Retours sur l'évaluation de la précision d'une chaine d'outil dédiée à la simulation du confort thermique dans les bâtiments urbains

Damien David*[1], Adrien Toesca[1], Kevyn Johannes[1], Michel Lussault[2]

[1] Université de Lyon, Université Lyon 1, CETHIL, UMR5008, 69621 Villeurbanne, France
[1] Université de Lyon, EVS, UMR5600, Lyon, France
***damien.david@insa-lyon.fr**

RESUME. Cet article constitue un retour d'expérience sur l'évaluation de la précision d'un modèle de simulation de bâtiment basé sur des mesures in-situ. Après une brève description du modèle, de la campagne de mesure, et de la comparaison entre les mesures et les simulation, l'article développe trois points de discussion. Le premier point porte sur la mesure des actions des occupants sur les ouvrants. Les capteurs à contact complétés d'interviews ne sont pas suffisants, il faut développer des capteurs progressifs d'ouverture de fenêtres, portes et volets adaptés aux mesures in-situ. Le second point porte sur l'évaluation de la hauteur de couche limite urbaine. Ce paramètre d'entrée du modèle a une grande influence sur les résultats, mais il n'existe pas de méthode rationnelle permettant de l'évaluer. Le troisième point porte sur le choix des cas d'étude, qui s'est avéré insuffisamment contraignant pour permettre de mettre en avant l'utilité d'outils avancé pour la prédiction des coefficients de pression.

MOTS-CLÉS : Mesures in-situ, Evaluation de modèle, Bâtiment urbain.

ABSTRACT. This article is a feedback on the evaluation of the accuracy of a building simulation model based on in-situ measurements. After a brief description of the model, the measurement campaign, and the comparison between measurements and simulations, the article develops three points of discussion. The first point is about the measurement of the actions of the occupants on the openings. Contact sensors supplemented with interviews are not sufficient, it is necessary to develop progressive sensors for the opening of windows, doors and shutters adapted to in-situ measurements. The second point relates to the evaluation of the height of the urban boundary layer. This input parameter of the model has a great influence on the results, but there is no rational method for its evaluation. The third point relates to the choice of the case studies, which turned out to be insufficiently restrictive to highlight the usefulness of advanced tools for the prediction of pressure coefficients.

KEYWORDS : In-Situ measurements, Model evaluation, Urban buildings.

1. INTRODUCTION

Cet article concerne une chaine d'outils thermiques urbaine (UTTC pour « Urban Thermal Tool Chain »). Cette UTTC a été développée pour simuler les conditions de confort, en conditions estivales, dans les bâtiments urbains passifs, dans le sens où ils ne sont pas équipés de système de climatisation.

L'UTTC est décrite en détail par (Toesca et al., 2021) et (Toesca et al., 2022). Ces articles décrivent aussi le processus adopté pour évaluer la précision de l'UTTC. Une campagne de mesure a été réalisée. Des simulations visant à reproduire les conditions de mesures ont été réalisées. Les écarts entre les données de mesures et les résultats de simulation ont été analysés et quantifiés, pour conclure sur le niveau de précision de l'UTTC.

Le présent article apporte trois points de discussion concernant l'outil de simulation et la démarche adoptée pour évaluer sa précision. Les trois points de discussion sont hétérogènes dans leur nature et leur conclusion. Le premier point de discussion porte sur les moyens de mesure disponibles. Le second point porte sur le paramétrage de l'outil de simulation. Le troisième point porte sur le choix des cas d'étude. La première section du présent article décrit brièvement l'UTTC et la démarche d'évaluation adoptée. La seconde partie développe les trois points de discussion.

2. DESCRIPTION ET EVALUATION DE L'UTTC

2.1. DESCRIPTION DE L'UTTC

L'outil de simulation développé est un chainage de trois outils de simulations (Figure 1). Le programme Urban Weather Generator (UWG) (Bueno et al., 2013) simule les effets de l'îlot de chaleur urbain (ICU), à partir d'une description paramétrique du quartier dans lequel se trouve le bâtiment d'intérêt, et d'un fichier de données météorologiques en site rural. Il consigne les résultats de simulation dans un fichier de données météorologiques en site urbain. Le programme UrbaWind est un outil de simulation de mécanique des fluides qui estime des valeurs des coefficients de pression sur le bâtiment d'intérêt à partir d'une représentation géométrique en 3 dimensions de son environnement proche. Le programme EnergyPlus réalise la simulation thermique du bâtiment d'intérêt, en incluant les effets des masques solaires environnant, et en simulant les débits de ventilation naturelle et leurs effets thermiques à l'aide d'un modèle de type AirFlow Network intégré.

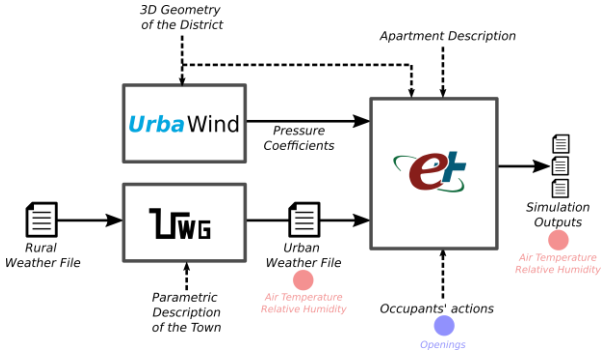

Figure 1 : Schéma décrivant le fonctionnement de l'UTTC. Les points colorés représentent les grandeurs mesurées durant la campagne de mesure.

La facilité d'usage a été prise en compte dans la conception de l'UTTC. Le chainage des outils peut se faire de manière manuelle ou automatisée. Les programmes UrbaWind et EnergyPlus proposent des interfaces graphiques conviviales et une documentation abondante. L'outil UWG peut être utilisé dans son implémentation sous la forme d'une librairie Python.

2.2. CAMPAGNE DE MESURES

La campagne de mesure s'est déroulée dans quatre appartements habités de la ville de Lyon (France), entre Juin et Septembre 2020. Durant cette période, la ville de Lyon a subi deux épisodes caniculaires selon les critères de (Pascal et al., 2006). Les plans des appartements et leur emplacement dans le tissu urbain sont affichés dans la figure 2.

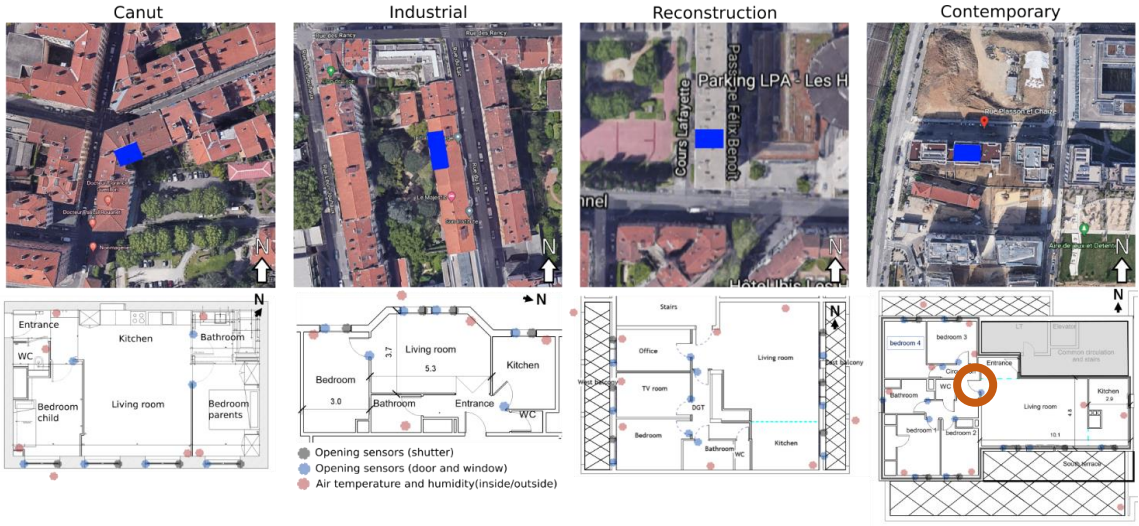

Figure 2: Plan des quatre appartements dans lesquels les mesures ont été effectuées, emplacement des appartements dans le tissus urbain (carrés bleus sur les images en haut), et instrumentation déployée dans les appartements (symboles colorés dans les plans).

Des capteurs ont été déployés dans les appartements pour mesurer la température et l'humidité de l'air dans chacune des pièces, ainsi que dans l'environnement extérieur proche. Ces grandeurs sont des grandeurs intermédiaires (température d'air extérieur) et de sortie de l'UTTC.

Les grandeurs d'entrée de l'UTTC ont été collectées pour permettre de reproduire les conditions de mesure avec l'outil de simulation. La géométrie et la composition des parois des appartements ont fait l'objet d'un relevé sur site et sur plan. Les données météorologiques rurales, mesurées sur la station météorologique de Lyon Bron, ont été fournies par l'organisme Météo-France. La géométrie de l'environnement urbain proche des appartements a été estimée à l'aide de métrés réalisées sur le site Google Maps. Les paramètres de description statistique des quartiers nécessaires au paramétrage d'UWG ont été obtenus à partir de métrés réalisés sur le site Google Maps, et de données collectées sur la plateforme de mise en ligne de données cartographiées de la métropole du Grand Lyon. Les ouvertures des portes, des fenêtres et des volets des appartements ont été mesurées avec des capteurs à contact. Ces mesures d'ouverture en continue ont été complétées par une interview des occupants, réalisée à la fin de la période de mesure, et portant sur leur usage des ouvrants.

Les mesures ayant été réalisées en conditions in-situ, des capteurs sans fils ont été sélectionnés pour minimiser la gêne pour les occupants. Les modèles de capteurs sélectionnés sont décrits dans le tableau 1. Ces capteurs communiquent leurs données à une passerelle commune avec le protocole de communication En-Ocean. Cette passerelle envoie les données sur un serveur à l'aide d'une clé 4G. Les capteurs d'ouverture de volets ayant tous été défaillants, les plannings d'ouverture des volets ont été entièrement élaborés à partir des résultats des interviews.

Grandeur mesurée	Modèle / Marque du capteur	Précision
Température / Humidité air intérieur	-/Nodon	±0.16 °C ±2%
Température air extérieur	FAFT60/Eltako electronics	±0.3 °C ±5%
Ouvertures portes et fenêtres	-/Nodon	-
Ouvertures volets	TRIO2SYS/O2LINE	-

Tableau 1: Spécifications des capteurs utilisés.

2.3. CONFRONTATION SIMULATIONS / MESURES

La figure 3 fournit un aperçu des évolutions de température d'air simulées et mesurées, dans le séjour pour les quatre appartements testés, durant la période du 9 au 19 septembre 2020. L'évolution de la température d'air extérieur prédite par UWG pour ces quatre appartements est rappelée afin d'apprécier l'ampleur du filtre opéré par l'enveloppe du bâtiment entre le milieu extérieur et le milieu intérieur.

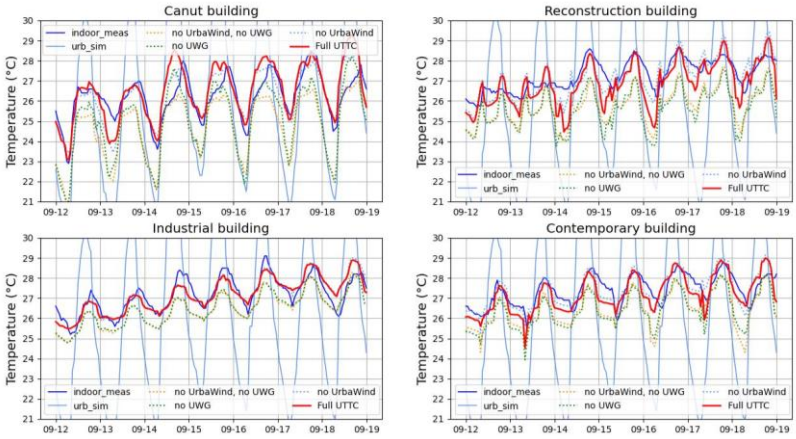

Figure 3: Température de l'air dans le séjour des 4 appartements. Données mesurées (bleu), simulées (rouges), et simulées avec une utilisation partielle de l'UTTC (pointillées). Estimations de de la température d'air extérieur par UWG (trait fin en bleu clair)

L'écart entre les données de mesure et de simulation a été quantifié et analysé au travers de profils de distribution de l'erreur instantanée $\varepsilon_i^T = T_{i,sim} - T_{i,mes}$. La figure 4 montre les distributions des erreurs obtenues pour la température d'air dans le séjour des 4 appartements. Les distributions peuvent être assimilées à des distributions gaussiennes, dont la valeur moyenne est située entre -0.2°C et 0.05°C, et dont l'écart type varie entre 1.7°C et 2°C. Ces valeurs semblent satisfaisantes au regard de l'ampleur des transformations opérées sur les variables d'ambiance entre la station météorologique rurale et l'appartement urbain. Par exemple, l'amplitude moyenne des fluctuations de température journalières est passé de 12° en site rural, à 1.6°C à 2.5°C en moyenne dans les appartements.

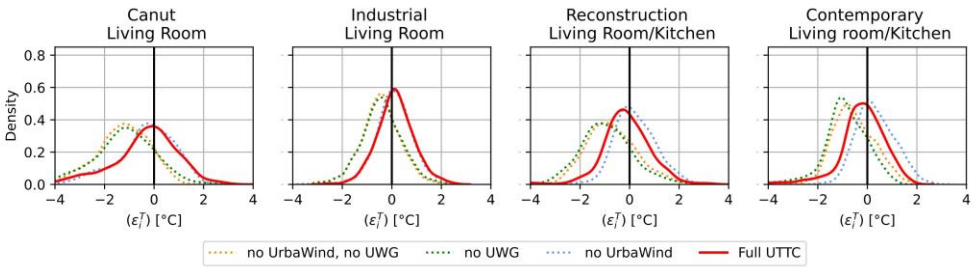

Figure 4: Profils de distribution des erreurs instantanées de température d'air dans le séjour des quatre appartements test.

3. DISCUSSION

3.1. UNE DEMARCHE D'EVALUATION DE L'OUTIL RIGOUREUSE

Pour évaluer strictement l'outil de simulation, il faut que les paramètres d'entrée du modèle, dans les conditions des mesures, soient parfaitement connus. Si ce n'est pas le cas, ce n'est plus seulement la précision de l'outil de simulation qui est évaluée, mais aussi la faisabilité de l'obtention des grandeurs

d'entrée de l'outil de simulation. Aussi, pour que les conclusions de la démarche concernant la précision de l'outil soient généralisables, il faut que les cas d'étude aient été choisis pour être représentatifs de la population de bâtiments qui pourraient être simulés par l'outil de simulation.

Les trois points de discussions qui sont abordés dans les sections suivantes révèlent des décalages entre une application rigoureuse de la démarche d'évaluation de modèle, et son application réelle dans le cadre de cette étude. Les deux premiers points portent sur des incertitudes sur les données d'entrée du modèle. Le dernier point porte sur la représentativité des cas d'étude sélectionnés.

3.2. DONNEES D'OUVERTURES DES FENETRES, PORTES ET VOLETS

Dans la stratégie de mesure prévue initialement, les états d'ouverture des fenêtres, portes et volets devaient être collectés par les capteurs à contact binaires. Ces informations devaient être complétées par les résultats des interviews réalisées auprès des occupants à la fin de la campagne de mesure pour estimer le degré d'ouvertures des ouvrants.

Selon (Ghishi et al., 2021, chap.2), la surveillance continue des états d'ouverture des ouvrants par des capteurs est le moyen le plus fiable pour obtenir des plannings d'ouverture réalistes. Il est aussi possible de reconstituer ces plannings lors d'interviews avec les occupants, mais, selon (Offermann, 2009) et (Gaultier et Shipworth, 2015), le risque que les informations fournies par les occupants soient incorrectes est élevé.

Ainsi, la stratégie de mesure prévue pour cette étude visait à limiter les incertitudes au degré d'ouverture des ouvrants, en sachant précisément l'état (binaire) de ces ouvrants. Malgré ces précautions, nous avons constaté que le volume d'information demandé aux occupants était trop lourd pour qu'ils puissent fournir des réponses précises, notamment lorsque les degrés d'ouverture étaient aléatoires. C'est particulièrement le cas pour la porte qui sépare l'appartement « contemporain » en deux espaces distincts (espace de jour mono-orienté, espace de nuit traversant). Cette porte est entourée en orange dans la figure 2. Le niveau d'homogénéisation entre les deux ambiances s'est avéré être fortement dépendant du degré d'ouverture de la porte. Et comme son degré d'ouverture était aléatoire, il n'a pas été possible de reproduire de manière satisfaisante les interactions entre les deux espaces.

Ainsi, pour une évaluation rigoureuse des modèles de bâtiments, il est nécessaire de disposer de capteurs progressifs d'ouverture de fenêtres, de portes et de volets, qui soient compatibles avec les exigences des mesures in-situ. Cela veut dire que ces capteurs doivent avoir une autonomie de plusieurs mois, et doivent enregistrer leurs données de mesures sur une mémoire interne ou les transmettre via un protocole sans fil. La littérature scientifique fait état de l'usage de capteurs progressifs basé sur des accéléromètres (Andersen et al., 2013), et sur des potentiomètres (Schweiker et al. 2012). Ces capteurs ont une autonomie très limitée.

3.3. HAUTEUR DE COUCHE LIMITE URBAINE DANS UWG

Le fichier de paramétrage d'UWG demande de fournir une valeur à une grandeur nommée « h_ubl2 », et décrite comme suit : « ubl height night (m) ». Cette grandeur correspondrait alors à la hauteur de la couche limite urbain (UBL pour « Urban Boundary Layer ») durant la nuit.

Selon (Oke et al. 2017), l'UBL est la couche de l'atmosphère avec laquelle le milieu urbain échange de la chaleur sensible (figure 5, à gauche). La frontière supérieure de l'UBL correspond à la zone d'inversion du profil de température, qui empêche l'air chaud de monter plus haut. Dans UWG, l'UBL

est modélisée comme un volume à température homogène équivalente (figure 5 à droite). La température d'équilibre de ce volume résulte des échanges de chaleur sensible avec le tissu urbain, et du renouvellement d'air sur ses frontières latérales.

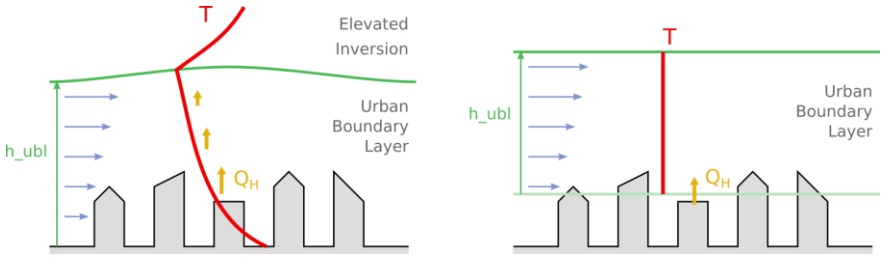

Figure 5 : l'UBL selon (Oke et al., 2017) (à gauche), et tel que modélisé dans UWG (à droite)

A moins de disposer d'un ceilomètre à proximité de l'appartement étudié, il est impossible de mesurer directement la hauteur de l'UBL. Il n'existe pas non plus, à la connaissance des auteurs de cet article, de méthode d'estimation rationnelle pour évaluer cette hauteur. Seuls (Lebras et Masson, 2015) proposent une équation empirique issue d'observations sur des résultats de simulation pour la ville de Paris. Ne disposant pas d'outils permettant d'évaluer rationnellement la hauteur de l'UBL nocturne, nous avons ajusté cette hauteur pour que les prédictions de température extérieure fournies par UWG se rapprochent des données mesurées. La valeur optimale obtenue vaut 30m. Or, selon (Oke et al. 2017), l'ordre de grandeur de cette hauteur devrait se situer autour de 150m. Cet écart significatif semblerait résulter d'un modèle très approximatif de l'UBL dans UWG.

Les distributions d'erreurs sur la température extérieur pour h_ubl2=150m et pour h_ubl2=30m sont affichées dans la figure 6. On observe bien un recentrage des valeurs d'erreur autour de 0 lorsqu'on passe de h_ubl2=150m à h_ubl2=30m.

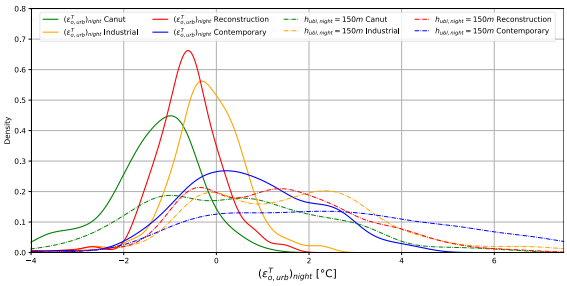

Figure 6 : Distributions d'erreurs sur la température extérieure en milieu urbain, avec h_ubl2=30m (courbes pleines) et h_ubl2=150m (courbes pointillées)

La nécessité d'étalonner le paramètre « h_ubl2 », pour qu'UWG fournisse des prédictions d'ICU satisfaisantes, a une incidence sur les conditions d'usage de l'outil. Si le paramètre « h_ubl2 » dépend de la nature de l'aménagement urbain, il n'est pas envisageable d'utiliser UWG pour évaluer les effets sur l'ICU de différentes stratégies d'aménagement dans un quartier donné. En effet, cette démarche nécessiterait de disposer de données de mesures pour ajuster la valeur « h_ubl2 » pour chaque stratégie d'aménagement évaluée. Par contre, si le paramètre « h_ubl2 » ne dépend pas des conditions météorologiques en site rural, il reste envisageable d'utiliser UWG pour produire des fichiers météorologiques urbain dans le quartier d'intérêt, avec différentes conditions météorologiques en site rural.

3.4. UTILITE D'URBAWIND – CHOIX DES CAS D'ETUDE

Des simulations ont été réalisées avec des versions partielles de l'UTTC (versions sans UWG et/ou sans UrbaWind). Pour les simulations sans UWG, les fichiers météorologiques ruraux ont été utilisées en entrée d'EnergyPlus. Pour les simulations sans UrbaWind, les coefficients de pression par défaut proposés par l'interface DesignBuilder pour une exposition de type « masquée » ont été utilisés. Les résultats de simulations obtenus avec des versions partielles de l'UTTC sont affichés sur les figures 3 et 4 en traits pointillés. L'utilisation d'UrbaWind n'améliore pas notablement la précision des résultats. Il serait alors tentant de conclure que l'utilisation d'UrbaWind n'est pas justifiée. Mais il se peut aussi que cette observation soit spécifique aux cas d'études utilisés pour évaluer la précision du modèle.

Les coefficients de pression entrent en jeu dans le calcul des débits de ventilation naturelle lorsque la configuration de l'appartement permet d'obtenir un différentiel de pression dû au vent entre ses ouvertures. Ce n'est pas le cas pour les appartements mono-orientés, il est donc logique que l'utilisation d'UrbaWind n'améliore pas les prédictions pour les appartements d'étude mono-orientés (« canut » et « industrial » sur la figure 2).

Les deux appartements traversants sont, eux, particulièrement exposés au vent. L'appartement « reconstruction » est localisé dans une barre d'immeuble qui est très éloignée des bâtiments voisins. L'appartement « contemporary » est situé au dernier étage d'un immeuble résidentiel collectif. Pour ces deux appartements, il est attendu que les débits de ventilation soient très élevés lorsque les fenêtres sont ouvertes. Dans ce type de bâtiments, les effets thermiques de la ventilation naturelle saturent.

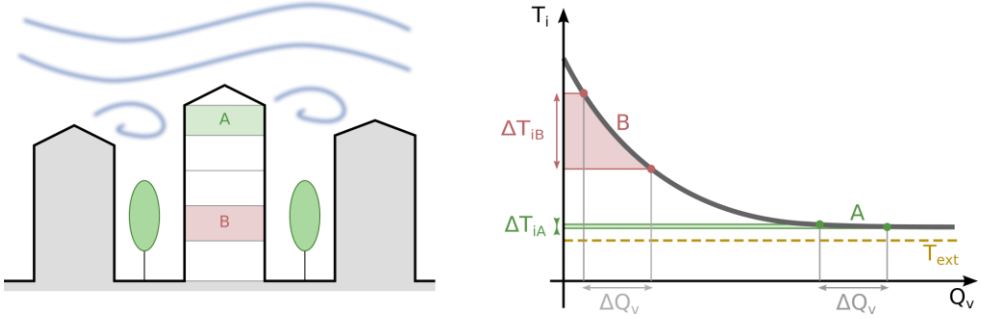

Figure 7 : effet de saturation dans un appartement très exposé au vent (appartement A)

Ce phénomène de saturation est illustré dans la figure 7. Soit un appartement A très exposé au vent, et un appartement B très protégé du vent. Lorsque les fenêtres sont ouvertes dans les deux appartements, le débit de ventilation Q_V est plus élevé dans l'appartement A que dans l'appartement B. Or, lorsque le débit de ventilation est élevé, la température de l'air à l'intérieur des locaux T_i tend asymptotiquement vers la température de l'air extérieur T_{ext} (courbe de droite). Si l'utilisation d'UrbaWind apporte une amélioration similaire ΔQ_V sur la prédiction du débit de ventilation dans les deux appartements, cette amélioration entraîne une variation conséquente de la prédiction de température interne dans l'appartement B (ΔT_{iB}). Elle n'a que peu d'effet sur la prédiction de la température interne dans l'appartement A (ΔT_{iA}) car les effets thermiques de la ventilation sont saturés.

Ainsi, avant de conclure sur la justification de l'utilisation de l'outil UrbaWind, il faudrait réaliser une étude similaire avec des appartements traversants et particulièrement protégés du vent, par la végétation et les bâtiments environnant. Ces cas d'étude seraient plus discriminants sur l'évaluation des effets thermiques des écoulements de ventilation naturelle.

4. CONCLUSION

Les trois points de discussions abordés dans cet article montrent la difficulté d'appliquer rigoureusement une démarche d'évaluation de modèle de thermique de bâtiment basée sur des mesures in-situ. Le premier point révèle la nécessité de disposer de capteurs in-situ pour mesurer le degré d'ouverture des fenêtres portes et volets. Des capteurs intrusifs existent pour mesurer cette grandeur. Il faut maintenant travailler à prolonger l'autonomie de ce type de capteurs. Le second point révèle une difficulté liée à la détermination d'un paramètre d'entrée d'UWG. Un travail théorique est à mettre en œuvre pour améliorer le modèle thermique d'UBL implémenté dans UWG, et lui adjoindre un outil d'évaluation rationnel de la hauteur d'UBL. Enfin, le troisième point révèle l'incidence que peut avoir le choix des cas d'étude sur la portée réelle des conclusions qui peuvent être tirée de l'évaluation d'un modèle.

5. BIBLIOGRAPHIE

Andersen, Rune, Valentina Fabi, Jorn Toftum, Stefano P. Corgnati, et Bjarne W. Olesen. 2013. « Window Opening Behaviour Modelled from Measurements in Danish Dwellings ». *Building and Environment* 69 (novembre): 101-13.

Bueno, Bruno, Leslie Norford, Julia Hidalgo, et Grégoire Pigeon. 2013. « The urban weather generator ». *Journal of Building Performance Simulation* 6 (4): 269-81.

Gauthier, Stephanie, et David Shipworth. 2015. « Behavioural responses to cold thermal discomfort ». *Building Research & Information* 43 (3): 355-70.

Ghisi, Enedir, Ricardo Forgiarini Rupp, et Pedro Fernandes Pereira, éd. 2021. *Occupant Behaviour in Buildings: Advances and Challenges*. Vol. 6. Frontiers in Civil Engineering. BENTHAM SCIENCE PUBLISHERS.

Le Bras, Julien, et Valéry Masson. 2015. « A Fast and Spatialized Urban Weather Generator for Long-Term Urban Studies at the City-Scale ». *Frontiers in Earth Science* 3 (juin).

Offermann, Francis. 2009. *Ventilation and Indoor Air Quality in New Homes*.

Oke, T. R., G. Mills, A. Christen, et J. A. Voogt. 2017. *Urban Climates*. Cambridge: Cambridge University Press.

Pascal, Mathilde, Karine Laaidi, Martine Ledrans, Elsa Baffert, Céline Caserio-Schönemann, Alain Le Tertre, Jacques Manach, Sylvia Medina, Jérémie Rudant, et Pascal Empereur-Bissonnet. 2006. « France's Heat Health Watch Warning System ». *International Journal of Biometeorology* 50 (3): 144-53.

Schweiker, Marcel, Frederic Haldi, Masanori Shukuya, et Darren Robinson. 2012. « Verification of stochastic models of window opening behaviour for residential buildings ». *Journal of Building Performance Simulation* 5 (1): 55-74.

Toesca, Adrien, Damien David, André Kuster, Michel Lussault, et Kevyn Johannes. 2021. « A New Building Thermal Model to a Better Evaluation of the Thermal Comfort during Heat Waves ». In *Building Simulation 2021*. Bruges (Belgium).

Toesca, Adrien, Damien David, André Kuster, Michel Lussault, et Kevyn Johannes. 2022. « An urban thermal tool chain to simulate summer thermal comfort in passive urban buildings (Submitted) ». *Building and Environment*.