

Modélisation du microclimat urbain par un modèle zonal intégré dans un modèle de simulation énergétique des bâtiments

Adnane M'SAOURI EL BAT*¹, Zaid ROMANI², Emmanuel BOZONNET³, Abdeslam DRAOUI¹

¹ ETTE, Equipe de recherche en Transferts Thermiques et Énergétique (UAE/E14FST), Faculté des Sciences et Techniques de Tanger, Université Abdelmalek Essaâdi, Maroc.

² Ecole Nationale d'Architecture de Tétouan, Maroc.

³ LaSIE, La Rochelle University, Avenue Michel Crépeau, 17000 La Rochelle, France.

* a.msaourielbat@gmail.com

RESUME. L'objectif de cette étude est de montrer la possibilité de réaliser une modélisation intégrée dans le logiciel TRNSYS avec une approche zonale permettant de prendre en compte les phénomènes thermiques, hydriques, aérauliques et radiatifs à l'échelle microclimatique d'une rue canyon. Pour évaluer la validité de cette approche, une comparaison avec des résultats expérimentaux existants dans la littérature a été effectuée. Les résultats numériques obtenus sont concordants avec ceux des expérimentations avec une erreur absolue moyenne sur la température surfacique des parois extérieures d'environ 1 °C et une erreur relative moyenne d'environ 5 %. L'utilisation de cette méthode montre son intérêt en terme du temps de calcul réduit par rapport à des calculs CFD tout en gardant une précision satisfaisante permettant ainsi de mieux prédire les performances énergétiques des bâtiments à l'échelle d'un quartier.

MOTS-CLÉS : Approche zonale, Microclimat urbain, TRNSYS.

ABSTRACT. The aim of this study is to show the possibility of carrying out an integrated modelling in the TRNSYS software with a zonal approach allowing to take into account the thermal, hydric, aeraulic and radiative phenomena at the microclimatic scale of a street canyon. To evaluate the validity of this approach, a comparison with existing experimental results in the literature was carried out. The numerical results are consistent with the experimental results where the mean absolute error on the surface temperature of the outer walls is about 1 °C and the mean relative error is about 5 %. This method shows its interest in terms of reduced calculation time compared to CFD calculations with satisfactory accuracy in order to obtain a more precise evaluation of the building's energy performance in the district level.

KEYWORDS: Zonal approach, Urban microclimate, TRNSYS.

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. En effet, l'étude de l'impact du microclimat urbain sur les besoins énergétiques est devenue une nécessité pour une meilleure évaluation des performances énergétiques des bâtiments.

La littérature récente rapporte 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 (Toparlar et al. 2017). Ces modèles sont généralement détaillés, mais en revanche complexes à utiliser (temps de calcul élevé, utilisation de plusieurs logiciels...). En outre, on trouve des modèles simplifiés comme CitySim (Robinson et al. 2009). Il s'agit d'un outil de simulation urbaine qui permet d'estimer la demande énergétique annuelle de chaque bâtiment d'un quartier ou même d'une ville. Cependant, son modèle thermique est très simplifié, et peut être insatisfaisant pour la conception des bâtiments. Dans ces conditions, il y a un besoin pressant de trouver un compromis entre la précision et le temps de calcul. Pour répondre à cette problématique, le modèle de type zonal permet de décrire les paramètres de température et de vitesse d'air à l'échelle microclimatique urbaine, avec un degré de précision intermédiaire entre la modélisation CFD fine et les approches nodales simplifiées (Bozonnet, Belarbi, and Allard 2007).

Dans cette perspective, l'objectif de cette étude est de montrer la possibilité de réaliser une modélisation intégrée dans le logiciel TRNSYS 18 avec une approche zonale permettant de prendre en compte les phénomènes thermiques, hydriques, aérauliques et radiatifs à l'échelle microclimatique d'une rue canyon. Le modèle radiatif est basé sur le facteur de Gebhart pour calculer les échanges radiatifs et les inter-réflexions (Klein 2010), le modèle d'humidité des parois est basé sur le modèle de « la profondeur effective de la pénétration d'humidité (EMPD) » (Klein 2010), tandis que le modèle aéraulique est basé d'une part sur le modèle de Nicholson (1975), de Lemonsu et al. (2004) et d'autre part sur celui de Hotchkiss et Harlow (1973) qui prend en compte les effets des vents dominants. Pour évaluer la validité du modèle développé, une comparaison avec des résultats expérimentaux existants dans la littérature a été effectuée.

2. METHODE

2.1. MODELE THERMO-HYGRO-RADIATIF

Le modèle thermo-hygro-radiatif proposé dans cette étude est développé à l'aide du logiciel TRNSYS 18. La méthode de la fonction de transfert de Mitalas et Stephenson (Klein 2010) est utilisée dans ce logiciel pour exprimer la conduction thermique à travers les murs. Par contre, le calcul des coefficients de cette dernière n'est effectué qu'une seule fois au début de la simulation. Par conséquent, les propriétés thermophysiques variables du matériau, induites par exemple par un taux d'humidité variable dans le matériau, ne peuvent pas être prises en compte dans le calcul du transfert de chaleur (Abadie and Mendes 2006).

En ce qui concerne la modélisation du transfert d'humidité à travers les murs, deux modèles simplifiés sont disponibles dans TRNSYS (Klein 2010). Le premier est celui de la capacité effective. Ce modèle, avec un seul paramètre, simule le comportement d'un volume complémentaire fictif représentant les matériaux de la pièce (zone) réagissant avec l'humidité de l'air. Le second est le modèle de la profondeur effective de pénétration de l'humidité (EMPD), qui est un modèle d'humidité de stockage tampon. Dans ce dernier, le comportement de la paroi est représenté par deux couches : une couche de stockage de surface qui réagit avec l'humidité de la zone et une couche de stockage profond qui échange l'humidité avec la couche de stockage de surface. L'épaisseur de ces couches dépend de la période du cycle de variation de l'humidité et des propriétés de stockage et de la sorption de l'humidité du matériau.

Comme indiqué précédemment, la modélisation de la rue canyon a été effectuée par des zones intérieures dans le BES. Ce choix nous a permis d'appliquer le modèle EMPD aux différentes surfaces du canyon. Néanmoins, pour un mur extérieur, les deux faces de ce mur sont exposées à deux

environnements différents, l'environnement climatique extérieur et les conditions intérieures de logement. Pour prendre en compte le transfert de chaleur et d'humidité à travers une surface extérieure, le bilan thermique de la surface sera constitué par les transferts de chaleur convectifs et radiatifs, les transferts de chaleur sensibles dus aux précipitations ainsi que les transferts de chaleur latente et sensible dus à l'échange de vapeur. Alors que le bilan d'humidité sera constitué par les précipitations et l'échange de vapeur. Toutefois, le modèle EMPD utilisé dans TRNSYS présente certaines limites. C'est un modèle d'humidité isotherme, qui exclut les effets de la température, les propriétés des matériaux sont constantes et qui n'est pas couplé au transfert de chaleur dans le mur, et ne tient pas compte du mécanisme de transport des liquides. De plus, le modèle EMPD ne prend pas en compte le flux d'humidité entre les surfaces extérieures et intérieures. Cela peut affecter les températures de surface et le transfert de chaleur sensible à travers le mur, tout en affectant les conditions de la surface intérieure et le transfert de chaleur et de masse avec l'air intérieur.

À cet égard, et comme le transport de liquide n'a pas beaucoup d'effet sur les flux de chaleur sensible et latente à l'intérieur (Kim 2017), nous avons décidé de programmer un autre Type de modèle EMPD. Ce choix consiste principalement à améliorer le transfert de chaleur et d'humidité à travers l'enveloppe du bâtiment en appliquant le modèle EMPD à l'extérieur et aux surfaces intérieures du bâtiment. Dans ce Type, les équations (1) et (2) sont utilisées pour coupler le modèle EMPD au transfert de chaleur dans le mur où les propriétés du matériau sont mises à jour à chaque pas de temps (Janssen and Roels 2009). Comme dans TRNSYS, il est constitué de deux couches tampons, l'une pour le court terme (variation quotidienne) et l'autre pour le long terme (variation annuelle).

$$A\rho_{surf}C_{p,surf}\frac{dT_{buf}}{dt} = \frac{A(T_{Surf,i} - T_{buf})}{\frac{1}{h_c} + \frac{d_{EMPD,surf}}{\lambda_{surf}}} + \frac{A(T_{deep} - T_{buf})}{\frac{d_{EMPD,deep}}{\lambda_{deep}}} \quad (1)$$

$$A\rho_{deep}C_{p,deep}\frac{dT_{deep}}{dt} = \frac{A(T_{deep} - T_{buf})}{\frac{d_{EMPD-deep}}{\lambda_{deep}}} \quad (2)$$

Où les couches tampon (surf) et profonde (deep) sont décrites par les caractéristiques suivantes : A est la surface, C_p est la capacité calorifique [J/kg.K] et λ est la conductivité thermique [W/m².K] .

La profondeur de pénétration effective d_{EMPD} est calculée par l'équation (3) ci-dessous, dans laquelle $\delta(\phi)$ est la perméabilité à la vapeur des matériaux [kg/s.m.Pa], ϕ est l'humidité relative [%], P_{sat} est la pression de vapeur saturée [Pa] à la température T [°C], t_p est la période du cycle d'humidité [s], ρ est la densité du matériau [kg/m³], $\xi(\phi)$ est la capacité d'humidité en termes d'humidité dérivée de l'isotherme de sorption du matériau [kg/kg].

$$d_{EMPD} = \sqrt{\frac{\delta(\phi)P_{sat}(T)t_p}{\rho\xi(\phi)\pi}} \quad (3)$$

La modélisation des transferts de chaleur dans le sol est basée sur le Type 49 de TRNSYS. Cette composante prend en compte les transferts de chaleur dans le sol dans les trois directions. Le transfert de chaleur est supposé être uniquement conductif. Ce Type est basé sur un modèle tridimensionnel de différences finies implicite et nécessite un maillage du sol couvert par le bâtiment ou le quartier (champ proche) ainsi que de la zone environnante du bâtiment ou du quartier (champ lointain) afin de calculer le transfert de chaleur entre le rez-de-chaussée ou les zones de revêtement routier (dalle) et le sol (Klein 2010).

En ce qui concerne les échanges radiatifs, TRNSYS distingue les échanges en courtes longueurs d'onde (CLO) et en grandes longueurs d'onde (GLO). Ces échanges sont modélisés différemment pour

les surfaces intérieures et extérieures. Plus précisément, l'irradiation solaire sur les surfaces extérieures est considérée comme un gain tandis que le rayonnement de grandes longueurs d'onde est traité comme une perte de chaleur vers le ciel froid. En outre, un modèle de rayonnement 3D tenant compte des multiples réflexions n'est appliqué que pour les zones intérieures. En revanche, le logiciel TRNSYS ne peut modéliser le microclimat urbain. Il modélise un environnement extérieur, sans tenir compte des inter-réflexions des ondes courtes ou longues entre les façades des bâtiments du canyon. Vu que l'objectif principal de cette étude consiste à évaluer l'influence des phénomènes microclimatiques générés par un canyon sur la demande énergétique des bâtiments, le canyon est modélisé par une approche simplifiée que nous avons développée dans une étude précédente (M'Saouri El Bat et al. 2020). Dans cette approche, le modèle radiatif est basé sur le facteur Gebhart (Klein 2010) pour calculer les échanges radiatifs et les inter-reflets ainsi que les coefficients de distribution du rayonnement solaire.

2.2. MODELE THERMOAERAIQUE ZONAL

A l'échelle microclimatique urbaine, le vent est un élément prépondérant, son comportement est lié à plusieurs facteurs parmi lesquels la configuration du tissu urbain. Ainsi les directions du vent sont très influencées par l'orientation des rues et les divers obstacles bâtis. Dans la suite, la description détaillée du modèle aéraiue est effectuée, sachant que ce modèle a été développé sous le code Python et par la suite couplé avec Type 56 de TRNSYS par l'utilisation de Type 163.

A l'échelle de la canopée urbaine (figure 1), est plus précisément d'une rue canyon ($z < H$), l'écoulement du vent est caractérisé par une recirculation dans le plan transversal à la rue et un écoulement longitudinal le long de celle-ci. De ce fait, pour la zone ijk , la composante longitudinale u_j du vent est modélisée dans cette étude par le modèle proposé par (Lemonsu, Grimmond, and Masson 2004). Les formules correspondantes ont été modifiées pour être spécifiques à l'angle entre la direction du vent et celle de la rue canyon.

Pour les rues canyons étroites, $H/W > 2/3$:

$$u_j = \frac{2}{\pi} u_H \cos(\varphi) e^{\left(\frac{H}{2W} \left(\frac{z}{H} - 1\right)\right)} \quad (4)$$

Pour les rues canyons modérées, $1/3 < H/W < 2/3$:

$$u_j = \left[1 + 3 \left(\frac{2}{\pi} - 1\right) \left(\frac{H}{W} - \frac{1}{3}\right)\right] u_H \cos(\varphi) e^{\left(\frac{H}{2W} \left(\frac{z}{H} - 1\right)\right)} \quad (5)$$

Pour les rues canyons larges, $H/W < 1/3$:

$$u_j = u_H \cos(\varphi) e^{\left(\frac{H}{2W} \left(\frac{z}{H} - 1\right)\right)} \quad (6)$$

Où u_H est la vitesse du vent à la hauteur du bâtiment qui dépend de la vitesse de friction u^* , φ est la direction du vent externe par rapport à l'axe des rues, z est l'altitude de la zone considéré, H et W sont respectivement la hauteur et la largeur.

Pour calculer les valeurs des composantes transversales de la vitesse du vent (u_i , u_k) et décrire la recirculation hélicoïdale dans une rue canyon nous avons utilisé le modèle de Hotchkiss et Harlow (Hotchkiss and Harlow 1973).

$$u_i = \frac{A}{k} [e^{k_H y} (1 + ky) - \beta e^{-k_H y} (1 - k_H y)] \sin(k_H x) \quad (7)$$

$$u_k = -A \cdot y \cdot [e^{k_H y} - \beta e^{-k_H y}] \cos(k_H x) \quad (8)$$

Avec k_H , β , A et y sont définies par les relations suivantes :

$$k_H = \frac{\pi}{W} \quad (9)$$

$$\beta = e^{-2k_H H} \quad (10)$$

$$A = \frac{k_H u_0}{1-\beta} \quad (11)$$

$$y = z - H \quad (12)$$

Où u_0 est la vitesse du vent au-dessus du canyon ($z = H$).

Au-delà de la canopée urbaine ($z \geq H$), en utilisant le modèle de Nicholson (Nicholson 1975) on obtient les relations suivantes pour calculer les composantes de la vitesses du vent (u_i, u_j, u_k).

$$u_i = \frac{u_i^*}{k} \ln \left(\frac{z+d+z_0}{z_0} \right) \quad (13)$$

$$u_j = \frac{u_j^*}{k} \ln \left(\frac{z+d+z_0}{z_0} \right) \quad (14)$$

$$u_k = \frac{u_k^*}{k} \ln \left(\frac{z+d+z_0}{z_0} \right) \quad (15)$$

Où $k = 0,4$ est la constante de von Karman, d est la longueur de déplacement et z_0 est la longueur de la rugosité de la canopée urbaine considérée.

Pour modéliser le transfert de chaleur par convection, la valeur du coefficient de transfert de chaleur des façades des bâtiments est prise constante à l'intérieur du bâtiment ($6,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ pour le plafond, $1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ pour le sol et $4,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ pour les murs). En ce qui concerne les façades extérieures, nous avons calculé le coefficient de transfert de chaleur par convection en utilisant les modèles de Hagishima et Tanimoto (Hagishima and Tanimoto 2003).

Afin de modéliser les phénomènes microclimatiques générés par la rue canyon, un modèle zonal est développé. L'idée principale de ce modèle est de diviser une rue canyon en plusieurs zones reliées les unes aux autres (figure 1). Ces zones sont fictives et ne sont pas séparées par des parois matérielles. On suppose que l'air dans chaque zone est homogène et les variables d'état de l'air (température, masse volumique, concentration en polluants) sont considérées comme uniformes à l'intérieur de chaque zone. La division verticale des zones est utilisée pour tenir compte de la distribution verticale de la température dans la rue. Dans chacune de ces zones fictives, les équations de conservation de la masse (équation 16) et d'énergie sont utilisées pour calculer les caractéristiques thermoaérauliques (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 sont repris par le Type 56 de TRNSYS (TRNBuild).

$$\sum_{k=0}^n q_{ij} = 0 \quad (16)$$

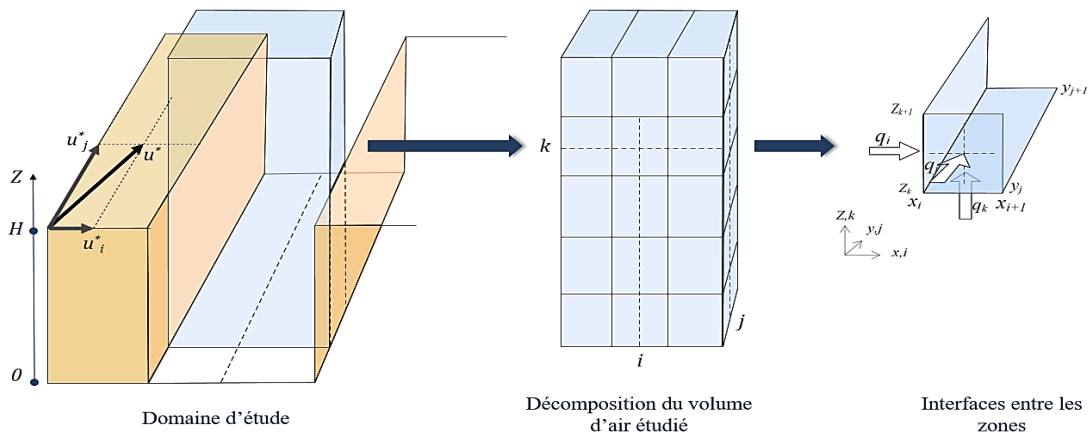


Figure 1 : Zonage de la rue canyon.

3. COMPARAISON AVEC LES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Dans le but de valider notre modèle, nous avons comparé nos résultats avec les mesures de la maquette expérimentale « ClimaBat ». Cette dernière représente une scène urbaine à l'échelle 1/10 constituée de cinq bâtiments rectangulaires parallèles et identiques avec des façades orientées vers l'est et l'ouest (figure 2) (Djedjig, Bozonnet, and Belarbi 2015). Chaque bâtiment est formé par la juxtaposition de 3 cuves de récupération d'eau pluviale. Les cuves, fabriquées en béton, ont une hauteur de 1,26 m, une largeur de 1,13 m et une longueur de 1,68 m. L'espace régulier des bâtiments forme quatre rues canyons de rapport d'aspect égal à 0,8.



Figure 2 : Plateforme expérimentale de la maquette ClimaBat.

Concernant les données météorologiques, un fichier de type TMY2 a été créé à partir des mesures expérimentales pendant la période du 13/08/2012 au 10/09/2012. Le tableau (1) résume les propriétés thermophysiques des matériaux utilisés dans la maquette ClimaBat :

Matériaux	e [cm]	α	ε	λ [W/m ² .K]	ρ [Kg/m ³]	C_p [J/Kg.K]
Béton	4,5	0,36	0,9	2,36	2150	915
Chaussée	10	0,64	0,9	0,04	1,25	1000

Tableau 1: Propriétés thermophysiques des matériaux constituant les bâtiments et le sol.

Les figures 3 et 4 représentent les évolutions temporelles de la température des surfaces extérieures Est et Ouest de la rue canyon. Concernant la surface Est, la comparaison des résultats obtenus en utilisant notre modèle avec ceux obtenus dans le cadre de l'étude expérimentale ClimaBat (Djedjig, Bozonnet, and Belarbi 2015) montre une bonne concordance. En effet, l'erreur quadratique moyenne entre nos résultats et ceux obtenus expérimentalement est d'environ 1,1 °C, l'erreur relative moyenne est d'environ 5 % et l'erreur absolue est de l'ordre de 1 °C.

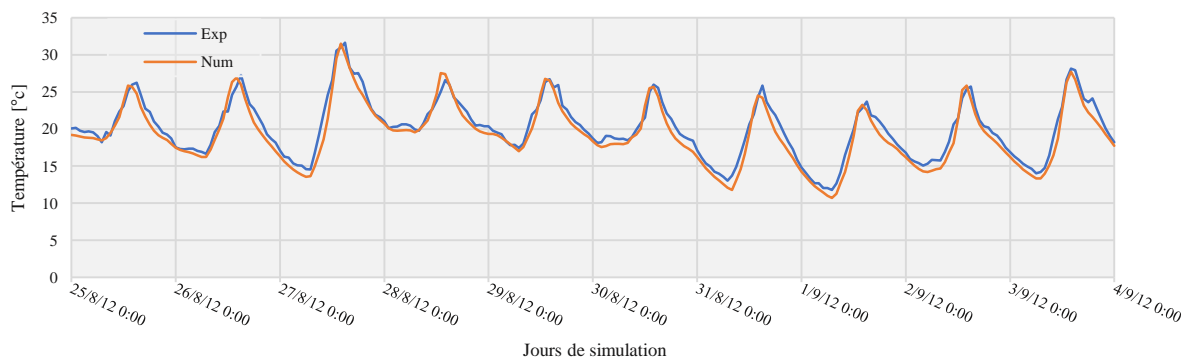


Figure 3 : Variation temporelle de la température des surfaces Est.

De même, une étude comparative a été menée entre les températures numériques et expérimentales de surface Ouest (figure 4). Dans ce cas, l'erreur quadratique moyenne est d'environ 1,1 °C, l'erreur absolue moyenne ne dépasse pas 1 °C et l'erreur relative moyenne est d'environ 5 %.

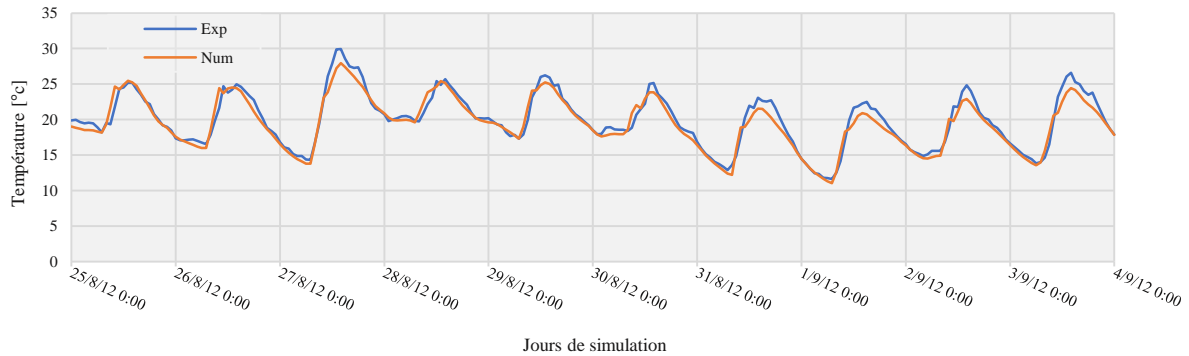


Figure 4 : Variation temporelle de la température des surfaces Ouest.

D'autres paramètres statistiques sont recommandés dans la littérature (Chang and Hanna 2004) pour la comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux 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 le facteur 2 (FAC2). Leurs expressions sont les suivantes :

$$FB = \frac{(\overline{C_o} - \overline{C_m})}{0.5(\overline{C_o} + \overline{C_m})} \quad (17)$$

$$GM = \exp(\ln \overline{C_o} - \ln \overline{C_m}) \quad (18)$$

$$NMSE = \frac{(\overline{C_o} - \overline{C_m})^2}{\overline{C_o} \overline{C_m}} \quad (19)$$

$$GV = \exp[(\ln \overline{C_o} - \ln \overline{C_m})^2] \quad (20)$$

$$FAC2 = 0,5 \leq \frac{\overline{C_m}}{\overline{C_o}} \leq 2,0 \quad (21)$$

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 Est et Ouest à partir de la moyenne des résultats simulés et mesurés sont présentés dans le tableau (2). Les résultats montrent une très bonne performance du modèle pour les températures de surface avec FB et NMSE pratiquement égales à zéro, GM et GV pratiquement égales à 1 et FAC2 de 0,99.

Facteurs statistiques	FB	GM	NMSE	GV	FAC2
Cible idéale	0	1	0	1	1
L'intervalle « acceptable »	$-0,3 \leq FB \leq 0,3$	$0,7 \leq GM \leq 1,3$	$NMSE \leq 4$	$GV < 1,6$	$FAC2 \geq 0,5$
Surface Est	0,01	0,97	0,03	1,01	0,99
Surface Ouest	0,02	1,04	0,01	1,03	0,98

Tableau 2: Paramètres statistiques calculés pour les températures de surface.

4. CONCLUSION

Dans cette étude, une approche zonale sous TRNSYS 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'humidité, l'ensoleillement et les inter-réflexions. Afin de vérifier la fiabilité du présent modèle, une étude comparative entre les résultats expérimentaux Plateforme

expérimentale ClimaBat et nos résultats numériques est effectuée. Les résultats numériques obtenus sont proches des observations expérimentales avec une erreur absolue moyenne sur la température surfacique des murs extérieures de 1°C et une erreur relative moyenne d'environ 5 %. 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.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Abadie, Marc, and Nathan Mendes. 2006. "Comparative Analysis of Response-Factor and Finite-Volume Based Methods for Predicting Heat and Moisture Transfer through Porous Building Materials." *Journal of Building Physics* 30 (1): 7–37.
- Bozonnet, Emmanuel, Rafik Belarbi, and Francis Allard. 2007. "Thermal Behaviour of Buildings: Modelling the Impact of Urban Heat Island." *Journal of Harbin Institute of Technology (New Series)* 14 (Sup.): 19–22.
- Chang, Joseph C, and Steven R Hanna. 2004. "Air Quality Model Performance Evaluation." *Meteorology and Atmospheric Physics* 87 (1–3): 167–96.
- Djedjig, Rabah, Emmanuel Bozonnet, and Rafik Belarbi. 2015. "Analysis of Thermal Effects of Vegetated Envelopes : Integration of a Validated Model in a Building Energy Simulation Program." *Energy & Buildings* 86: 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.057>.
- Hagishima, Aya, and Jun Tanimoto. 2003. "Field Measurements for Estimating the Convective Heat Transfer Coefficient at Building Surfaces" 38: 873–81. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(03\)00033-7](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(03)00033-7).
- Hotchkiss, R S, and F H Harlow. 1973. "Air Pollution Transport in Street Canyons. Report by Los Alamos Scientific Laboratory for US Environmental Protection Agency." EPA-R4-73-029, NTIS PB-233 252.
- Janssen, Hans, and Staf Roels. 2009. "Qualitative and Quantitative Assessment of Interior Moisture Buffering by Enclosures." *Energy and Buildings* 41 (4): 382–94. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.11.007>.
- Kim, Joowook. 2017. "Development of a Simplified Heat and Moisture Transfer Model for Residential Buildings."
- Klein, S A. 2010. "TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program." *Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA* 1: 1–5. <http://www.trnsys.com/>.
- Lemonsu, A, C S B Grimmond, and V Masson. 2004. "Modeling the Surface Energy Balance of the Core of an Old Mediterranean City: Marseille." *Journal of Applied Meteorology* 43 (2): 312–27. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0312:MTSEBO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0312:MTSEBO>2.0.CO;2).
- M'Saouri El Bat, Adnane, Zaid Romani, Emmanuel Bozonnet, and Abdeslam Draoui. 2020. "Impact Of Urban Microclimate On The Energy Performance Of Riad-Type Buildings." In *Proceedings of Building Simulation 2019: 16th Conference of IBPSA*, 16:3771–78. <https://doi.org/10.26868/25222708.2019.211272>.
- Nicholson, Sharon E. 1975. "A Pollution Model for Street-Level Air." *Atmospheric Environment (1967)* 9 (1): 19–31.
- Robinson, Darren, Frédéric Haldi, Jérôme Henri Kämpf, P Leroux, D Perez, A Rasheed, and U Wilke. 2009. "CITYSIM: Comprehensive Micro-Simulation Of Resource Flows For Sustainable Urban Planning." *International IBPSA Conference*, 1083–90.
- Toparlar, Y, Bert Blocken, Bino Maiheu, and G J F Van Heijst. 2017. "A Review on the CFD Analysis of Urban Microclimate." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 80: 1613–40.