERCIEMENTS

Le solveur ProLB utilisé dans cette étude est développé au sein d'une collaboration scientifique incluant CS GROUP, Renault, Airbus, l'Ecole Centrale de Lyon, le CNRS et Aix-Marseille Université. Ces travaux ont bénéficiés d'un accès aux moyens de calcul haute performance du P2CHPD de la FLSMN et du TGCC au travers de l'allocation de ressources 2021-A0112A13030 attribué par GENCI.

7. BIBLIOGRAPHIE

- Blocken, Bert. 2018. «LES over RANS in building simulation for outdoor and indoor applications: A foregone conclusion?» *Building Simulation*.
- Crouse, B., M. Krafczyk, S. Kühner, E. Rank, et C. van Treeck. 2002. «Indoor air flow analysis based on lattice Boltzmann methods.» *Energy and Buildings*.
- Gresse, Teddy, Lucie Merlier, Jean-Jacques Roux, et Frédéric Kuznik. 2021. «Development of a 3D and high resolution dynamic thermal model of a room with sun patch evolution for thermal comfort applications.» *Building Simulation Conference Proceeding*.
- Han, Mengtao, Ryoza Ooka, et Hideki Kikumoto. 2018. «Lattice Boltzmann method-based large-eddy simulation of indoor isothermal airflow.» *International Journal of Heat and Mass Transfer*.
- Jacob, Jérôme, Lucie Merlier, Felix Marlow, et Pierre Sagaut. 2021. «Lattice Boltzmann Method-Based Simulations of Pollutant Dispersion and Urban Physics.» *Atmosphere*.
- Jacob, Jérôme, Orestis Malaspinas, et Pierre Sagaut. 2018. «A new hybrid recursive regularised bhatnagar–gross–krook collision model for lattice boltzmann method-based large eddy simulation.» *Journal of Turbulence*.
- Krüger, Timm, Halim Kusumaatmaja, Alexander Kuzmin, Orest Shardt, Goncalo Silva, et Erlend Magnus Viggen. 2016. *The Lattice Boltzmann Method - Principles and Practice*. Springer.
- Kuznik, Frédéric. 2005. «Étude expérimentale des jets axisymétriques anisothermes horizontaux se développant près d'une paroi : application à la modélisation numérique des cavités ventilées.» Thèse de doctorat, l'INSA de Lyon.
- Kuznik, Frédéric, et Jean Brau. 2005. «Numerical and experimental investigation of a mechanically ventilated room: The impact of inlet boundary conditions on CFD modelling of the ventilation system.» *International Journal of Ventilation*.
- Kuznik, Frédéric, Gilles Rusaouen, et Jean Brau. 2008. «A second order turbulence model for the prediction of air movement and heat transfer in a ventilated room.» *Building Simulation*.
- Lévêque, Emmanuel, F. Toschi, Liang Shao, et Jean-Pierre Bertoglio. 2007. «Shear-improved Smagorinsky model for large-eddy simulation of wall-bounded turbulent flows.» *Journal of Fluid Mechanics*.
- Lumley, John L. 1979. «Computational Modeling of Turbulent Flows.» *Advances in Applied Mechanics*.
- Pope, Stephen B. 2000. *Turbulent Flow*. Cambridge: University Press.
- Sagaut, Pierre. 2006. *Large Eddy Simulation for Incompressible Flows: An Introduction*. Springer.
- Afzal, Noor. 1996. «Wake layer in a turbulent boundary layer with pressure gradient: a new approach.» *Gersten, K. (eds.) IUTAM Symposium on Asymptotic Methods for Turbulent Shear Flows at High Reynolds Numbers*.
- Zhai, Zhiqiang, Zhao Zhang, Wei Zhang, et Qingyan Chen. 2007. «Evaluation of Various Turbulence Models in Predicting Airflow and Turbulence in Enclosed Environments by CFD: Part-1: Summary of Prevalent Turbulence Models.» *HVAC&R Research*.