

Évaluation des interactions bâtiment-microclimat à l'échelle du quartier par une approche intégrée à la simulation énergétique des bâtiments

Adnane M'SAOURI EL BAT^{1*}, Sihem GUERNOUTI^{1,2,3}, Auline RODLER^{1,2,3}, Marjorie MUSY^{1,2,3}

¹ Cerema, Equipe-Projet BPE
MAN, 9 rue Viviani, 44262 Nantes Cedex, France

² LOCIE, UMR 5271

Campus Chambéry, Savoie Technolac, 73370 Le Bourget du Lac Cedex, France

³ IRSTV

Centrale Nantes - Bâtiment T, 1 rue de la Noë, 44321 Nantes Cedex, France

*(auteur correspondant : adnane.msaourielbat@cerema.fr)

Résumé - L'objectif de cette étude est de présenter une modélisation intégrée dans le logiciel TRNSYS 18 en utilisant une approche zonale permettant de prendre en compte les phénomènes thermiques, aérauliques et radiatifs à l'échelle d'un quartier. Une comparaison avec les résultats expérimentaux existants dans la littérature a été réalisée pour évaluer la validité de cette approche. Les résultats numériques obtenus sont en phase avec ceux de l'expérimentation avec une erreur absolue moyenne sur la température de surface des murs extérieurs d'environ 1,3°C et une erreur relative moyenne d'environ 7%.

Nomenclature

P pression, Pa

q débit volumique, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

V vecteur vitesse

T température, °C

Symboles grecs

λ multiplicateur de Lagrange

α module de précision gaussien

ρ densité massique

1. Introduction

Dans un environnement complexe, comme une zone urbaine, les éléments bâtis du tissu urbain modifient fortement les conditions microclimatiques en perturbant la distribution de l'écoulement du vent et de la chaleur entre les différentes surfaces. De ce fait, l'étude de l'impact du microclimat urbain sur les besoins énergétiques et sur le confort thermique des occupants est devenue une nécessité pour une meilleure évaluation de la performance énergétique des bâtiments. Dans la perspective de garantir le confort thermique intérieur et d'apporter des solutions techniques adéquates, la prédiction par simulation de la consommation énergétique doit être de plus en plus réaliste.

La littérature récente montre que l'utilisation des modèles basés sur des codes de calculs de mécanique de fluides (CFD) pour étudier le microclimat urbain et son impact sur les besoins énergétiques des bâtiments est répandue [1], [2]. Ces modèles sont généralement détaillés, en revanche complexes à utiliser (temps de calcul élevé, co-simulation...).

Pour répondre à la nécessité accrue en matière de modélisation des interactions entre l'environnement bâti et le microclimat urbain et de ses conséquences sur les performances énergétiques des bâtiments, la recherche dans le domaine de la simulation énergétique des

bâtiments a récemment changé d'orientation, passant de l'échelle du bâtiment à l'échelle du quartier ou bien de la ville. La modélisation de la consommation d'énergie d'un bâtiment dans son contexte urbain nécessite, par conséquent, de simuler les interactions avec les autres bâtiments et avec le microclimat urbain. Néanmoins, la complexité des environnements urbains rend la simulation énergétique des bâtiments à l'échelle urbaine très difficile.

Afin de surmonter cette complexité, l'objectif de ce papier est de présenter une approche simplifiée d'une modélisation intégrée dans un outil de simulation thermique dynamique des bâtiments (STD) couplé à un modèle basé sur une approche zonale pour le calcul des écoulements d'air à l'extérieur. Cette approche intégrée vise à évaluer les interactions entre le microclimat urbain et le bâtiment. Pour ce faire, un modèle thermoradiatif basé sur le facteur de Gebhart a été intégré dans un outil STD pour la modélisation du rayonnement solaire de courtes longueurs d'onde (CLO), du rayonnement thermique de grandes longueurs d'onde (GLO) dans le quartier. Par ailleurs, pour décrire de manière adéquate les champs de température et de vitesse du vent autour des bâtiments, un modèle zonal tridimensionnel d'écoulement du vent respectant la conservation de la masse a été développé sur la base de modèles empiriques existants dans la littérature. Pour évaluer la fiabilité de la modélisation développée une comparaison avec des résultats expérimentaux a été effectuée.

2. Méthode

2.1. Modèle thermoradiatif

Dans cette étude, le logiciel TRNSYS 18 a été utilisé pour la simulation thermique dynamique des bâtiments sachant qu'il n'inclut pas la modélisation physique de l'environnement extérieur. Afin de lever ce verrou, nous avons développé un nouveau modèle adapté à TRNSYS 18 permettant d'intégrer la simulation du microclimat à l'échelle d'un quartier. Dans TRNSYS 18, la méthode de la fonction de transfert de Mitalas et Stephenson est utilisée pour exprimer la conduction thermique à travers les murs. Au niveau du sol, la modélisation du transfert de chaleur est basée sur le Type 49 de TRNSYS. Ce dernier est un modèle tridimensionnel basé sur les différences finies, qui nécessite un maillage du sol couvert par le bâtiment ou le quartier (champ proche) ainsi que la zone environnante du bâtiment ou du quartier (champ lointain). Ensuite, les transferts sont évalués entre le rez-de-chaussée ou les zones de revêtement routier (dalle) et le sol [3]. En champ lointain, la température du sol, à une profondeur de 10 m, est calculée grâce au modèle de Kusuda.

Les échanges radiatifs de courte et de grande longueur d'ondes sont modélisés différemment pour les surfaces intérieures et extérieures. Bien que le modèle radiatif de TRNSYS est uniquement adapté aux zones thermiques intérieures [3], [4], nous nous sommes appuyés sur une approche développée dans des études antérieures pour le rendre également applicable à l'environnement extérieur [3], [4]. Dans ces travaux, le modèle radiatif est basé sur le facteur de Gebhart [5] pour calculer les échanges radiatifs et les inter-réflexions ainsi que les coefficients de distribution du rayonnement solaire. Plus de détails et de validations expérimentales sont disponibles dans les études [3], [4].

2.2. Modèle thermo-aéraulique zonal pour l'extérieur

Le vent est un élément prédominant à l'échelle microclimatique urbaine, son comportement est lié à plusieurs facteurs et, en particulier, à la configuration du tissu urbain. De plus, l'écoulement du vent a une influence à la fois sur le flux thermique généré par le renouvellement d'air des espaces intérieurs et sur les échanges convectifs à la surface extérieure de l'enveloppe

du bâtiment. A ce sujet, les modèles de mécanique des fluides (CFD) sont souvent utilisés pour simuler le champ d'écoulement dans les zones urbaines. Ces modèles sont très précis, mais résolvent les équations d'advection et de turbulence de manière itérative, ce qui est gourmand en calcul et en mémoire pour la plupart des applications à l'échelle urbaine. Cela ne convient pas à notre objectif de calculer les effets couplés (thermique, radiatif et aéraulique) sur une période annuelle avec des temps de calcul raisonnables.

En réponse à cette problématique, nous proposons un modèle thermo-aéraulique zonal applicable au cas d'un quartier en utilisant le langage de programmation Python, et intégrable dans TRNSYS 18 via le Type 163.

Ce modèle aéraulique, reposant sur la conservation de la masse, a été inspiré de la méthode proposée par Röckle [6]; permettant ainsi de réduire les temps de calcul. Ainsi, le champ d'écoulement du vent autour des bâtiments est d'abord initialisé à partir de modèles empiriques pour réduire le nombre d'itérations. Ensuite, uniquement l'équation d'advection est résolue à partir du champ de vent initial en considérant que la turbulence est « grossièrement résolue » par l'initialisation. La conservation de la masse est ensuite appliquée en utilisant une technique d'analyse variationnelle [7]. Celle-ci résout l'équation de Poisson pour les multiplicateurs de Lagrange λ , en utilisant la méthode de surrelaxation successive (SOR) :

$$\frac{\partial^2 \lambda}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \lambda}{\partial y^2} + \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)^2 \frac{\partial^2 \lambda}{\partial z^2} = \nabla \cdot \vec{V}_0 \quad (1)$$

Où $\vec{V}_0 = u_{0,i,j,k} \cdot \vec{i} + v_{0,i,j,k} \cdot \vec{j} + w_{0,i,j,k} \cdot \vec{k}$ est la divergence du champ de vitesse initial et u , v et w sont les composantes de vitesse dans les directions x , y et z ; α_1 et α_2 sont les modules de précision gaussiens qui définissent l'importance relative des mouvements d'air horizontaux par rapport aux mouvements verticaux.

Le champ de vitesse est ensuite mis à jour en utilisant les équations d'Euler-Lagrange après la résolution de l'équation (1) :

$$u_{i,j,k} = u_{0,i,j,k} + \frac{1}{2\alpha_1^2 \Delta x} (\lambda_{i+1,j,k} - \lambda_{i,j,k}) \quad (2)$$

$$v_{i,j,k} = v_{0,i,j,k} + \frac{1}{2\alpha_1^2 \Delta y} (\lambda_{i,j+1,k} - \lambda_{i,j,k}) \quad (3)$$

$$w_{i,j,k} = w_{0,i,j,k} + \frac{1}{2\alpha_2^2 \Delta z} (\lambda_{i,j,k+1} - \lambda_{i,j,k}) \quad (4)$$

Avec Δx , Δy et Δz respectivement les espaces entre les mailles correspondant aux directions x , y et z .

Le transfert de chaleur par convection peut être modélisé de deux manières. La première consiste à fixer une valeur constante du coefficient de transfert de chaleur par convection et la seconde consiste à utiliser des corrélations spécifiques issues de la littérature. Dans cette étude, la valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection des façades du bâtiment est supposée constante sur les surfaces intérieures du bâtiment (6,1 W/m²K pour le plafond, 1,6 W/m²K pour le plancher et 4,1 W/m²K pour les parois verticales [8]). Pour les surfaces extérieures, le coefficient de transfert de chaleur par convection a été évalué en utilisant la corrélation de Hagishima et Tanimoto [9].

La modélisation des phénomènes microclimatiques générés à l'échelle du quartier est réalisée à l'aide d'un modèle zonal. Ce modèle consiste à diviser le quartier en plusieurs zones interconnectées (Figure 1). Dans chacune de ces zones fictives, les équations de conservation de la masse et d'énergie sont utilisées pour calculer les caractéristiques thermo-aérauliques (température, pression). Pendant la simulation, le modèle aéraulique décrit précédemment est utilisé pour calculer les débits volumiques aux interfaces des zones q_{ij} . Ces débits correspondent aux intégrations du champ de vitesse moyen aux interfaces entre les zones. En guise d'exemple,

si on considère un sous-volume ijk (Figure 1), du maillage étudié entre les coordonnées x_i et x_{i+1} , y_j et y_{j+1} , z_k et z_{k+1} , les débits entre les différentes interfaces sont calculés par les équations (5), (6) et (7).

$$q_i = \int_{z_i}^{z_{i+1}} u_{i,j,k} (y_{i+1} - y_i) dz \quad (5)$$

$$q_j = \int_{z_i}^{z_{i+1}} v_{i,j,k} (x_{i+1} - x_i) dz \quad (6)$$

$$q_k = \int_{x_i}^{x_{i+1}} w_{i,j,k} (y_{i+1} - y_i) dx \quad (7)$$

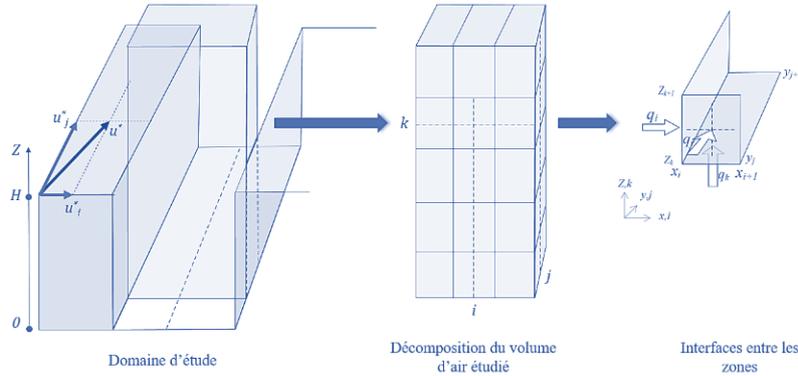


Figure 1 : Zonage du domaine d'étude [10]

Le modèle de calcul développé donne des résultats sous la forme de débits volumiques moyens horaires aux interfaces. Ces débits sont également exprimés sous la forme de débits massiques en fonction de la densité ρ_{ijk} de la cellule concernée. L'hypothèse d'isothermie, densité moyenne constante sur l'ensemble du domaine étudié, permet de définir un champ de vitesse du vent respectant la conservation de la masse, soit :

$$\sum_{k=0}^n q_{ij} = 0 \quad (8)$$

Au cours de la simulation, le modèle thermo-radiatif utilise les débits volumiques d'air calculés par Python et calcule la température de l'air de chaque cellule. Cette température est alors utilisée pour calculer la densité ρ_{ijk} de la zone considérée. Ainsi, le remplacement des densités de chaque zone par la loi des gaz parfaits ($\rho_i = \frac{P_i}{RT_i}$), conduit à un système de N équations dont les inconnues sont les températures T_i et les pressions P_i . La résolution de ces équations algébriques non linéaires couplées est obtenue à l'aide de la méthode de Newton-Raphson par Python.

3. Comparaison avec les résultats expérimentaux

3.1. Dispositif expérimental de EM2PAU

En vue d'évaluer la fiabilité et la pertinence des résultats de la modélisation proposée dans cette étude, une comparaison a été faite entre ceux-ci et ceux obtenus à partir des mesures expérimentales de la campagne de mesure EM2PAU [11]. Cette dernière représente une rue canyon à l'échelle un demi ($1/2$), constituée de deux rangées : de longueur 24 m, de largeur 3,6 m et de hauteur 5,2 m, ce qui donne un facteur d'aspect de 1,4 m. Chaque ligne est construite par un assemblage de quatre conteneurs de B=2,45 m de largeur représentant les bâtiments (Figure 2-a). L'axe de la rue forme un angle de 43° avec la direction du Nord. Quant à la détermination de la rugosité du sol, la méthode de décomposition préconisée par [11] a été utilisée (Figure 2-b); par ailleurs, la longueur de rugosité des conteneurs est de 0,01 m.



Figure 2 : (a) Campagne expérimentale EM2PAU, (b) Rugosité du sol autour des conteneurs [11]

Concernant les données météorologiques, un fichier de données horaires a été créé à partir des mesures expérimentales issues de la campagne de mesures EM2PAU pour la période du 06/04/2011 au 09/04/2011.

3.2. Analyse comparative entre les résultats numériques et expérimentaux de la température de surface des façades

En se basant sur la comparaison des mesures expérimentales de la campagne EM2PAU et des résultats numériques obtenus par l'approche intégrée développée, on observe que la température de surface de la façade Sud-Ouest est en bonne cohérence avec celle mesurée (Figure 3). L'erreur absolue moyenne entre les résultats de simulation et ceux de la campagne expérimentale est de 1,46 °C et l'erreur relative moyenne est de 7,4 %.

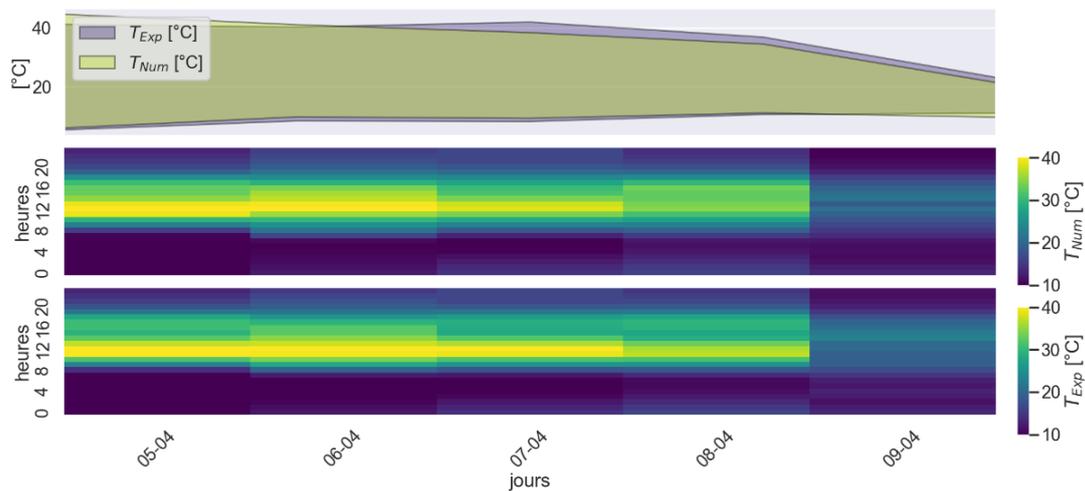


Figure 3 : Variation temporelle de la température des surfaces Sud-Ouest étudiées

La comparaison des résultats numériques et expérimentaux des températures de surface Nord-Est (Figure 4) montre également une bonne cohérence. Dans ce cas, l'erreur absolue moyenne est d'environ 1,32 °C et l'erreur relative moyenne est d'environ 7,35 %.

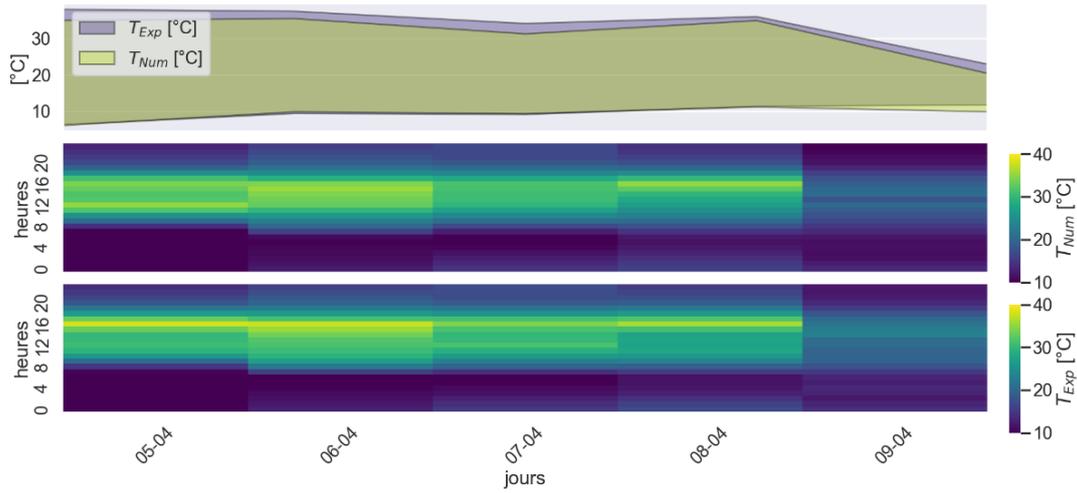


Figure 4 : Variation temporelle de la température des surfaces Nord-Est étudiées

Pour les deux façades, on observe également une légère sous-estimation des pics de midi et une surestimation des minimas du matin. Ces différences peuvent être expliquées par le pas de temps horaire choisi comme condition limite d'entrée, créant un lissage des résultats qui peut expliquer les pics plus élevés. Les mêmes résultats ont été observés par Athamena et al [11].

D'autres paramètres statistiques sont recommandés dans la littérature pour l'évaluation de la précision des résultats numériques et spécifiquement pour les études microclimatiques [12] comme le biais fractionnel FB (Fractional Bias), le biais géométrique moyen GM (Geometric Mean bias), l'erreur quadratique moyenne normalisée NMSE (Normalized Mean Square Error), la variance géométrique GV (Geometric Variance) et enfin la fraction des prédictions correspondant à un facteur de deux observations (FAC2). Leurs expressions sont données respectivement par les équations suivantes :

$$FB = \frac{(C_o - C_m)}{0.5(C_o + C_m)} \quad (9)$$

$$GM = \exp(\ln C_o - \ln C_m) \quad (10)$$

$$NMSE = \frac{(C_o - C_m)^2}{C_o C_m} \quad (11)$$

$$GV = \exp[(\ln C_o - \ln C_m)^2] \quad (12)$$

$$FAC2 = 0.5 \leq \frac{C_m}{C_o} \leq 2.0 \quad (13)$$

Où C_o et C_m sont respectivement les valeurs expérimentales et numériques et le surlignage désigne la moyenne sur l'ensemble des données disponibles.

Les paramètres statistiques calculés pour les températures de surface des façades Nord-Est et Sud-Ouest à partir de la moyenne des résultats simulés et mesurés sont présentés dans le tableau 1.

Les résultats montrent une très bonne performance du modèle pour les températures de surface avec les indicateurs FB et NMSE pratiquement égaux à zéro, GM et GV pratiquement égaux à 1 et FAC2 égal à 0,99. Sur la base de cette étude comparative, nous pouvons considérer que le modèle microclimatique développé est capable d'estimer les températures extérieures de surface des façades. En se basant sur cette étude comparative, l'approche de modélisation intégrée développée combinant TRSNYS moyennant des modifications pour les échanges radiatifs extérieurs et une méthode aéraulique zonale a la capacité d'estimer précisément les températures extérieures de surface. Cette approche pourra donc être utilisée en tant qu'un outil pour la modélisation thermique ou énergétique des bâtiments et du microclimat urbain.

Facteurs statistiques	FB	GM	NMSE	GV	FAC2
Cible idéale	0	1	0	1	1
L'intervalle « acceptable » [12]	$-0,3 \leq FB \leq 0,3$	$0,7 \leq GM \leq 1,3$	$NMSE \leq 4$	$GV < 1,6$	$FAC2 \geq 0,5$
Surface Nord-Est	0,05	1,1	0,004	1,1	0,96
Surface Sud-Ouest	0,008	1	0,001	1	0,99

Tableau 1 : Paramètres statistiques calculés pour les températures de surface des façades (numériques et expérimentales)

3.3. Analyse comparative entre les résultats numériques et expérimentaux de la température de l'air

La figure 5 présente la comparaison entre la température de l'air simulée et mesurée dans le canyon. Nous pouvons observer que la variation de la température de l'air dans la rue du canyon issue des simulations avec notre approche intégrée tend aussi vers celle mesurée.

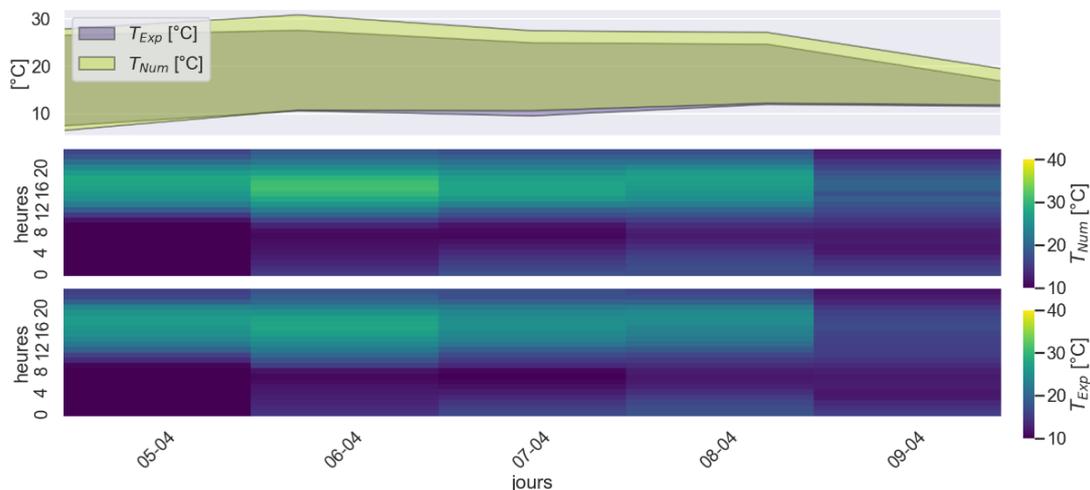


Figure 5 : Variation temporelle de la température de l'air dans la rue canyon

Selon l'analyse de corrélation, la température simulée est en accord avec les données mesurées. L'erreur absolue moyenne est d'environ $1,2^{\circ}\text{C}$ et l'erreur relative moyenne est approximativement de 7%. Par ailleurs, les résultats des paramètres statistiques de la température de l'air du canyon en question se sont révélés globalement satisfaisants (tableau 2).

Facteurs statistiques	FB	GM	NMSE	GV	FAC2
Température de canyon obtenue par notre modèle	-0,061	0,97	0,007	1,004	1,005

Tableau 2 : Paramètres statistiques calculés pour la température de l'air dans le canyon

4. Conclusion

Dans cette étude, une approche de modélisation intégrée à l'échelle du quartier combinant TRNSYS18 avec quelques modifications pour la prise en compte des échanges radiatifs d'une manière plus réaliste à l'extérieur des bâtiments et un modèle thermo-aéroulrique zonale pour l'extérieur a été développée dans le but d'évaluer l'impact de microclimat urbain sur la demande énergétique des bâtiments. Cette approche prend en considération les effets des vents dominants, l'ensoleillement et les inter-réflexions. Afin de vérifier la fiabilité du présent modèle, une étude comparative entre les résultats expérimentaux de la campagne de mesure

EM2PAU et les résultats numériques a été effectuée. Les résultats numériques obtenus sont proches des observations expérimentales avec une erreur absolue moyenne sur la température surfacique des murs extérieures de 1,3°C et une erreur relative moyenne d'environ 7 %. L'utilisation de cette méthode est intéressante pour son temps de calcul réduit par rapport à des calculs CFD tout en gardant une précision satisfaisante pour les objectifs d'évaluation thermique et énergétique des bâtiments.

Références

- [1] Y. Toparlar, B. Blocken, B. Maiheu, et G. J. F. V. Heijst, « A review on the CFD analysis of urban microclimate », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 80, p. 1613-1640, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.248>.
- [2] N. Lauzet et al., « How building energy models take the local climate into account in an urban context – A review », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 116, p. 109390, 2019, doi: [10.1016/j.rser.2019.109390](https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109390).
- [3] A. M'Saouri El Bat, Z. Romani, E. Bozonnet, et A. Draoui, « Integration of a practical model to assess the local urban interactions in building energy simulation with a street canyon », *J. Build. Perform. Simul.*, vol. 13, no 6, p. 720-739, nov. 2020, doi: [10.1080/19401493.2020.1818829](https://doi.org/10.1080/19401493.2020.1818829).
- [4] A. M. E. Bat, Z. Romani, E. Bozonnet, et A. Draoui, « Thermal impact of street canyon microclimate on building energy needs using TRNSYS: A case study of the city of Tangier in Morocco », *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 24, p. 100834, avr. 2021, doi: [10.1016/j.csite.2020.100834](https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100834).
- [5] B. Gebhart, « Surface temperature calculations in radiant surroundings of arbitrary complexity – for gray, diffuse radiation », *Int J Heat Mass Transf.*, vol. 3, p. 341-346, 1961.
- [6] R. Röckle, *Bestimmung der Strömungsverhältnisse im Bereich komplexer Bebauungsstrukturen*. der Technischen Hochschule Darmstadt, Germany, 1990.
- [7] B. Singh, B. S. Hansen, M. J. Brown, et E. R. Pardyjak, « Evaluation of the QUIC-URB fast response urban wind model for a cubical building array and wide building street canyon », *Environ. Fluid Mech.*, 2008, doi: [10.1007/s10652-008-9084-5](https://doi.org/10.1007/s10652-008-9084-5).
- [8] A. Rodler, S. Guernouti, M. Musy, et J. Bouyer, « Thermal behaviour of a building in its environment: Modelling, experimentation, and comparison », *Energy Build.*, vol. 168, p. 19-34, juin 2018, doi: [10.1016/j.enbuild.2018.03.008](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.008).
- [9] A. Hagishima et J. Tanimoto, « Field measurements for estimating the convective heat transfer coefficient at building surfaces », vol. 38, p. 873-881, 2003, doi: [10.1016/S0360-1323\(03\)00033-7](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(03)00033-7).
- [10] A. M'Saouri El Bat, « Développement d'un modèle pour l'étude de l'impact du microclimat urbain sur les performances énergétiques des bâtiments : cas des rues canyons et des cours intérieures », Theses, Université Abdelmalek Essaadi, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.univ-grenoble-alpes.fr/tel-03318871>
- [11] K. Athamena, J. F. Sini, J. M. Rosant, et J. Guilhot, « Numerical coupling model to compute the microclimate parameters inside a street canyon: Part I: Methodology and experimental validation of surface temperature », *Sol. Energy*, no April, p. 0-1, 2018, doi: [10.1016/j.solener.2018.04.059](https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.059).
- [12] J. C. Chang et S. R. Hanna, « Air quality model performance evaluation », *Meteorol. Atmospheric Phys.*, vol. 87, no 1-3, p. 167-196, 2004.

Remerciements

Ce travail est réalisé dans le cadre du projet CREATIV (convention de financement N°2062C0002, ADEME « appel à Projet Bâtiments 2020 »).