



HAL
open science

Étude du potentiel de rafraîchissement d'un quartier méditerranéen par ventilation naturelle avec un modèle couplé de microclimat et de bâtiment multizone

Alexandre Bryk, Emmanuel Bozonnet, Georgios Kyriakodis, Peter Riederer

► To cite this version:

Alexandre Bryk, Emmanuel Bozonnet, Georgios Kyriakodis, Peter Riederer. Étude du potentiel de rafraîchissement d'un quartier méditerranéen par ventilation naturelle avec un modèle couplé de microclimat et de bâtiment multizone. Conférence IBPSA France-La Rochelle Oléron-2024, May 2024, La Rochelle - Ile d'Oléron, France. hal-04593287

HAL Id: hal-04593287

<https://hal.science/hal-04593287v1>

Submitted on 19 Jun 2024

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.

Étude du potentiel de rafraîchissement d'un quartier méditerranéen par ventilation naturelle avec un modèle couplé de microclimat et de bâtiment multizone

Alexandre Bryk*^{1,2}, Emmanuel Bozonnet², Georgios Kyriakodis¹, Peter Riederer¹

¹ Centre Scientifique et Technique du Bâtiment Sophia CSTB
290 Rte des Lucioles, 06904 Sophia Antipolis,

²Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement LaSIE
Avenue Michel Crépeau, 17042 La Rochelle

*alexandre.bryk@cstb.fr

RESUME. On étudie l'efficacité de la ventilation naturelle des bâtiments dans un contexte urbain sur le confort thermique intérieure. On couple un modèle de ventilation de bâtiment avec des modèles de microclimat urbain et de thermique de bâtiment. Les pressions sur les façades dues au vent ainsi que l'effet de tirage thermique sont pris en compte pour le calcul de ventilation. Le cas d'étude consiste en une configuration d'îlot de bâtiments représentatif déterminé à partir d'un quartier réel de la ville de Nice. Une analyse du confort étage par étage, par orientation des façades et par scénario de ventilation met en évidence les logements les plus favorables à l'utilisation de la ventilation naturelle dans un contexte urbain.

MOTS-CLÉS : Rafraîchissement passif, Microclimat urbain, Ventilation des bâtiments.

ABSTRACT. We study the potential of the natural ventilation of buildings in an urban context on the indoor thermal comfort. We couple a building ventilation model with an urban microclimate and building thermal models. The ventilation model takes into account facade pressures and buoyancy. The case study consists of representative building blocks based on a real neighborhood located in the city of Nice. A floor-by-floor comfort analysis, by facade orientation and ventilation scenario, highlights the most favorable dwellings for the use of natural ventilation in an urban context.

KEYWORDS: Passive cooling, Urban Microclimate, Building Ventilation.

1. INTRODUCTION

Les centres villes sont soumis à des conditions thermiques difficiles dû à la présence de l'îlot de chaleur urbain. Spécifiquement les villes méditerranéennes où la température et l'humidité peuvent rester élevées même de nuit. Une solution de rafraîchissement passif des bâtiments en période estivale est la ventilation naturelle. Elle présente l'avantage de ne pas consommer d'énergie et d'être accessible au plus grand nombre. En milieu urbain le potentiel de rafraîchissement des bâtiments est réduit par rapport au milieu rural environnant dû à une rugosité du terrain plus importante (Oke et al. 2017). L'interaction avec le microclimat est rarement prise en compte lors de l'évaluation du rafraîchissement des bâtiments et cette dernière permettrait de déterminer les logements favorables pour la ventilation naturelle. Une étude par Salvati et Kolokotroni 2023 propose un chaînage d'outils pour tenir compte des conditions locales en température et pression autour des bâtiments en comparant les renouvellements d'air et les températures opératives avec et sans obstacles. Les résultats de simulation obtenues à partir

du modèle de microclimat EnviMet sont utilisés comme conditions limites du modèle de ventilation naturelle nodal d'EnergyPlus. La réduction de la température opérative atteint au maximum 2.8°C dans un des logements étudiés. Leur modélisation ne tient pas compte de la rétroaction du bâtiment sur le microclimat. Une étude par Yuan et al. 2022 propose un couplage aéraulique complet entre l'intérieur et l'extérieur afin d'évaluer l'effet provoqué par le rejet de la chaleur de la climatisation à l'extérieur d'un immeuble sur la température d'air intérieur de certains logements ventilés naturellement. Les températures d'air des logements augmentent en moyenne de 0.2°C à 1.1°C . Leur approche numériquement coûteuse permet d'étudier cet effet que pour des conditions climatiques limitées où seul le transfert thermique par convection entre l'intérieur et l'extérieur est modélisé.

La modélisation proposée dans cet article propose un couplage unidirectionnel entre un modèle de microclimat et un modèle aéraulique de bâtiments nodal et un couplage bidirectionnel entre ce dernier et un modèle thermique de bâtiment nodal. Il permet de tenir compte de l'effet du microclimat sur les conditions limites du modèle aéraulique de bâtiment et de la ventilation du logement pour une simulation mensuelle à pas de temps horaire. L'efficacité de la ventilation naturelle sur le confort intérieur est évaluée sur un îlot de bâtiment représentatif d'un quartier de la ville de Nice déterminé à partir de bases de données spatiales.

2. METHODOLOGIE

Dans un premier temps, on expose la construction du cas d'étude de quartier représentatif à Nice. Ensuite on rappelle le modèle couplé microclimat/bâtiments utilisé avec l'ajout d'éléments de ventilation des bâtiments et les couplages réalisés, avec les des données d'entrées nécessaires pour le modèle. Enfin on donne les configurations de ventilation des logements avec la loi d'ouverture des fenêtres choisie.

2.1. CAS D'ETUDE D'UN ILOT URBAIN TYPIQUE DE LA VILLE DE NICE

Le quartier étudié se situe à Nice (voir Figure 1 à gauche) et couvre une surface de $1,89 \text{ km}^2$. Déterminer un quartier représentatif permet de ne pas à avoir à simuler toute la surface et d'obtenir des conclusions sur tout le périmètre d'étude. De plus, la classification des zones climatiques locales (Stewart et Oke 2012) ne donne pas une géométrie précise nécessaire pour une simulation microclimatique détaillée. Pour cela, nous proposons une méthodologie pour déterminer une configuration d'îlot de bâtiments représentatif d'un quartier réel.

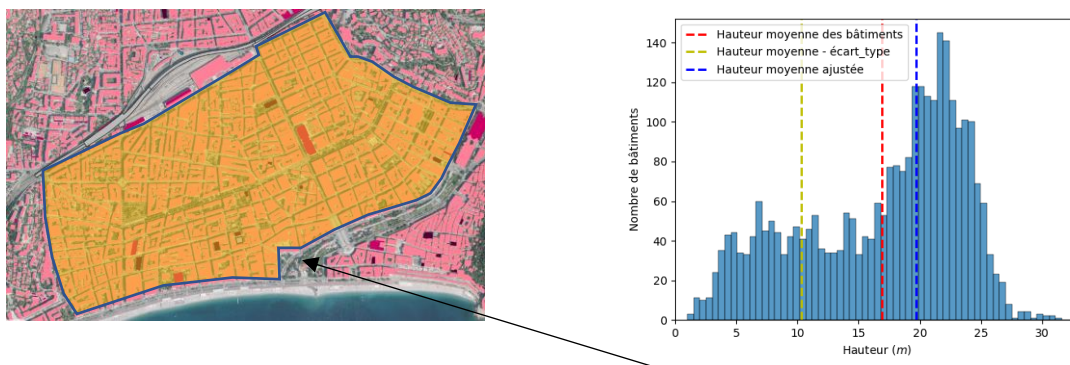


Figure 1 - Vue satellitaire du quartier de Nice étudié en jaune (à gauche) et distribution de la hauteur des bâtiments (à droite)

2.1.1. Détermination de la géométrie d'une maquette représentative d'un quartier réel

La configuration des îlots de bâtiments identifié est de type cour intérieure. Le quartier simplifié envisagé est de type 3x3 îlots identiques afin d'avoir des conditions limites réalistes pour l'îlot central. La géométrie d'un îlot représentatif est déterminée à partir de la géométrie des bâtiments réels du quartier donné Figure 1. Les propriétés utilisées sont la hauteur des bâtiments H et La surface des îlots $S_{îlots}$ issues de la BD TOPO.

Sur la Figure 1 on trace la fréquence de la hauteur de bâtiments du quartier (barre rouge). On remarque une tendance de fréquence de bâtiment inférieur/supérieur à 17m. Les îlots réels ont une cour intérieure souvent occupé par des bâtiments de taille inférieure aux bâtiments adjacents à la rue. Pour le modèle, on ne tient pas compte des bâtiments à l'intérieur des cours en supprimant les bâtiments de moins de 10m (barre jaune Figure 1) pour déterminer la hauteur et la surface moyenne de la cour intérieure du modèle. On obtient une hauteur moyenne pour le modèle de 19,7 m (barre bleue Figure 1) arrondie à 7 niveaux de 3m chacun.

On note $L_{bat-bat}$ la distance séparant deux bâtiments du modèle. Elle est déterminée à partir des propriétés du quartier réel (surface totale du quartier S_{total} (surface jaune Figure 1 à gauche), surface de l'ensemble des îlots $S_{îlots}$ et la longueur totale des rues L_{rues} égale à la somme des longueurs de toutes les rues).

En supposant une géométrie de type canyon, la distance inter bâtiments est donnée par :

$$L_{bat-bat} = \frac{S_{rues}}{L_{rues}} = \frac{S_{total} - S_{îlots}}{L_{rues}} \quad (1)$$

Le quartier déterminé est donné Figure 2 en représentant les maillages surfacique et zonal.

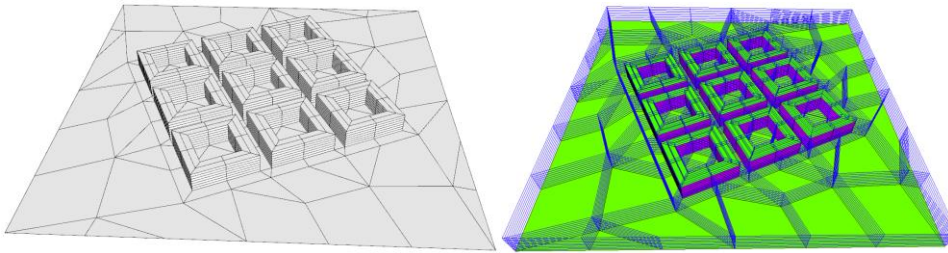


Figure 2 - Maillages surfacique (à gauche) et zonale (à droite) du quartier simplifié

La scène urbaine est constituée 2313 faces, 1008 logements au total (112 par îlot) et 1665 mailles extérieures. Cette configuration permet d'avoir des champs réalistes en vitesse de vent, les masques solaires et les échange grande longueur d'onde pour l'îlot central. Les îlots environnants ont des masques solaires adjacents identiques non représentés ici.

2.1.2. Détermination des propriétés thermiques et optiques

Les propriétés thermiques sont déterminées à partir de la base de données nationale des bâtiments (BDNB). Les propriétés thermiques des bâtiments du quartier réel Figure 1 sont utilisées pour déterminer des propriétés du modèle Figure 2. En fonction de la propriété, on pondère les valeurs pour chaque bâtiment par l'empreinte au sol ou par la surface des façades du bâtiment. Les paramètres d'entrées de la simulation sont donnés dans le *Tableau 1*. Le coefficient convectif extérieur est calculé à partir de la formule $h_{c,ext} = 5,7 + 3,8U$ (Palyvos 2008) où U est la vitesse moyenne du vent météorologique de référence sur la période simulée.

Taux de vitrage	U_{vitrage} (W/m ² /K)	Epaisseur murs	Isolation	Réflectivité				Coefficient de convection (W/m ² /K)	
				ρ_{toits}	ρ_{rue}	$\rho_{\text{façades}}$	ρ_{vitres}	$h_{c,\text{ext}}$	$h_{c,\text{int}}$
28%	3,0	40 cm	Non isolé	0,18	0,15	0,5	0,15	12,8	3,3

Tableau 1 - Propriétés géométriques, thermiques et optiques de l'enveloppe des bâtiments

2.1.3. Climat de la ville de Nice sur la période étudiée

Les principales variables météorologiques de ville de Nice durant la période de juillet 2022 sont données Figure 3. La température d'air de nuit supérieure à 23°C tout le mois dépasse régulièrement le seuil caniculaire nocturne de 24°C (Laaidi et al. 2012), en dépassant trois fois le seuil caniculaire diurne de 31°C. De plus, l'humidité relative se situe régulièrement à 60-70% de jour et de nuit. Le vent provient principalement du Nord-Ouest de nuit et des autres directions la journée et correspond à l'orientation des rues de la maquette (voir Figure 2).

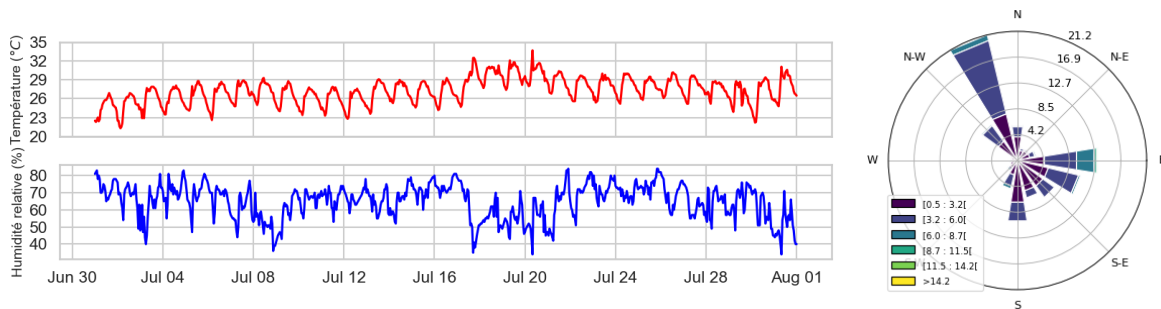


Figure 3 - Température d'air, humidité relative et rose des vents à la station météorologique de l'aéroport Nice-Côte d'Azur du mois de juillet 2022 (Données Météo France)

2.2. MODELE COUPLE DE MICROCLIMAT, DE VENTILATION NATURELLE ET CONDITIONS LIMITES AERAULIQUES

L'étude est réalisée à partir d'un modèle de microclimat urbain couplé entre le modèle de microclimat EnviBatE (Gros 2013) et le modèle d'énergétique à l'échelle urbaine Dimosim (Garreau et al. 2021). Le couplage est donné dans (Kyriakodis 2020). Le modèle calcule les températures d'air T_{air} et de surfaces T_s intérieures et extérieures et le besoin des bâtiments en énergie en tenant compte :

- Des rayonnements solaires direct, diffus et réfléchis entre les parois
- Des échanges par grande longueur d'onde entre les parois et vers le ciel
- De la conduction dans les parois avec leur inertie
- De la convection des surfaces intérieures et extérieures
- Du flux thermique des systèmes vers l'environnement extérieur

2.2.1. Modèle de ventilation et données d'entrées du modèle

Face à la limitation du modèle de ventilation dans Dimosim, on propose un couplage entre le modèle de microclimat et le modèle de ventilation MATHIS (François). Le modèle consiste en une approche nodale de l'équation de conservation de masse d'air du local i afin de déterminer la pression au sol de la zone P et les débits d'air $q_{m,j}$ à travers les ouvertures j :

$$V_i \frac{d\rho_i}{dt} = \sum_j q_{m,j} \quad (2)$$

Où $q_{m,j}$ s'écrit en fonction de la différence de pression de part et d'autre de l'ouverture j . Les conditions limites en pression sont obtenues à partir des coefficients de pression c_p définis par :

$$c_p = \frac{P_{façade} - P_{ref}}{\frac{\rho_{ref} U_{ref}^2}{2}} \quad (3)$$

Où $P_{façade}$ est la pression de l'air exercée sur la façade, P_{ref} est la pression de référence, U_{ref} la vitesse de référence en condition limite du domaine de calcul à 10m de haut.

2.2.2. Détermination des coefficients de pression et condition limite aérauliques

Le logiciel QUICURB (Singh et al. 2008) permet de calculer le champ de vitesse à l'extérieur des bâtiments. Pour cette étude les c_p sont obtenus à partir d'une simulation OpenFoam (Jasak, Jemcov, et Tukovi' 2007) puisque QUICURB ne fournit pas de c_p . L'approche est de type RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) en régime stationnaire incompressible isotherme, avec un modèle de turbulence k- ϵ réalizable. Les directions de vent simulées sont 0°, 20°, 40°, 60°, 80°, les autres directions sont obtenues par symétrie de la maquette. Les coefficients de pression obtenus sont moyennés selon le maillage surfacique de la Figure 2.

Le profil de vent utilisé pour le calcul OpenFoam utilisé est basé sur les profils de vent (AFNOR 2008). Le profil de vent utilisé dans QUIC est $V_{QU}(z) = U_{ref} \times \ln((z + z_{0,QU}) / z_{0,QU}) / \ln((z_{ref} + z_{0,QU}) / z_{0,QU})$, avec $U_{ref} = k_r \times \ln(z/z_0) \times V_{météo}$, $V_{météo}$ la vitesse mesurée à la station météorologique à 10m de hauteur et $z_{0,QU} = 1,7m$ est la rugosité déterminée à partir du profil Eurocode, z est l'altitude, z_0 est la longueur de rugosité du site ici égale à 1 correspondant à des zones urbaines, $V_{b,0}$ est la vitesse de vent à la station météorologique et $k_r = 0,19 (z_0/z_0, II)^{0,07}$ avec $z_{0,II} = 0,05m$ la rugosité de la station météorologique. La comparaison entre les deux profils de vitesse est donnée Figure 4.

Enfin, la convection naturelle (buoyancy) extérieure n'est pas prise en compte dans le modèle aéraulique extérieur. La vitesse météorologique extérieure est minorée à 1m/s afin d'éviter une vitesse de vent trop faible provoquant une surchauffe extérieure élevée.

2.2.3. Couplage des modèles de thermique et aéraulique du logement avec le modèle de microclimat

Le couplage des modèles de zone thermique de Dimosim et aéraulique de Mathis est basé sur l'échange de la température d'air T_i vers Mathis et du débit d'air q_m vers Dimosim. Le critère de convergence du couplage est la variation absolue des températures de la zone thermique, fixée à 0,01°C entre deux itérations successives. Un facteur de relaxation permet d'éviter des oscillations sur la température d'air des locaux (Weber et al. 2003) provoqués par des débits entre locaux variables à chaque itération.

Dans le modèle de microclimat, la température d'air est calculée dans chaque zone extérieure (voir Figure 2 à droite). Le couplage entre EnviBatE et Mathis consiste à imposer la température d'air extérieur T_{ext} dans l'ouverture correspondante dans Mathis. Le couplage vers EnviBatE reste inchangé : le débit d'air sortant du logement n'est pas pris en compte dans cette étude.

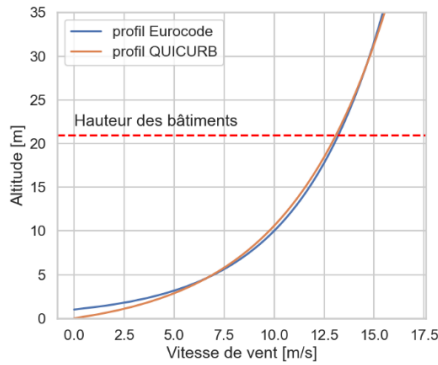


Figure 4 - Comparaison des profils Eurocode et QUIC pour une vitesse de référence de 10m/s à 10m d'altitude

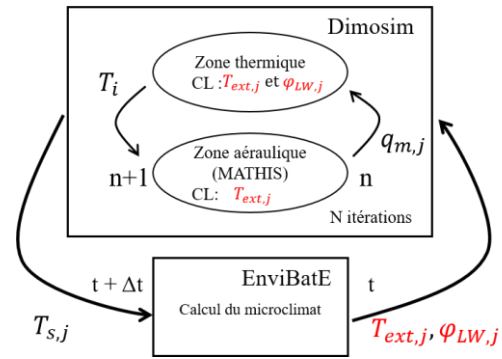


Figure 5 - Couplages entre le modèle de microclimat EnviBatE, le modèle de bâtiment de Dimosim et le modèle aéralique de MATHIS

2.3. CONFIGURATIONS DE VENTILATION DES LOGEMENTS ET OUVERTURE DES FENETRES

Le découpage des bâtiments en zone thermo-aéraliques permet de considérer de considérer deux configurations de ventilation par orientation: traversant et mono-exposé, dont la configuration pour l'îlot central est donnée Figure 6. L'ouverture des fenêtres donnée Figure 7 est déterminée en fonction des températures d'air intérieure/extérieure adjacentes avec une température d'ouverture intérieure fixée à 28°C.

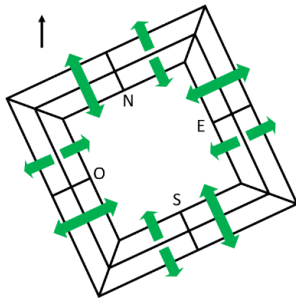


Figure 6 - Configuration des logements traversant - non traversant et orientation des bâtiments

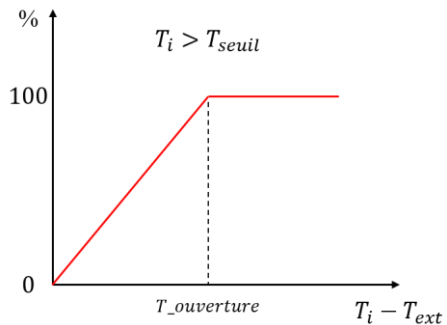


Figure 7 - Loi d'ouverture des fenêtres en fonction des conditions intérieures/extérieures

3. RESULTATS

On expose les résultats sur potentiel de ventilation et le confort dans les bâtiments selon le niveau et l'orientation du bâtiment. Les niveaux 0, 3 et 6 sont représentatifs pour percevoir les tendances en fonction de l'altitude.

3.1. POTENTIEL DE VENTILATION

On s'intéresse dans un premier au potentiel de ventilation en fonction de la configuration. On fait l'hypothèse de fenêtres ouverte à tout instant. Le renouvellement d'air des logements par direction et par niveau est donné Figure 8. En configuration traversant, le renouvellement d'air représenté est dû aux différences de pression sur les façades et en mono-exposé il est dû à la différence de température d'air intérieur-extérieur.

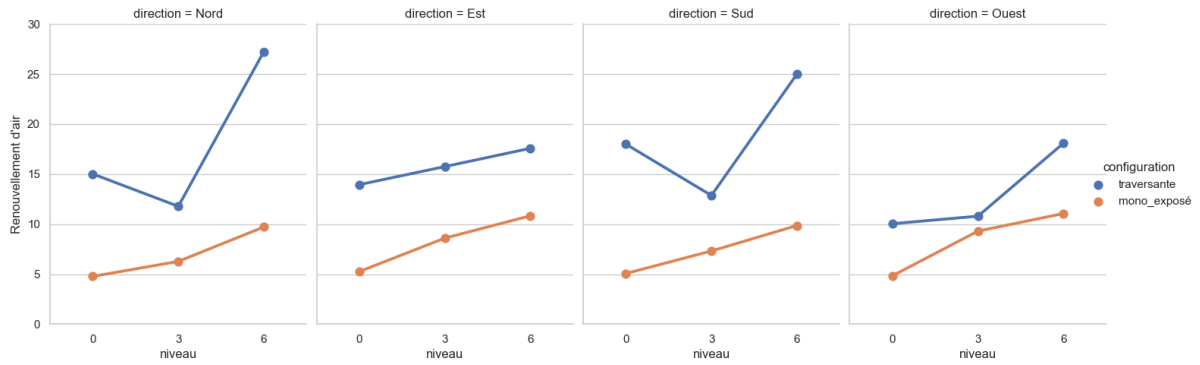


Figure 8 - Renouvellements d'air moyens des logements par orientation (Nord, Est, Sud, Ouest) du bâtiment et par niveau (0, 3, 6) en vol/h

Les observations principales sont:

- Le renouvellement d'air est compris entre 5 et 12 vol/h en moyenne dans les logements mono-exposés, et entre 10 et 25 vol/h en configuration traversant, valeurs comparables à celles obtenues dans l'étude par Geros et al. 2005.
- Les logements les plus favorables sont ceux situés au dernier étage
- En mono-exposé le renouvellement d'air est peu sensible à l'orientation
- En orientation traversant et pour les orientations Nord et Sud, le niveau 3 est défavorable, alors que pour les orientations Est et Ouest il est intermédiaire par rapport aux niveaux 0 et 6

3.2. CONFORT DANS LES LOGEMENTS

Le confort thermique des logements est évalué en calculant la température opérative. On compare l'efficacité de la ventilation sur le confort intérieur en considérant la loi d'ouverture des fenêtres présentée au paragraphe 2.3. La distribution de la température opérative de chaque logement sur la période étudiée de juillet 2022 en fonction de l'orientation (colonne), de la configuration (ligne), du niveau dans le bâtiment (sous-colonne) sans et avec ventilation (bleu/orange) est donnée Figure 9.

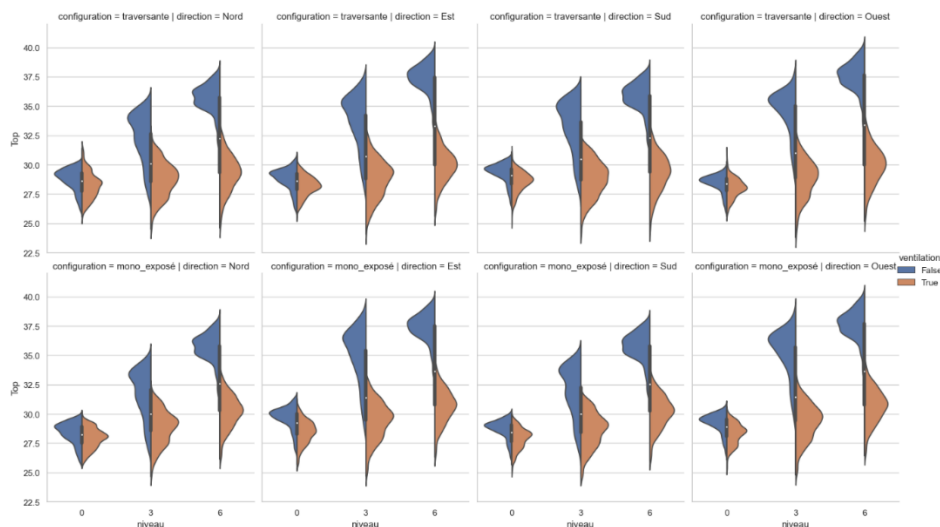


Figure 9 - Comparaison de la température opérative de plusieurs niveaux pour les quatre directions avec et sans ventilation

Les points à retenir sont :

- La température opérative diminue pour toutes les configurations, l'effet de l'orientation est plus difficile à percevoir
- L'abaissement de la température opérative est d'autant plus efficace que le logement est situé haut

L'amélioration du confort au niveau 0 n'est pas en contradiction par rapport au potentiel de ventilation puisque les fenêtres ne sont pas nécessairement ouvertes à ce niveau.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'effet de la ventilation naturelle avec prise en compte du microclimat sur le confort intérieur a été étudié sur une maquette d'îlot de bâtiments avec cour intérieure construit à partir d'un quartier réel. Les couplages réalisés permettent d'obtenir des conditions limites plus réalistes pour la ventilation des bâtiments. Tous les logements présentent une amélioration du confort et les logements du dernier étage présentent le potentiel de ventilation et d'amélioration du confort les plus élevés.

Une analyse de la distribution de vent dans le canyon permettrait d'expliquer les résultats de potentiel renouvellement d'air diminué au milieu du bâtiment. Des travaux de modélisation pour estimer l'effet du débit d'air depuis l'intérieur vers l'extérieur des bâtiments sur la température d'air extérieur sont en cours.

REMERCIEMENTS

Ce travail est financé par le programme doctoral du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. Les auteurs remercient Sylvain Aguinaga pour avoir proposé et réalisé la simulation OpenFoam et fournit les fichiers des coefficients de pression. Les auteurs remercient également François Demouge pour l'aide apporté sur la prise en main du modèle Mathis et du package python pymathis.

BIBLIOGRAPHIE

- AFNOR. 2008. « Eurocode 1: Actions sur les structures - Partie 1-4 : Actions générales - Actions du vent : NF EN 1991-1-4 et NF EN 1991-1-4/AN ».
- BD TOPO. <https://geoservices.ign.fr/bdtopo>.
- BDNB. <https://bdnb.io/>.
- Données Météo France. <https://meteo.data.gouv.fr/>.
- François, Demouge. s. d. « Mathis: Technical guide. Open-Source heat and mass transfer software, CSTB - Centre scientifique et technique du bâtiment ». <https://gitlab.com/CSTB/mathis/-/tree/master/>.
- Garreau, Enora, Yassine Abdelouadoud, Eunice Herrera, Werner Keilholz, G. -E. Kyriakodis, Vincent Partenay, et Peter Riederer. 2021. « District MOdeller and SIMulator (DIMOSIM) – A Dynamic Simulation Platform Based on a Bottom-up Approach for District and Territory Energetic Assessment ». *Energy and Buildings* 251 (novembre): 111354. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111354>.
- Geros, V., M. Santamouris, S. Karatasou, A. Tsangrassoulis, et N. Papanikolaou. 2005. « On the cooling potential of night ventilation techniques in the urban environment ». *Energy and Buildings* 37 (3): 243-57. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.06.024>.

- Gros, Adrien. 2013. « Modélisation de la demande énergétique des bâtiments à l'échelle d'un quartier ». Thèse de Doctorat, Université de La Rochelle. <http://www.univ-larochelle.fr/Soutenance-de-these-d-Adrien-GROS>.
- Jasak, Hrvoje, Aleksandar Jemcov, et Zeljko Tukovič. 2007. « OpenFOAM: A C++ Library for Complex Physics Simulations ». In . Dubrovnik, Croatia. <https://csabai.web.elte.hu/http/simulationLab/jasakEtAlOpenFoam.pdf>.
- Kyriakodis, Georgios-Evrystheas. 2020. « Development of a coupled simulation tool for urban building energy demand, district energy systems and microclimate modeling. » Theses, Université de La Rochelle. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-03203724>.
- Laaidi, Karine, Aymeric Ung, Véréne Wagner, Pascal Beaudeau, et Mathilde Pascal. 2012. « Système d'alerte canicule et santé: principes, fondements et évaluation ». Saint Maurice: Institut de Veille Sanitaire.
- Oke, TR, G Mills, A Christen, et JA Voogt. 2017. *Urban Climates*. Cambridge University Press.
- Salvati, Agnese, et Maria Kolokotroni. 2023. « Urban microclimate and climate change impact on the thermal performance and ventilation of multi-family residential buildings ». *Energy and Buildings* 294 (septembre): 113224. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113224>.
- Singh, Balwinder, Bradley S. Hansen, Michael J. Brown, et Eric R. Pardyjak. 2008. « Evaluation of the QUIC-URB Fast Response Urban Wind Model for a Cubical Building Array and Wide Building Street Canyon ». *Environmental Fluid Mechanics* 8 (4): 281-312. <https://doi.org/10.1007/s10652-008-9084-5>.
- Stewart, I. D., et T. R. Oke. 2012. « Local Climate Zones for Urban Temperature Studies ». *Bulletin of the American Meteorological Society* 93 (12): 1879-1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>.
- Weber, Andreas, Markus Koschenz, Viktor Dorer, Marion Hiller, et Stefan Holst. 2003. « TRNFLOW, A NEW TOOL FOR THE MODELLING OF HEAT, AIR AND POLLUTANT TRANSPORT IN BUILDINGS WITHIN TRNSYS ». In , 1363-68. Eindhoven, Netherlands. https://publications.ibpsa.org/proceedings/bs/2003/papers/bs2003_1363_1368.pdf.
- Yuan, Chao, Ruixuan Zhu, Shanshan Tong, Shuojun Mei, et Wei Zhu. 2022. « Impact of anthropogenic heat from air-conditioning on air temperature of naturally ventilated apartments at high-density tropical cities ». *Energy and Buildings* 268 (août): 112171. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112171>.