

Application de la méthode de Boltzmann sur gaz réseau avec simulation aux grandes échelles (LBM LES) aux problématiques de thermo-aéraulique des bâtiments et de la ville : Possibilités actuelles et développements du logiciel ProLB

Lucie Merlier^{*1,2}, Jérôme Jacob¹, Pierre Sagaut¹

¹ Aix Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, M2P2 UMR7340
F-13451, Marseille, France

² Université Lyon 1, CNRS, INSA-Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, CE-THIL UMR5008

F-69621, Villeurbanne, France

*lucie.merlier@univ-lyon1.fr

RESUME. Les processus aérauliques instationnaires turbulents d'origine mécanique ou thermique influent sur le comportement thermique des bâtiments, via les échanges convectifs externes et les infiltrations d'air/ventilation, ainsi que sur la qualité des ambiances intérieures, avec ou sans système CVC. Cette contribution introduit donc un modèle micrométéorologique innovant, construit dans le cadre du logiciel ProLB, actuellement adapté pour traiter des problèmes de physique du bâtiment et de la ville. Basé sur une approche de simulation aux grandes échelles (CFD LES) et la méthode de Boltzmann sur gaz réseau (LBM), ce modèle est déjà capable de traiter de la dispersion de polluants et de la prédiction des champs moyens d'écoulement dans des environnements urbains complexes. Les développements se concentrent maintenant sur la distribution de la pression en façade des bâtiments, ainsi que sur les problèmes de qualité de l'air intérieur et de confort thermique des usagers.

MOTS-CLÉFS. Simulation aux grandes échelles (LES), Méthode de Boltzmann sur gaz réseau (LBM), Dispersion de polluant, Ecoulements urbains externes et internes, Qualité d'ambiance.

ABSTRACT. The thermal behavior of buildings, through external convective exchanges, air infiltration / ventilation, and the quality of indoor ambiances equipped or not with HVAC systems depend on unsteady mechanically or thermally induced turbulent aeraulic processes. Thus, this contribution introduces an innovative micrometeorological model built using the ProLB software, currently adapted to handle building and urban physics problems. Based on a large eddy simulation approach (CFD LES) and the lattice Boltzmann method (LBM), this model is already capable of dealing with the dispersion of pollutants and the prediction of wind speed in complex urban environments. Developments are now focusing on the pressure distribution on building facades as well as indoor air quality and thermal comfort problems.

KEYWORDS. Large eddy simulation (LES), Lattice Boltzmann method (LBM), Pollutant dispersion, External and internal urban flows, Indoor and outdoor environmental quality.

1 INTRODUCTION

Dans le contexte actuel de changement global et de densification urbaine, le paradigme visant à réduire les consommations de chauffage de bâtiments isolés a évolué vers l’optimisation de la performance thermique et énergétique des bâtiments urbains, y compris en été. Les échelles spatiales et temporelles d’intérêt sont passées d’un bâtiment isolé pendant un an à celles d’un quartier au cours d’une journée voire moins. Plusieurs études ont mis en évidence les bénéfices apportés par l’utilisation de simulations microclimatiques incluant de la CFD par rapport aux simulations thermiques dynamiques classiques de bâtiments, pour mieux évaluer le comportement énergétique des bâtiments urbains (Malys et al., 2015; Merlier et al., 2019a). Néanmoins, la plupart de ces modèles reposent sur une approche Navier-Stokes moyennée (Reynolds Averaged Navier-Stokes - RANS), dont la capacité à prédire les phénomènes recirculatoires est assez grossière alors que des récentes études (Merlier et al., 2019b) ont mis en évidence l’importance des conditions aérauliques urbaines sur le comportement thermique des bâtiments, notamment du fait des infiltrations d’air engendrées, de la ventilation naturelle et des transferts convectifs. Ces effets sont induits par des processus instationnaires turbulents d’origine mécanique ou thermique.

Ainsi, le présent article introduit une approche innovante de CFD avec simulation aux grandes échelles (LES), développée dans le cadre du logiciel ProLB (CS, 2018). Initialement développée pour le domaine aéronautique, l’approche a été adaptée pour les problématiques de physique urbaine. Son aspect innovant est double. Premièrement, il s’agit d’une approche fondamentalement dynamique. La LES résolvant les échelles importantes de la turbulence vis à vis des applications visées, elle permet l’étude des processus turbulents critiques et de leurs effets sur l’écoulement moyen et les différents transferts aérauliques et convectifs. Deuxièmement, elle repose sur la méthode de Boltzmann sur gaz réseau (LBM). Grâce à sa formulation et au traitement des conditions aux limites solides, cette approche est efficace numériquement, et répond donc à l’un des principaux problèmes des approches de CFD à haute fidélité. Ainsi, elle peut gérer efficacement des simulations numériques détaillées d’environnements bâtis complexes, et permet l’étude d’un large éventail de problèmes de physique urbaine.

Afin de présenter l’approche plus en détails en termes de capacités et de développements, cet article est structuré de la façon suivante. La partie *Méthodologie* résume les fondements scientifiques de l’approche développée. Ensuite, la partie *Applications* décrit trois études de validation déjà effectuées, et introduit de nouveaux résultats. Les développements en cours sur les ambiances intérieures sont aussi présentés. Enfin, la partie *Discussion et conclusion* expose comment cette approche est en mesure d’améliorer les études numériques usuelles de physique du bâtiment, et ouvre des perspectives.

MÉTHODOLOGIE

Cette section fait la synthèse des principes généraux de l’approche développée. Plus de détails à propos de la méthode générale de Boltzmann sur gaz réseau peuvent être trouvés dans Krüger et al. (2017). Les spécificités des modèles développés sont détaillées dans Jacob & Sagaut (2018); Merlier et al. (2018, 2019c).

GÉNÉRALITÉS Comme les approches classiques de type Navier–Stokes, la LBM vise principalement à simuler le comportement macroscopique des fluides. Cependant, la LBM est basée sur une description mésoscopique de l’écoulement. La dynamique des fluides est simulée à travers des étapes de diffusion et de collision, telles que :

$$f_i(\mathbf{x} + \mathbf{c}_i \Delta t, t + \Delta t) - f_i(\mathbf{x}, t) = \Omega_i(\mathbf{x}, t) \quad (1)$$

Où \mathbf{c}_i sont les vitesses discrètes (ici D3Q19, i.e. 19 vitesses discrètes en 3 dimensions), $f_i(\mathbf{x}, t)$ est la fonction de distribution, $\Omega_i(\mathbf{x}, t)$ est l’opérateur de collision, i.e. le terme source représentant

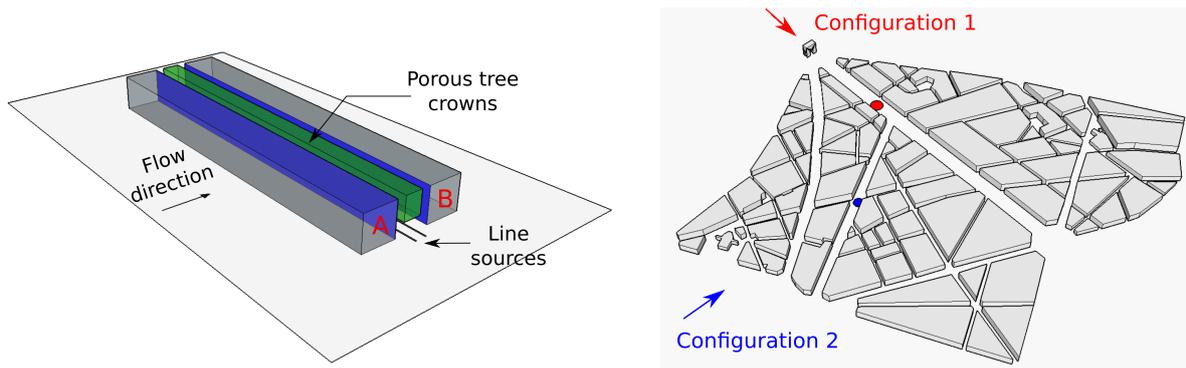


FIGURE 1. Configurations d'étude pour la dispersion de polluants. Gauche : Canyon avec arbres (CO-DASC). Droite : Quartier de Paris (MODITIC)

la redistribution de f_i induite par la collision.

A partir de la LBM il est possible de retrouver les équations de Navier–Stokes 3D faiblement compressibles au second ordre en utilisant la théorie de Chapman Enskog. Dans le modèle présenté, une procédure de reconstruction récursive hybride régularisée (Jacob et al., 2018) est utilisée pour l'estimation du terme de collision. Les conditions aux limites sont intégrées en utilisant la méthode 'cut cell', ce qui réduit substantiellement le temps de pré-traitement, et le modèle de viscosité de sous maille de Smagorinsky est utilisé pour clore les équations de la LES.

DÉVELOPPEMENTS SPÉCIFIQUES Afin de pouvoir traiter des problèmes de physique urbaine et des bâtiments, le modèle développé peut intégrer différents forçages spécifiques selon Guo et al. (2002). En particulier :

- la force de traînée (F_{por}) induite par les milieux poreux est modélisée grâce à une formulation de Forchheimer ;
- la flottabilité d'origine thermique peut être modélisée en utilisant une approche classique de type Boussinesq ou grâce à la loi des gaz parfaits ;
- et la force de flottabilité (F_c), due à des différences de densités de gaz, peut être modélisée grâce à un terme source similaire à ce qui est habituellement pris en compte pour la thermique.

Il est aussi possible de modéliser la condensation de l'eau et la stabilité atmosphérique (Feng et al., 2019), et de prendre en compte d'autres forçages externes tels que les effets de Coriolis ou de mésoéchelle.

Par ailleurs, l'approche développée est hybride afin de pouvoir traiter efficacement des problématiques plus complexes que de simples problèmes d'aérodynamique tels que la dispersion de polluants ou les transferts de chaleur. Les équations de conservation de la masse et de quantité de mouvement sont résolues avec la LBM, tandis que les équations de conservation des scalaires sont résolues en utilisant la méthode habituelle des volumes finis / différences finies. Il est ainsi possible de considérer seulement une seule inconnue par équation additionnelle.

APPLICATIONS

ÉTUDE DE LA DISPERSION DES POLLUANTS

DANS DES CANYONS AVEC ARBRES Un canyon urbain à échelle réduite (1 :150, $H = 12\text{cm}$, $H/W = 1$, Fig. 1) avec simulation d'émission de polluants due au trafic routier (KIT, 2017) perpendiculaire à l'écoulement incident et avec des canopées d'arbres plus ou moins denses ($\lambda =$

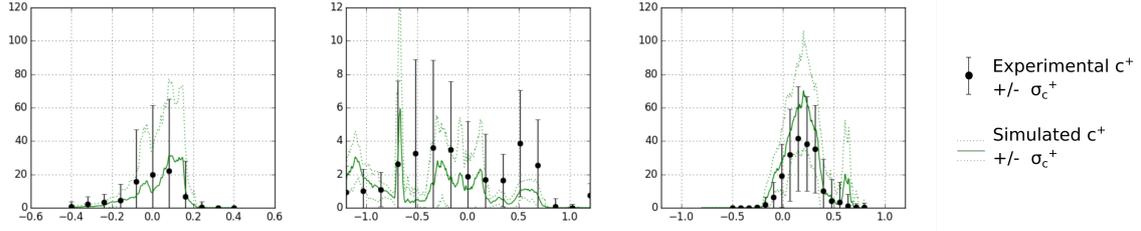


FIGURE 2. Comparaison des profils de concentration expérimentaux et numériques à $X = 0.75m$ en aval de la source et au-dessus du modèle. De gauche à droite : C1, gaz neutre ; C1, gaz dense ; C2, gaz neutre

0, 80 et $200 m^{-1}$) alignées selon l'axe du canyon a été traité comme premier cas de validation. Des simulations sur 25s de temps physique ont été effectuées ($dx_{min} = 1.25 \times 10^{-3}m$, 5 niveaux de résolution, $N \approx 40 \times 10^6$ points et $dt = 1.44 \times 10^{-5}s$) sur un supercalculateur de 240 coeurs. Les dernières 10s ont été utilisées pour le post traitement.

La comparaison qualitative et quantitative des concentrations moyennes mesurées ou simulées sur les murs du canyon a montré un très bon comportement du modèle, confirmé par le calcul des indicateurs statistiques de performance globaux (Chang & Hanna, 2004). De plus hauts niveaux de concentration sont simulés sur le mur A, tandis que des niveaux de concentration relativement bas sont trouvés pour le mur B. De plus hauts niveaux de concentration sont aussi observés dans la partie centrale du canyon et en présence de canopées végétales denses. Par ailleurs, grâce à la dynamique de l'approche, de forts pics de concentration ont été mis en évidence, notamment en présence d'une canopée végétale dense, ce qui pourraient être particulièrement dommageable pour les problèmes d'exposition à court terme.

DANS DES QUARTIERS AVEC GAZ DENSES Une seconde étude de validation a été menée sur un quartier de Paris reproduit à échelle réduite (1 :350, $H_{moy} = 8cm$), dans lequel des lâchers de gaz neutres et denses au sol ont été simulés en écoulement canalisé (config. 1 Fig. 1) ou dans une petit carrefour non aligné avec l'écoulement dominant (config. 2) (FFI, 2016; Robins et al., 2016). Des simulations sur 27.5s de temps physique ($dx = 1.75 \times 10^{-3}m$, 5 niveaux de résolution, $N \approx 200 \times 10^6$, $dt = 1.5 \times 10^{-4}s$) ont été effectuées sur un supercalculateur avec environ 1000 coeurs. Les 5 dernières secondes ont été considérées pour le post traitement.

La comparaison des concentrations moyennes mesurées et simulées a montré une bonne performance du modèle, généralement attestée par le calcul des indicateurs de performance statistiques urbains de Hanna & Chang (2012) pour la concentration au niveau de la rue. Le gaz neutre émis dans l'écoulement canalisé est transporté en aval et se mélange progressivement verticalement, alors que le gaz dense s'étale autour de la source et reste proche du sol. Le gaz neutre émis dans le carrefour se propage quant-à-lui principalement verticalement en raison des obstacles construits en amont et en aval. Par ailleurs, les mesures et les résultats de simulation montrent également un bon accord concernant à la fois la moyenne et l'écart type des niveaux de concentration au-dessus de la canopée végétale (Fig. 2), ce qui suggère que les mécanismes de transport dynamiques sont bien reproduits. Étant capable de fournir la distribution temporelle de la concentration, le modèle s'avère donc utile pour la conception de modèles opérationnels à réponse rapide.

CONFORT PIÉTON ET PRESSIONS SUR LES FACADES

CHAMPS DE VITESSE EN ENVIRONNEMENT COMPLEXE Une zone dense de Tokyo incluant immeubles de grande hauteur et constructions basses (Fig. 3, (Tominaga et al., 2008)) a été également simulée, à taille réelle cette fois (échelle 1 :1, $H_{max} = 225m$, $dx_{min} = 0.5m$, 7 niveaux de

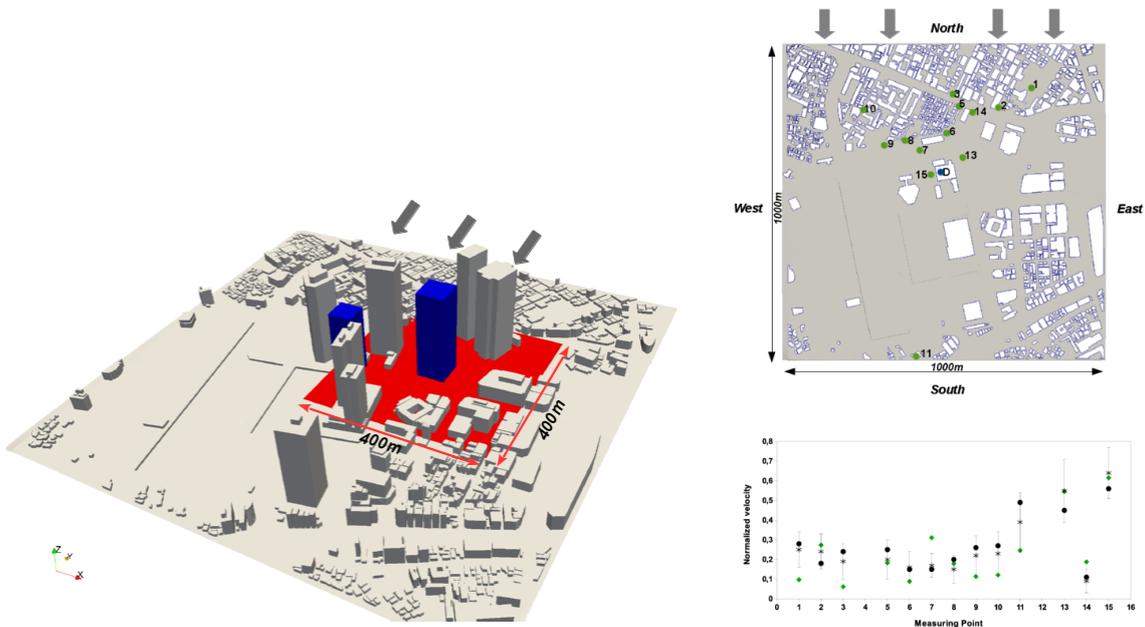


FIGURE 3. Etude de validation pour Tokyo. Gauche : Zone d'étude (zone d'intérêt en rouge et bâtiments fictifs en bleu). Droite : Comparaison des vitesses mesurées (* in situ, o en soufflerie et simulées \blacklozenge)

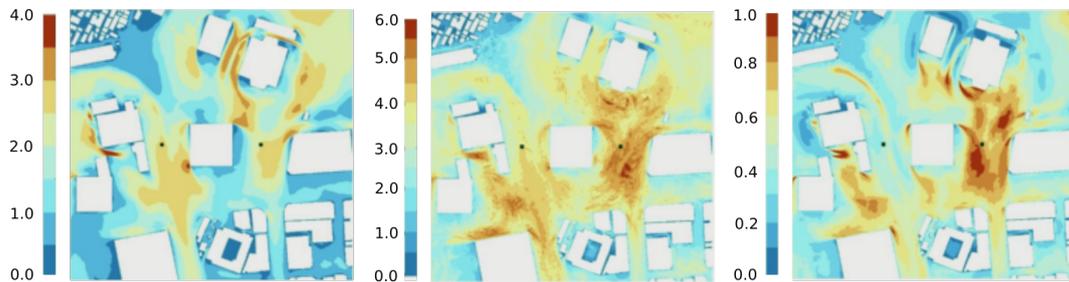


FIGURE 4. Champ de vent simulé à 2m du sol avec $U_{ref} = 1.69m/s$. Gauche : moyenné sur 1h, Milieu : moyenné sur 3s, Droite : Ecart type

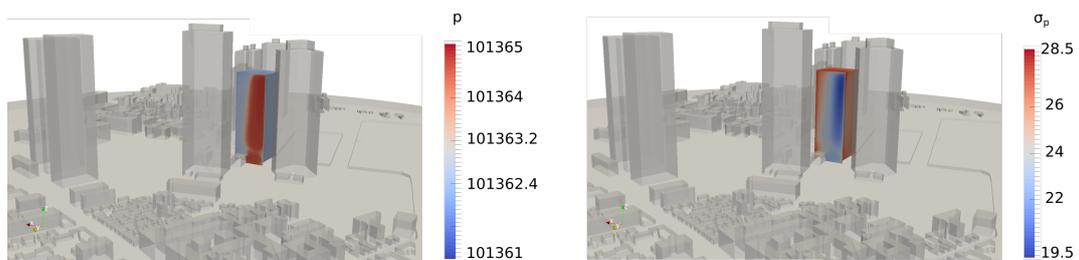


FIGURE 5. Distribution de la pression sur le bâtiment fictif [Pa] . Gauche : moyenne, Droite : Ecart type

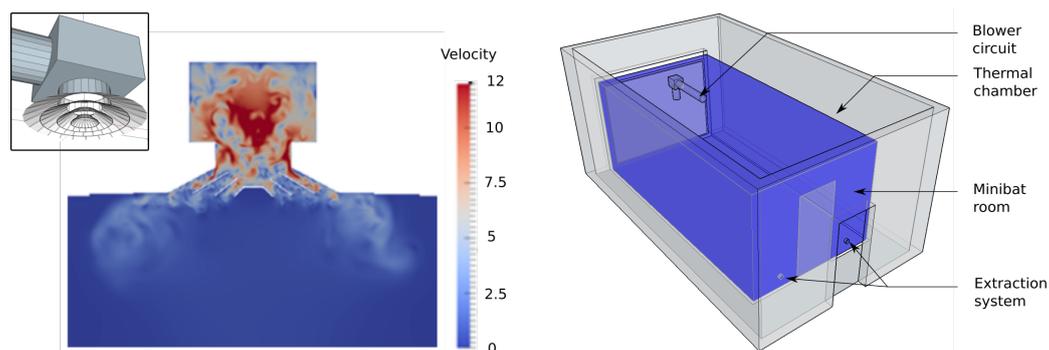


FIGURE 6. Configurations étudiées pour l'intérieur. Gauche : Champ de vitesse instantané dans la bouche de soufflage [m/s], mode froid. Droite : Géométrie de Minibat

résolution, $N \approx 136 \times 10^6$ points, $dt = 7.5 \times 10^{-3}s$) sur 2h de temps physique sur un supercalculateur avec 500 coeurs. La dernière heure a été conservée pour le post traitement. Les comparaisons de vitesse moyenne en différents points montrent là encore un très bon comportement du modèle (Fig.3).

Le confort au vent des piétons a ensuite été étudié autour d'un gratte-ciel fictif ($H = 150m$) situé en aval d'autres tours. Une très grande variabilité spatiale des champs de vitesse moyennés sur 1h et 3s ainsi que le champ d'écart type moyen sur 1h est mise en évidence du fait de fortes interactions entre les sillages des bâtiments. Ces résultats suggèrent que les sollicitations aérodynamiques des bâtiments urbains sont très instationnaires et spatialement hétérogènes et qu'elles doivent ainsi différer considérablement des conditions idéales de terrain ouvert.

DISTRIBUTION DES PRESSIONS Pour mieux évaluer les effets de l'environnement bâti sur les sollicitations aérodynamiques et aérauliques des bâtiments, la distribution de la pression sur les façades du bâtiment fictif a également été étudiée. La répartition de la pression moyennée sur 1h et l'écart type correspondant (Fig. 5) mettent en évidence des gradients de pression latéraux sur la façade au vent du bâtiment étudié, avec une zone de haute pression liée au passage d'un écoulement entre les deux tours amont, qui bloquent principalement le flux incident autrement. Des zones de dépression se retrouvent sur les autres façades du bâtiment avec le développement de recirculations. Par ailleurs, les valeurs élevées de l'écart type mettent en évidence que les interférences de sillage et les phénomènes de recirculation induisent une grande variabilité temporelle de la distribution de la pression sur les emplacements de façade correspondants.

Ces résultats montrent donc bien la dépendance de la distribution de la pression aux spécificités morphologiques d'un bâtiment et de son environnement. La variabilité spatiale et temporelle de celle-ci, en particulier dans les régions d'interférence de sillage et de recirculation, suggère donc que la prise en compte d'une pression constante et spatialement uniforme sur les façades des bâtiments urbains est une hypothèse forte, notamment lorsqu'il s'agit de concevoir des systèmes de ventilation naturelle ou d'estimer le débit massique dans les orifices d'entrée d'air.

AMBIANCES INTÉRIEURES Le modèle étant validé pour l'extérieur (Jacob & Sagaut, 2018; Merlier et al., 2018, 2019c), y compris en présence de différence de densité, et ayant été montré capable de fournir des conditions limites aérauliques pertinentes pour les problèmes habituels de physique du bâtiment en termes de distribution de pression, les développements en cours se concentrent sur la modélisation des conditions thermo-aérauliques intérieures, en particulier en présence de systèmes CVC. Les échelles du système et de la pièce sont actuellement plus particulièrement étudiées (Fig. 6).

Les résultats préliminaires montrent comment la turbulence peut se développer dans les systèmes de ventilation et comment les champs de vitesse et de température peuvent être modifiés

par l'air injecté dans une pièce. Les comportements simulés affectant directement la qualité des ambiances intérieures, ces résultats sont encourageants en ce qui concerne la capacité actuelle et le potentiel de l'approche développée pour étudier le confort thermique intérieur et les problèmes de qualité de l'air.

DISCUSSION ET CONCLUSION

Cette contribution a introduit une approche CFD innovante, visant à améliorer les pratiques courantes de simulations thermiques de bâtiments à travers :

- l'accès aux propriétés des champs d'écoulements ;
- une meilleure prise en compte des dynamiques rapides induites notamment par la turbulence.

L'approche développée devrait par ailleurs pouvoir gérer les couplages multi physiques (couplages thermique et radiatif notamment) et intérieur / extérieur très prochainement, et intégrer le comportement des usagers afin de permettre, de façon pertinente, une meilleure connaissance et prédiction des conditions thermo-aérauliques intérieures et extérieures, apparaissant désormais obligatoires pour relever les défis d'économie et de gestion de l'énergie dans un contexte de changement global.

Les principaux problèmes liés à l'introduction des dynamiques rapides dans la simulation énergétique des bâtiments sont relatifs à la gestion des différentes échelles de temps et d'espace. En plus de la complexité des phénomènes physiques couplés impliqués, les difficultés d'une telle approche viennent des coûts de calcul et de la qualité des données d'entrée requises par la réalisation de simulations instationnaires à haute résolution. L'approche présentée ne prétend pas répondre à tous ces problèmes. Cependant, bien qu'elle soit encore en cours de développement pour mieux intégrer les transferts de chaleur et autres spécificités de la physique du bâtiment et des environnements urbains, l'approche présentée vise à participer au développement de simulations détaillées de physique urbaine et du bâtiment grâce à sa pertinence physique (mise en évidence par les différentes études de validation) et son efficacité de calcul (atteinte par l'utilisation du LBM et le traitement des conditions aux limites). Les résultats déjà obtenus sont très prometteurs et ouvrent également de nouvelles perspectives, notamment en ce qui concerne une meilleure quantification de l'incertitude des résultats de simulation énergétique des bâtiments grâce à une meilleure connaissance de la variabilité des sollicitations.

Néanmoins, en se concentrant sur la CFD, et malgré la supériorité théorique de l'approche présentée par rapport au RANS, il convient de mentionner que son utilisation et l'analyse des résultats nécessitent une expertise spécifique, qui diffère également de l'expertise énergétique du bâtiment. De plus, malgré son efficacité, les coûts de calcul impliqués peuvent encore empêcher son développement pour les études opérationnelles d'énergétique des bâtiments. Par conséquent, le développement de modèles adaptés, dérivés de l'approche détaillée ou basés sur les nouvelles connaissances apportées par celle-ci, constituent également un défi majeur pour l'avenir.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient plusieurs institutions françaises pour le support. Les différents projets ont notamment été financés par le projet CLIMB (Projet No. P3543-24000, BPI France), dans le cadre du programme "Investissement d'Avenir : Calcul Intensif et Simulation Numérique". Les simulations ont été réalisées grâce aux ressources du GENCI-TGCC/CINES (Grant 2019-A0052A07679).

RÉFÉRENCES

- Chang, J. C. & Hanna, S. R. (2004). Air quality model performance evaluation. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 87(1-3).
- CS (2018). ProLB.
- Feng, Y., Boivin, P., Jacob, J., & Sagaut, P. (2019). Hybrid recursive regularized lattice Boltzmann simulation of humid air with application to meteorological flows. *Physical Review E*, 100(2), 023304.
- FFI (2016). MODITIC project.
- Guo, Z., Zheng, C., & Shi, B. (2002). Discrete lattice effects on the forcing term in the lattice Boltzmann method. *Physical Review E*, 65(4).
- Hanna, S. & Chang, J. (2012). Acceptance criteria for urban dispersion model evaluation. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 116(3-4), 133–146.
- Jacob, J., Malaspinas, O., & Sagaut, P. (2018). A new hybrid recursive regularised Bhatnagar–Gross–Krook collision model for Lattice Boltzmann method-based large eddy simulation. *Journal of Turbulence*, (pp. 1 – 26).
- Jacob, J. & Sagaut, P. (2018). Wind comfort assessment by means of large eddy simulation with lattice Boltzmann method in full scale city area. *Building and Environment*, 139, 110 – 124.
- KIT (2017). CODASC : COncentration DATA of Street Canyons - Karlsruhe Institute of Technology, Laboratory of Building & Environmental Aerodynamics.
- Krüger, T., Kusumaatmaja, H., Kuzmin, A., Shardt, O., Silva, G., & Viggén, E. (2017). *The Lattice Boltzmann Method. Principles and Practice*. Springer.
- Malys, L., Musy, M., & Inard, C. (2015). Microclimate and building energy consumption : study of different coupling methods. *Advances in Building Energy Research*, 9(2), 151–174.
- Merlier, L., Frayssinet, L., Johannes, K., & Kuznik, F. (2019a). On the impact of local microclimate on building performance simulation. Part I : Prediction of building external conditions [in press]. *Building Simulation*.
- Merlier, L., Frayssinet, L., Johannes, K., & Kuznik, F. (2019b). On the impact of local microclimate on building performance simulation. Part II : Effect of external conditions on the dynamic thermal behavior of buildings [n press]. *Building Simulation*.
- Merlier, L., Jacob, J., & Sagaut, P. (2018). Lattice-Boltzmann Large-Eddy Simulation of pollutant dispersion in street canyons including tree planting effects. *Atmospheric Environment*, 195, 89–103.
- Merlier, L., Jacob, J., & Sagaut, P. (2019c). Lattice-Boltzmann large-eddy simulation of pollutant dispersion in complex urban environment with dense gas effect : Model evaluation and flow analysis. *Building and Environment*, 148, 634–652.
- Robins, A., Hayden, P., & Wingstedt, E. M. M. (2016). *MODITIC wind tunnel experiments*. Technical Report FFI-RAPPORT 16/01483, Norwegian Defence Research Establishment.
- Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., & Shirasawa, T. (2008). AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(10), 1749 – 1761. 4th International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2006).