

Etude numérique de la stratification thermique pour l'évaluation du confort thermique d'un bâtiment commercial de faible hauteur

Remon LAPISA¹, Marc O.ABADIE*¹, Emmanuel BOZONNET¹ et Patrick SALAGNAC¹

¹ LaSIE, Université de La Rochelle
Av. Michel Crépeau, 17042 La Rochelle, France
*mabadie@univ-lr.fr

RESUME. Afin d'assurer le confort thermique estival, les techniques passives de rafraîchissement sont rarement considérées pour les bâtiments commerciaux de faible hauteur. L'objectif de cette étude est d'évaluer la température intérieure en utilisant différentes approches pour prendre en compte la stratification thermique et d'analyser le potentiel de la ventilation naturelle pour assurer le confort thermique dans la zone d'occupation. Deux modèles thermo-aérauliques ont été définis afin d'évaluer l'évolution de la température intérieure : un modèle monozone et un modèle de stratification verticale. Les résultats montrent que le modèle monozone n'est pas suffisamment précis pour prédire le confort thermique car il tend à surestimer la température en partie inférieure du bâtiment. La seconde approche permet quant à elle de différencier les performances de la ventilation par mélange et par déplacement et de mieux apprécier l'impact de la ventilation naturelle sur l'évolution des températures dans la zone d'occupation.

MOTS-CLÉS : Bâtiment commercial de faible hauteur, Stratification thermique, Ventilation.

ABSTRACT. Passive cooling solutions are rarely considered on low-rise building commercial to ensure thermal comfort during summer. The present study aims at evaluating the indoor temperature by using different approaches to account for thermal stratification and analyzing the potential of natural ventilation to ensure thermal comfort in the occupied zone. Two building thermal configurations have been defined to model the indoor temperature profile: a single zone model and a vertical stratification one with different hypotheses regarding the airflow pattern. The results show that the single zone model is not accurate enough to predict thermal comfort in the occupied zone as it tends to overestimate the temperature in the lower part of the building. Besides, mixing/displacement mechanical and natural ventilation models modify the temperature profile. The proposed modelling methodology improves the thermal comfort evaluation and shows the significant impact of natural ventilation on occupied areas.

KEYWORDS: Low-rise commercial building, Thermal stratification, Ventilation.

1. INTRODUCTION

Pour simplifier la modélisation thermique du bâtiment et permettre des temps de calcul raisonnables, l'approche monozone est utilisée dans la plupart des outils de simulation thermique dynamique (TRNSYS, CONTAM, EnergyPlus...). Cependant, cette méthode n'est pas suffisamment précise pour évaluer la stratification thermique à l'intérieur d'une zone d'un bâtiment puisqu'elle ne considère qu'un seul nœud de température (hypothèse du mélange parfait de la température de l'air). Or le gradient vertical de la température de l'air est un facteur important pour l'évaluation du confort thermique (ISO 7730 2006), notamment pour les bâtiments de grand volume. Une des particularités des bâtiments commerciaux de faible hauteur est qu'ils présentent un ratio élevé entre la surface du

plancher/toiture et le volume total. Par conséquent, la conception de ces deux éléments est un facteur prépondérant sur le transfert thermique à travers l'enveloppe. La stratification verticale de la température de l'air intérieur est quant à elle influencée par les gains et les pertes à travers l'enveloppe, la distribution asymétrique des gains internes et le débit de renouvellement d'air. Les études expérimentales et numériques sur la stratification thermique d'un bâtiment ont montré que la température varie verticalement de 4°C à 11°C en fonction de la géométrie du bâtiment, de l'enveloppe, des gains internes, du climat et taux renouvellement d'air (Dean, Gupta, et Van Becelaere 1976; Saïd, MacDonald, et Durrant 1996). Il a été également constaté dans ces études que la stratification est plus forte en été. En ce qui concerne la consommation d'énergie, les pertes thermiques à travers la toiture et par le renouvellement d'air sont prédominants et représentent respectivement 42.1% et 33.7% de la déperdition totale (Huang et al. 2007).

La présente étude vise à évaluer la stratification thermique d'un bâtiment commercial de faible hauteur en considérant différentes approches quant à la modélisation des transferts thermiques au sein de son volume d'air intérieur. Dans une première partie, les caractéristiques du bâtiment étudié pour cette étude et les différents principes de modélisation sont décrits. Une attention particulière a été apportée pour décrire l'écoulement d'air à l'intérieur du bâtiment. Après une étude préliminaire de l'impact de la discrétisation verticale sur la stratification thermique, le confort thermique est évalué en considérant deux modes de diffusion de l'air : la ventilation par mélange et par déplacement. La dernière section est dédiée à l'analyse du potentiel de rafraîchissement passif par ventilation naturelle.

2. METHODOLOGIE

2.1. DESCRIPTION DE BATIMENT ETUDIE

Le bâtiment étudié est constitué d'une structure en acier d'une surface au sol de 1296 m² (Figure 1). La hauteur du bâtiment est de 6 m. Ce bâtiment est situé dans une zone suburbaine soumis à un climat tempéré (Marseille, France). Les parois verticales possèdent une épaisseur totale de 30,5 cm (1,3 cm de plâtre, 14 cm de laine de verre, 15 cm de laine de roche et un bardage en acier de 2 mm). Une surface vitrée de 30 m² est localisée sur les façades est, ouest et sud. La toiture terrasse d'une épaisseur de 24,4 cm (24 cm de laine de roche, 2 mm de bardage en acier) présente 31,36 m² de lanterneaux (soit 2,42 % de la surface totale de la toiture). Le plancher est composé de 16 cm de la dalle en béton sans isolation thermique. Le bâtiment est équipé d'un système de chauffage ; aucun système de climatisation n'est prévu. Un débit de ventilation mécanique de 30 kg/h.personne est assuré pendant la période d'occupation (chaque jour de 07h00 à 22h00 sauf le dimanche). Le taux d'occupation est considéré égal à 11,6 m²/personne (Deru et al. 2011). Le gain thermique des occupants est défini par la norme (ISO 7730 2006). La hauteur de la zone d'occupation est de 1,8 m. Le niveau de perméabilité à l'air de ce bâtiment en acier est estimé équivalent à une ouverture de 2 cm²/m² (Persily 1998). Le gain thermique de l'éclairage est de 8 W/m² avec 40% de part convective (Rea 1993).

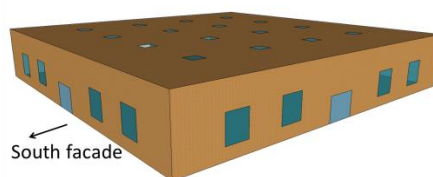


Figure 1. Vue 3D du bâtiment étudié.

2.2. MODELE THERMIQUE DE BATIMENT

Les simulations thermiques du bâtiment ont été effectuées en utilisant le couplage entre les types 56 (modèle de thermique du bâtiment) et 97 (modèle aéraulique) de TRNSYS. Comme présentés schématiquement par la Figure 2, le type 56 calcule la température de l'air intérieure à partir de la connaissance des caractéristiques thermiques du bâtiment, des charges et des débits de ventilation et d'infiltration et le type 97 évalue les débits d'air entre zones intérieures et l'extérieur à partir des sollicitations extérieures et de la connaissance des températures intérieures. Les débits d'infiltration et de la ventilation naturelle sont induits par l'effet du vent et du tirage thermique. Le coefficient de pression du vent sur l'enveloppe est déterminé pour chaque paroi en fonction de l'angle d'incidence du vent sur celle-ci selon le modèle proposé par (Swami et Chandra 1988). On notera que le transfert thermique par le sol est modélisé selon une approche unidimensionnelle décrite dans la norme NF EN ISO 13370 ; approche qui a montré des résultats cohérents par rapport à ceux obtenus à partir de calculs tridimensionnels du problème couplé bâtiment/sol dans un précédent article (Lapisa et al. 2013). Un temps d'initialisation d'une année a été effectué afin d'éviter l'influence des conditions initiales.

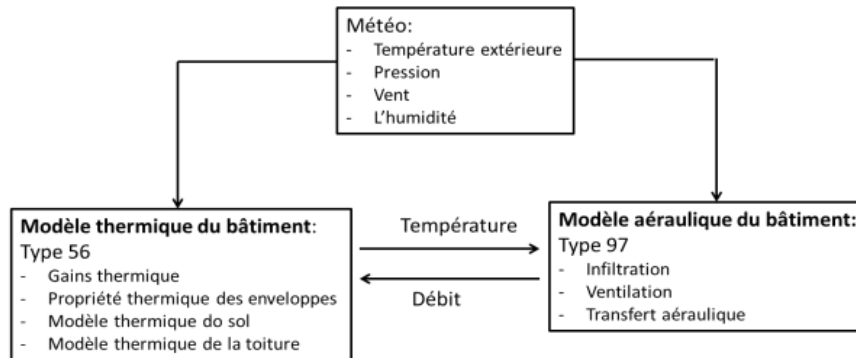


Figure 2. Schéma du couplage entre les types 56 et 97.

2.3. MODELE DE DIFFUSION DE L'AIR A L'INTERIEUR DU BATIMENT

Dans un premier temps, un modèle monozone a été considérée. Dans ce cas, les propriétés thermiques de l'air intérieur sont homogènes dans l'ensemble du volume du bâtiment. Pour les autres modèles, le bâtiment est divisé verticalement en 12, 7 ou 3 cellules (Figure 3) avec des propriétés thermiques homogènes de l'air dans chaque cellule. Un maillage plus fin (0,5 m de hauteur) est fixé à proximité de la toiture et du plancher, lieux où les plus forts gradients thermiques peuvent apparaitre. On notera que la variation horizontale de la température est ici négligée. Les gains internes (occupants et éclairage) sont répartis en fonction de leurs positions dans chaque cellule.

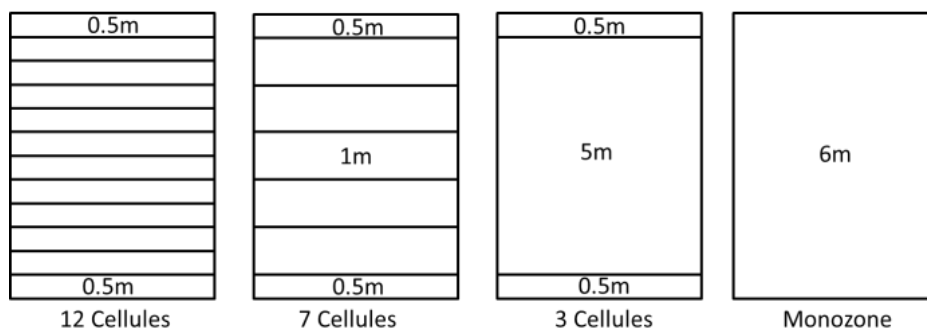


Figure 3. Discrétisations du volume d'air intérieur du bâtiment.

Pour le cas de la ventilation mécanique par mélange, le débit d'air neuf, qui est supposé introduit par des diffuseurs de 20 cm de diamètre situés au plafond du bâtiment, induit un écoulement d'air descendant sur toute la hauteur du bâtiment. Cet air se mélange partiellement à l'air des différentes zones par entraînement avant d'arriver dans la zone d'occupation. Un écoulement ascendant est quant à lui créé par des extracteurs placés également au niveau de la toiture du bâtiment.

Les débits d'airs descendants pour chaque interface sont calculés par l'équation de jet axisymétrique isotherme (Musy et al. 2001; Abadie et al. 2012). Le débit total d'air (initial + entraînement) qui traverse une interface à la distance X_n (m) du diffuseur peut être alors exprimé par l'équation suivante :

$$Q_{j,n} = Q_{j,o} \left(1 + \frac{4 \times C_u^2 \times K_v}{d_o \times \ln(2)} \times X_n \right) \quad (1)$$

Où $Q_{j,n}$ est le débit du jet (kg/s) à la distance X_n (m) du diffuseur, $Q_{j,o}$ est le débit initial (à la bouche de soufflage) de la ventilation mécanique (kg/s), C_u et K_v sont des constantes qui dépend du type de jet et qui sont ici respectivement égales à 0,097 et 6,6, et d_o est le diamètre de bouche de soufflage (m).

La température de chaque interface est évaluée par le bilan énergétique dans les zones du jet. Celle-ci est exprimée par l'expression suivante :

$$T_{j,n} = \frac{T_{j,n-1} + K_e \Delta X_n ((n-1)T_{j,n-1} + T_n)}{1 + K_e X_n} \quad (2)$$

Où $T_{j,n}$ est la température d'air de la zone en aval (K), $T_{j,n-1}$ est la température de la zone en amont (K), T_n est la température de la zone courante (K), K_e est coefficient d'entraînement d'air (= 1,71), ΔX_n est la hauteur de la zone courante (m) et n est le numéro de la zone courante (compté de manière descendante, 1 étant la zone en contact avec la toiture).

La Figure 4 illustre le bilan thermique et massique de l'air intérieur du bâtiment. L'écoulement vertical du jet induit un débit d'entraînement $Q_{e,n}$ pour chaque zone. L'infiltration est représentée par le débit Q_{inf} calculé par le modèle d'écoulement d'air à travers les fissures de l'enveloppe (type 97). Le couplage entre les zones adjacentes est effectué par les débits $Q_{ac,n}$ et $Q_{ac,n+1}$ qui sont évalués selon l'approche d'écoulement d'air à travers les grandes ouvertures horizontales du type 97.

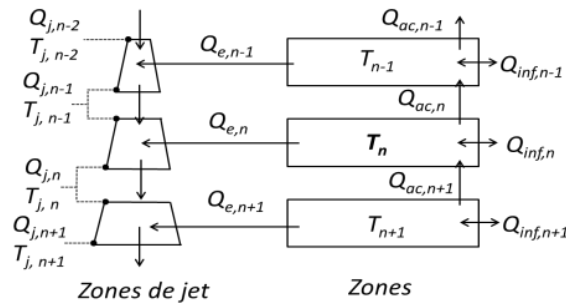


Figure 4. Schéma de principe du bilan thermique et massique.

Pour le cas de la ventilation par déplacement, l'air neuf est complètement mélangé dans la zone inférieure (en contact avec le plancher) et extrait via un extracteur placé au niveau de la toiture de manière similaire à la ventilation par mélange. Les débits de ventilation naturelle induits par

l'ouverture des lanterneaux et d'ouvertures situées en partie basse du bâtiment sont évalués par un modèle de grandes ouvertures verticales du type 97.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. EFFET DE LA DISCRETISATION VERTICALE SUR LA STRATIFICATION THERMIQUE

Une étude comparative a été effectuée pour évaluer l'effet de la discrétisation verticale du volume du bâtiment sur gradient vertical de la température. Cette étude préliminaire a été effectuée pour le cas de la ventilation mécanique par mélange. La Figure 5 montre le profil vertical de la température maximale du modèle monozone et du modèle avec 3, 7 et 12 zones horizontales. Cette température est la moyenne de la température maximale journalière au cours de la période estivale. Premièrement, les trois modèles de stratification montrent des résultats cohérents et proches les uns des autres montrant que la discrétisation n'influence pas les résultats. Les températures obtenues par ces modèles sont supérieures que le modèle monozone en particulier au niveau de la toiture avec une différence de température importante d'environ 7,1 °C (pour la température maximale) en raison de l'apport solaire absorbé par la toiture, gain thermique d'éclairage et l'effet de tirage thermique.

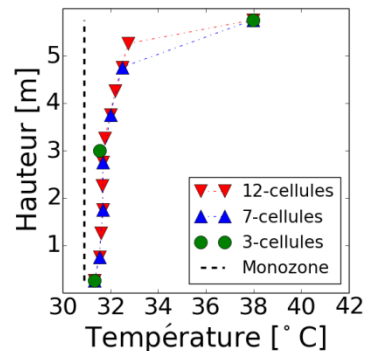


Figure 5. Profils de température maximale – cas de ventilation par mélange.

La Figure 6 montre l'évolution du profil vertical de la température de l'air intérieur en fonction du temps (du 2 au 7 Juillet) pour les quatre cas. Premièrement, comme observé précédemment avec les valeurs maximales, la température plus chaude pendant la journée est constaté près de la toiture pour les modèles de stratification avec un gradient de température d'environ 6,7 °C entre le plancher et la toiture. Pourtant, pendant la nuit, la température de l'air près du sol est la plus élevée avec une différence d'environ 4,3 °C par rapport la partie supérieure. Cela est dû à la restitution de chaleur accumulée par le sol lorsque la température intérieure du bâtiment diminue. D'autre part, une réduction importante de la température est constatée pendant la nuit. Cette tendance est plus facile à observer en fin de semaine (Dimanche, dernier jour sur la carte) lorsque le bâtiment est inoccupé et la ventilation mécanique est désactivée, comme la nuit. Le refroidissement de cette période est dû au transfert thermique par conduction à travers l'enveloppe et par l'infiltration d'air. Le débit d'infiltration est estimé à 0,009 volume/h avec le modèle à zones superposées, soit environ 15% inférieure à celui obtenu avec le modèle monozone (0,065 volume/h).

Le modèle de stratification à 12 zones a été choisi pour la suite de l'étude car il permet d'avoir une meilleure représentation de la stratification en termes de nombre de points de température avec un temps de calcul certes plus élevé par rapport aux autres modèles mais raisonnable dans le cadre de la présente étude.

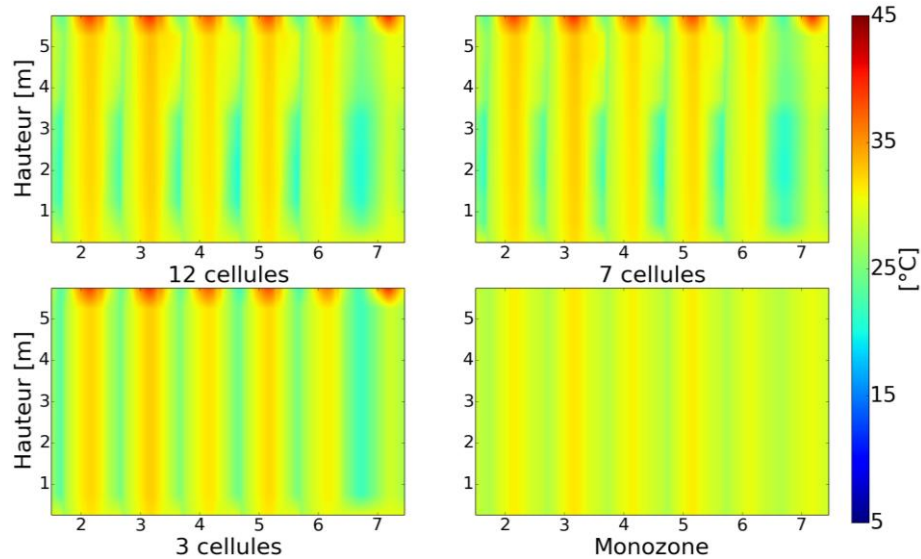


Figure 6. Profils verticaux de température de l'air intérieur pour les différents maillages.

3.2. EFFET DU MODE DE DIFFUSION DE L'AIR

Deux modes de diffusion de l'air ont été définis: la ventilation par mélange (insufflation de l'air neuf au niveau de la toiture avec formation d'un jet descendant) et la ventilation par déplacement (mélange parfait de l'air neuf dans la zone en contact avec le plancher). On notera que l'air neuf est de l'air extérieur non traité et qu'un même taux de renouvellement d'air pour les deux modes de diffusion a été considéré ici. Pour ces deux cas, l'air est extrait vers l'extérieur via un extracteur placé au niveau de la toiture. La Figure 7 présente le profil vertical de la température maximale pour le bâtiment inoccupé (a) et occupé (b) pour les deux modes de diffusion de l'air. On constate tout d'abord que le modèle monozone donne les mêmes résultats pour les deux types de la ventilation puisqu'un même taux de renouvellement d'air est fixé. Pour le cas du modèle à 12 zones, une variation de la température en fonction de la hauteur du bâtiment est observée. La ventilation par déplacement réduit la température de la partie inférieure et augmente celle de la partie supérieure. Par conséquent, ce mode de diffusion permet une plus grande réduction de la température dans la zone d'occupation par rapport au cas de la ventilation par mélange. Cependant, ce mode provoque également un gradient de la température entre le pied et la tête des occupants avec une différence d'environ $4,8^{\circ}\text{C}$ (Figure 7.b) et donc l'une des exigences du confort n'est pas satisfaite.

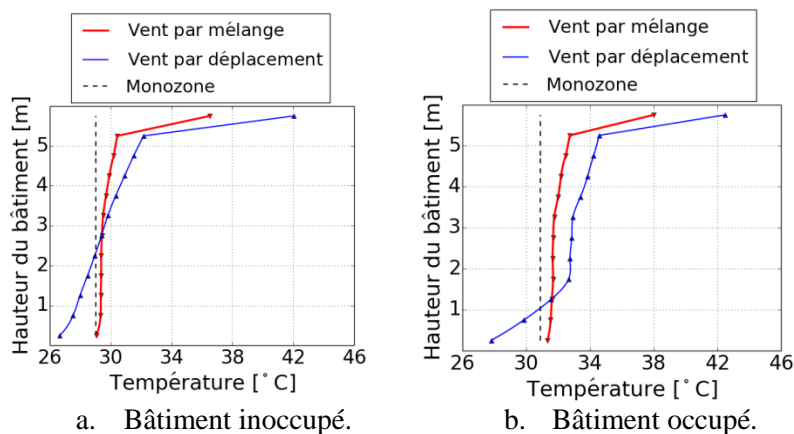


Figure 7. Valeur moyenne de la température maximale des zones.

3.3. IMPACT DE LA VENTILATION NATURELLE

La ventilation naturelle (VN) pendant la nuit vise à atténuer l'inconfort thermique d'été en évacuant la chaleur vers l'extérieur à travers les lanterneaux. La Figure 8 montre la diminution de la température d'air obtenue grâce au recours à la ventilation naturelle nocturne. Pour le modèle à zones superposées, on observe que la ventilation naturelle réduit la température intérieure du bâtiment. L'évacuation de chaleur pendant la nuit réduit considérablement la température moyenne du jour suivant. Les résultats montrent de plus que la ventilation naturelle diminue la valeur moyenne de la température opérative dans la zone d'occupation d'environ 6,2°C, 5,9°C et 5,3°C respectivement pour le modèle monozone, le modèle à zones superposées avec ventilation par mélange et celui avec ventilation par déplacement.

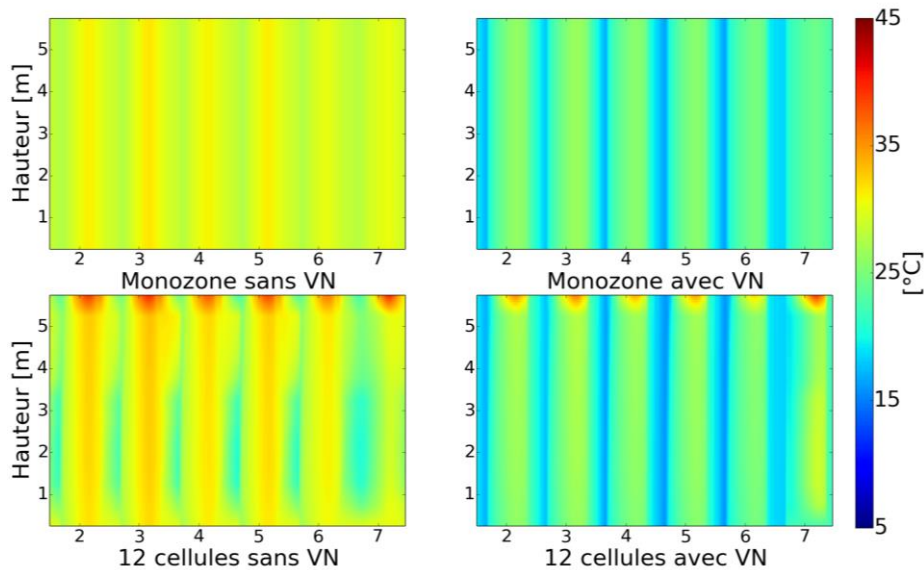


Figure 8. Effet de la ventilation naturelle sur le profil de température – cas de la ventilation mécanique par mélange.

Les performances énergétiques du bâtiment et l'évaluation du confort pendant l'été peuvent être respectivement évaluées par les degrés heures ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$) et le taux d'inconfort (%) c'est-à-dire la durée pendant laquelle la température opérative est supérieure à la température du confort adaptatif définie selon la norme EN-ISO 15251, durée rapportée à la période d'occupation. Les degrés heures de température d'inconfort calculés par le modèle monozone est la plus faible et vaut $7232^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ alors que les résultats obtenus pour la ventilation par mélange et par déplacement montrent respectivement des valeurs de $9905^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ et $9143^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$. La ventilation naturelle nocturne permet de réduire les degrés heures d'inconfort pendant l'été de 88,3%, 74,4% et 61,2% pour le modèle monozone, modèle de stratification avec la ventilation mécanique par mélange et la ventilation par déplacement. De même, elle réduit le taux d'inconfort de 95,4% à 31,3%, de 94,9% à 44% et de 90,2% à 48,6% pour les modèles cités précédemment.

4. CONCLUSION

La présente étude numérique montre que le modèle monozone n'est pas suffisamment précise pour la prédiction du confort thermique d'un bâtiment commercial de faible hauteur. En outre, cette approche

tend à diminuer l'amplitude de la variation journalière de la température intérieure et à surestimer l'effet de ventilation naturelle nocturne. Le modèle à zones superposées montre la limite du modèle monozone concernant la prédiction du profil vertical de la température et donne des informations plus précises pour l'évaluation du confort thermique qui permettent la comparaison des différents modes de diffusion de l'air ainsi que des bénéfices apportée par la ventilation naturelle nocturne.

5. REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le gouvernement Indonésien pour son soutien financier.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Abadie, M.O., M.M. de Camargo, K.C. Mendonça, et P. Blondeau. 2012. « Improving the prediction of zonal modeling for forced convection airflows in rooms ». *Building and Environment* 48: 173-182. doi:10.1016/j.buildenv.2011.09.006.
- Dean, R. H., A. K. Gupta, et R. M. Van Becelaere. 1976. « Effect of thermal stratification on factory air-conditioning load ». *ASHRAE Trans.:(United States)* 82.
- Deru, Michael, Kristin Filed, Daniel Studer, Benne Kyle, Brent Griffith, et Paul Torcellini. 2011. *U.S. Department of Energy Commercial Reference Building Models of the National Building Stock*. Vol. NREL/TP-5500-46861. Colorado,US: National Renewable Energy Laboratory.
- Huang, Chen, Zhijun Zou, Meiling Li, Xin Wang, Wei Li, Wugang Huang, Jiangang Yang, et Xueqin Xiao. 2007. « Measurements of indoor thermal environment and energy analysis in a large space building in typical seasons ». *Building and Environment* 42 (5): 1869-1877. doi:10.1016/j.buildenv.2006.02.016.
- ISO 7730. 2006. « Ergonomics of thermal environment-Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria ».
- Lapisa, Remon, Emmanuel Bozonnet, Marc Olivier Abadie, et Patrick Salagnac. 2013. « Cool roof and ventilation efficiency as passive cooling strategies for commercial low-rise buildings – ground thermal inertia impact ». *Advances in Building Energy Research* 7 (2): 192-208. doi:10.1080/17512549.2013.865559.
- Musy, Marjorie, Etienne Wurtz, Frederick Winkelmann, et Francis Allard. 2001. « Generation of a zonal model to simulate natural convection in a room with a radiative/convective heater ». *Building and Environment* 36 (5): 589-596. doi:10.1016/S0360-1323(00)00043-3.
- Persily, Andrew K. 1998. *Airtightness of commercial and institutional buildings: blowing holes in the myth of tight buildings*. Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology.
- Rea, Mark Stanley. 1993. « Lighting handbook: reference & application ». *Illuminating Engineering Society of North America, New York* 8th Edition: 355.
- Saïd, M.N.A. 1997. « Measurements of air change rates and air flow patterns in large single-cell buildings ». *Energy and Buildings* 26 (2): 175-182. doi:10.1016/S0378-7788(96)01032-8.
- Saïd, M.N.A., R.A. MacDonald, et G.C. Durrant. 1996. « Measurement of thermal stratification in large single-cell buildings ». *Energy and Buildings* 24 (2): 105-115. doi:10.1016/0378-7788(95)00966-3.
- Swami, M. V., et S. Chandra. 1988. « Correlations for pressure distribution on buildings and calculation of natural-ventilation airflow ». *ASHRAE transactions* 94 (3112): 243-66.