

Contribution à la détermination du coefficient de transfert de chaleur convective extérieure pour les bâtiments de faible hauteur en zone urbaine

Hajar Benhmidou*¹, Zaid Romani², Mohamed El Mankibi³, Abdeslam Draoui¹

¹ ETTE, Equipe de recherche en Transferts Thermiques et Énergétique (UAE/U10FST), Faculté des Sciences et Techniques de Tanger, Université Abdelmalek Essaâdi, Maroc.

² Ecole Nationale d'Architecture de Tétouan, Maroc.

³ LGCB, ENTPE, Vaulx-en-Velin, France.

*hajarbenhmidou@hotmail.fr

RESUME : L'incertitude de la convection surfacique sur les parois peut induire à des résultats imprécis concernant l'évaluation des performances thermiques des bâtiments. Bien qu'il existe de nombreux modèles dans la littérature, basés sur des mesures in-situ ou en laboratoire, au moyen de différentes sources de données sur le vent, des conditions d'essai et des types de bâtiments, il y a un manque des corrélations du coefficient de transfert de chaleur par convection qui peuvent être utilisées en particulier pour les bâtiments existants de faible hauteur en zone urbaine. Dans cette étude, un nouveau modèle de calcul est développé sur une plateforme expérimentale existante à l'ENTPE de Vaulx-en-Velin (Cellule HYBCELL) qui prend en compte l'influence de la température du sol, de la température du ciel et des facteurs de vue. Les résultats obtenus montrent que même dans des conditions de vent faible, le modèle développé représente une nouvelle corrélation pour la détermination du coefficient de transfert de chaleur par convection qui peut être utilisée dans l'amélioration des résultats du transfert de chaleur à travers l'enveloppe et ainsi améliorer la précision par rapport à l'estimation des performances énergétiques des bâtiments.

MOTS-CLÉS : Coefficient de transfert de chaleur par convection ; Bâtiments de faible hauteur ; Mesures in-situ.

ABSTRACT. Uncertainty of wall surface convection can lead to inaccurate results in assessing the building's thermal performance. While there are various models in the literature based on in-situ or laboratory measurements, using different sources of data on wind, test conditions and building types, there is a lack of correlations of convective heat transfer coefficient that can be used especially for existing low-rise buildings in urban areas. In this study, a new calculation model is developed on an existing experimental platform at the ENTPE of Vaulx-en-Velin (the HYBCELL cell) which takes into account the impact of the ground temperature, the sky temperature as well as the view factors. The obtained results show that even under low wind conditions, the developed model represents a new correlation for convective heat transfer coefficient that can be used to improve the results of heat transfer through the building envelope and therefore contribute to a better buildings' energy performance estimation.

KEYWORDS: Convective heat transfer coefficient; Existing low-rise buildings; In-situ measurements.

1. INTRODUCTION

Le secteur du bâtiment est l'un des plus gros consommateurs d'énergie en Europe (40%) et il est le premier poste de consommation énergétique en France, devant celui des transports (25%) et celui de l'industrie (23%). La grande majorité de cette énergie est encore produite à partir de ressources non renouvelables (Journal officiel de l'Union Européenne 2019). Par conséquent, l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments neufs et existants représente un défi majeur, dans lequel la prédiction des performances énergétiques joue un rôle important. Parmi les paramètres incertains et complexes à déterminer ; soit pour réaliser des simulations thermiques dynamiques (STD) (Mirsadeghi

et al. 2013), ou bien pour compléter les méthodes d'identification in-situ (Evangelisti et al. 2017); on trouve le coefficient de transfert de chaleur par convection. Ce dernier peut induire à une surestimation ou à une sous-estimation des échanges thermiques à travers l'enveloppe d'un bâtiment. Il est à noter que ce paramètre dépend de nombreuses variables telles que la vitesse du vent, le régime d'écoulement de l'air extérieur et la rugosité de la surface, les températures du sol et du ciel et les facteurs de vue (Loveday et Taki 1996a).

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour déterminer le coefficient de transfert de chaleur par convection (h) des bâtiments. Celles-ci peuvent être classées par catégories : méthodes analytiques, numériques et expérimentales. Les méthodes analytiques sont uniquement applicables à des situations simples comme les plaques rectangulaires ou les cylindres. Les méthodes numériques, notamment celles qui utilisent le calcul de la dynamique des fluides (CFD), sont des outils puissants pour évaluer le coefficient h . Cependant, de telles simulations nécessitent un temps de calcul drastique. Par ailleurs, les corrélations qui émanent des méthodes expérimentales, que ce soit des tests à échelle réduite ou à échelle réelle, restent actuellement les plus utilisées pour l'estimation du coefficient h (Mirsadeghi et al. 2013). Les campagnes expérimentales menées sur la détermination de ce coefficient h ont conduit à plusieurs modèles empiriques appliqués au bâtiment (tableau 1).

| Modèle | Intervalle de la vitesse du vent (min-max, m/s) | | | Rugosité de surface | Géométrie du bâtiment | Position du point de mesure | Type du terrain |
|--------------------|---|----------|---------|---------------------|---------------------------------------|-----------------------------|-----------------|
| | V_{loc} | V_{10} | V_R | | | | |
| McAdams | NA | NA | NA | Lisse /Rugueuse | Plaque | NA | NA |
| Sturrock | - | - | - | Lisse | Bâtiment de 26m de hauteur | - | - |
| ASHRAE task groupe | - | NA | - | Lisse | Bâtiment de 6 étages en forme L | Plusieurs points | - |
| Nicol | NA | NA | 0-4.72 | Lisse | - | - | - |
| Loveday | 0-9.5 | NA | 0-16 | Lisse | Bâtiment de 8 étages | au sixième étage | Semi-urbaine |
| Hagishima | 0.5-3 | NA | 0.2-7.5 | Rugueuse | Bâtiment de 2 à 4 étages | Toiture | - |
| MoWiTT | NA | 0-12 | NA | Lisse | Calorimètres de la taille d'une pièce | Façade | - |
| Liu&Harris | 0-3 | 0-16 | 0-9 | Lisse | Bâtiment d'un étage | Façade | Zone dégagée |

“NA” : Non applicable

“-” : Manque d'informations

Tableau 1 : Différents modèles de convection dans la littérature (Mirsadeghi et al. 2013).

D'après ces études, le coefficient h a été mesuré soit en laboratoire, soit in-situ en fonction de la géométrie du bâtiment, de la rugosité de la surface de la paroi considérée de celui-ci, de la vitesse et de la direction du vent et de la géométrie de celui-ci. Cependant, il manque une corrélation qui peut être utilisée en particulier pour les bâtiments de faible hauteur en zone urbaine. Également, la surface extérieure du bâtiment est généralement considérée comme étant soumise à un échange thermique par rayonnement avec une seule source et aucun facteur de vue n'est alors pris en compte.

Dans cette étude, nous proposons un modèle de calcul du coefficient h pour un cas de bâtiment de faible hauteur situé en zone urbaine et ce en fonction de la vitesse du vent local, de la température de surface extérieure du bâtiment étudié et de celle de l'air, et qui tient compte de l'échange radiatif entre la surface de la paroi considérée et l'air ambiant, le sol et le ciel.

2. METHODES UTILISEES

La chaleur qui traverse une paroi est régie par deux mécanismes à la surface extérieure du bâtiment considéré : la convection et le rayonnement de grandes longueurs d'ondes. Cette surface extérieure du bâtiment peut recevoir également le rayonnement solaire. Par conséquent, le bilan thermique au niveau de cette surface extérieure de la paroi considérée peut être exprimé comme suit :

$$\Phi_{\text{cond}} = \Phi_{\text{conv}} + \Phi_{\text{ray}} + \Phi_{\text{ir}} \quad (1)$$

Où Φ_{cond} représente le flux conductif à la surface considérée, Φ_{conv} le flux convectif, Φ_{ray} le flux radiatif de grandes longueurs d'ondes et Φ_{ir} l'irradiation solaire. Dans cette étude, toutes les mesures sont effectuées pendant la nuit, donc Φ_{ir} est nul. Le rayonnement de grandes longueurs d'ondes (Φ_{ray}) est généralement composé de trois parties distinctes : l'échange radiatif entre la surface extérieure du bâtiment et l'air extérieur environnant en milieu urbain Φ_{air} contenant des polluants et des contaminants font qu'il se comporte donc comme un milieu semi transparent, l'échange radiatif entre la surface extérieure du bâtiment et le ciel (Φ_{ciel}) et l'échange radiatif entre la surface extérieure du bâtiment et le sol (Φ_{sol}). Il est donc possible d'exprimer le rayonnement de grandes longueurs d'ondes comme suit :

$$\Phi_{\text{ray}} = \Phi_{\text{air}} + \Phi_{\text{ciel}} + \Phi_{\text{sol}} \quad (2)$$

Il convient de mentionner que pour le calcul du rayonnement, les facteurs de vue doivent également être pris en compte. Cependant, ces facteurs sont souvent négligés (Loveday et Taki 1996b; Liu et Harris 2015). En ignorant les facteurs de vue, on estime que la perte de chaleur par rayonnement de la surface extérieure du bâtiment est entièrement transférée à une source spécifique, ce qui peut augmenter drastiquement le transfert de chaleur par rayonnement de la surface du bâtiment vers une certaine source. Par conséquent, les composantes de l'échange radiatif de grandes longueurs d'ondes peuvent être exprimées sous la forme suivante :

$$\Phi_{\text{air}} = F_{\text{air}} \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{\text{air}}^4) \quad (3)$$

$$\Phi_{\text{ciel}} = F_{\text{ciel}} \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{\text{ciel}}^4) \quad (4)$$

$$\Phi_{\text{sol}} = F_{\text{sol}} \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{\text{sol}}^4) \quad (5)$$

Où : T_s , T_{air} , T_{ciel} et T_{sol} sont respectivement les températures de la surface extérieure du bâtiment, de l'air extérieur, du ciel et du sol ; σ est la constante de Stefan-Boltzmann et ε est l'émissivité de la surface extérieure considérée du bâtiment ; F_{air} , F_{ciel} et F_{sol} sont respectivement les facteurs de vue de l'air extérieur, du ciel et du sol. Ces facteurs de vue sont calculés en fonction de l'angle d'inclinaison (θ) de la surface au moyen des expressions (6), (7) et (8) ci-dessous proposées par Walton (Walton 1983).

$$F_{\text{sol}} = 0.5(1 - \cos \theta) \quad (6)$$

$$F_{\text{ciel}} = 0.5(1 + \cos \theta) \cos \frac{\theta}{2} \quad (7)$$

$$F_{air} = 0.5(1 + \cos \theta)(1 - \cos \frac{\theta}{2}) \quad (8)$$

Dans cette étude, T_{air} et T_s ont été directement mesurées par des capteurs de température. Cependant, T_{ciel} ne peut pas être mesurée et doit alors être estimée à l'aide des modèles existants dans la littérature. Compte tenu du fait que les méthodes détaillées existantes présentent généralement un manque en matière d'informations fondamentales sur les propriétés des constituants de l'atmosphère (Berdahl et Fromberg 1981; Zhang, Mcdowell, et Kummert 2017), nous avons opté alors pour des modèles empiriques qui introduisent généralement le concept d'émissivité du ciel (ε_{ciel}) pour déterminer la température de celui-ci. Dans cette optique, nous avons utilisé le modèle donné par l'équation (9) (Berdahl et Fromberg 1981; Prata 1996), bien que l'émissivité du ciel soit déterminée au moyen du modèle de Martin et Berdahl (1984).

$$T_{ciel} = \varepsilon_{ciel}^{\frac{1}{4}} T_{air} \quad (9)$$

Le rayonnement du sol a été négligé dans la plupart des travaux de recherche et dans certains cas la température du sol a été considérée égale à celle de l'air (Cole 1976). La température du sol peut différer de celle de l'air et ce à cause de l'effet du stockage de la chaleur pendant la journée. Par conséquent nous avons calculé cette température en utilisant la corrélation de Lu et Memari (Lu et Memari 2019) représentée par l'équation (10) ci-dessous qui est basée sur la mesure nocturne et ne peut être utilisée que pour estimer la température du sol pendant la nuit pour éviter l'influence du rayonnement solaire.

$$T_{sol} = 0,89T_{air} + 2,25 \quad (10)$$

Φ_{cond} a été mesuré par un fluxmètre et Φ_{conv} peut être exprimé par la loi de refroidissement de Newton donnée par l'équation (11), à partir de laquelle on peut obtenir le coefficient h comme indiqué dans l'équation (12).

$$\Phi_{conv} = h(T_s - T_{air}) \quad (11)$$

$$h = \frac{\Phi_{cond} - \Phi_{ray}}{T_s - T_{air}} \quad (12)$$

3. ETUDE EXPERIMENTALE IN-SITU

Cette étude expérimentale vise à développer une corrélation appropriée du coefficient h de transfert de chaleur convective extérieure pour les bâtiments de faible hauteur et plus particulièrement en zone urbaine. Par conséquent, la cellule expérimentale HYBCELL (Figure 1a) intégrée à la façade nord-est du laboratoire LGCB de l'École Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE) de Vaulx-en-Velin d'un azimut de 72° est utilisée (Coillot 2019). Cette cellule permet d'effectuer des tests avec des sollicitations extérieures réelles et une ambiance intérieure finement maîtrisée et instrumentée. Cette cellule a été divisée en deux parties : cellule A et cellule B quasi-identiques de $19,5 \text{ m}^3$ et $20,5 \text{ m}^3$ de volume ; séparées par un mur en polystyrène de $0,16 \text{ m}$ d'épaisseur. Ceci permet d'effectuer des tests identiques ou différents simultanément. Tous les tests ont été effectués pendant l'hiver 2019-2020 et ce pendant la nuit, pour éviter le rayonnement solaire. Des systèmes pour le chauffage intérieur ont été utilisés pour créer une différence de température entre l'environnement intérieur et extérieur afin d'assurer un flux de chaleur directionnel stable. Durant les tests, les conditions météorologiques extérieures (la vitesse et la direction du vent, la température, l'humidité relative) ont été mesurées par l'intermédiaire d'une station météo de type Anémomètre à ultrasons 2 axes HD 52.3D installée à 1 m au-dessus de la toiture de la cellule expérimentale (Figure 1b).

Des capteurs de température d'air et de surface de type PT100 avec une résolution de $0,1^{\circ}\text{C}$ ont été utilisés pour mesurer la température de l'air intérieur de la cellule et de la surface de la façade extérieure. Le flux de chaleur traversant la façade extérieure d'HYBCELL a été mesuré par quatre fluxmètres de type HFP01 montés sur la surface intérieure et extérieure de la façade (Figure 1c). Pour calculer le coefficient h , nous avons également mesuré l'émissivité in-situ de la façade vu la dépendance de ce paramètre des conditions réelles de la surface dont la rugosité, l'humidité et la pollution. Une caméra thermique et une source chaude ont été utilisées (Benhmidou, Romani, et Draoui 2018; Benhmidou et al. 2020) et la valeur mesurée de l'émissivité de la façade d'HYBCELL est estimée alors à 0,95.

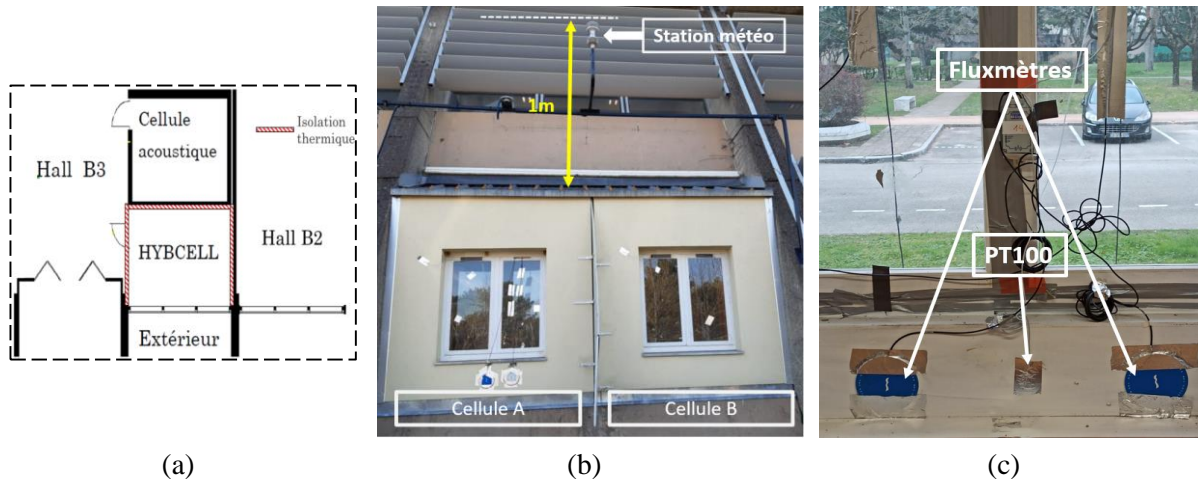


Figure 1 : (a) Plan de la cellule HYBCELL ;(b) Photo de la façade extérieure de la cellule;(c) Emplacement des fluxmètres et du capteur PT100 à l'intérieur d'HYBCELL.

4. ANALYSE DES RESULTATS

La figure 2 ci-dessous montre que la température du sol estimée a été sensiblement plus élevée que celle de l'air extérieur et peut donc avoir une influence significative sur la modélisation de l'échange de chaleur par rayonnement décrite dans le paragraphe précédent. Egalement, la température du ciel est différente de celle de l'air, et par conséquent, négliger une telle différence entraînera une imprécision dans le calcul du coefficient h .

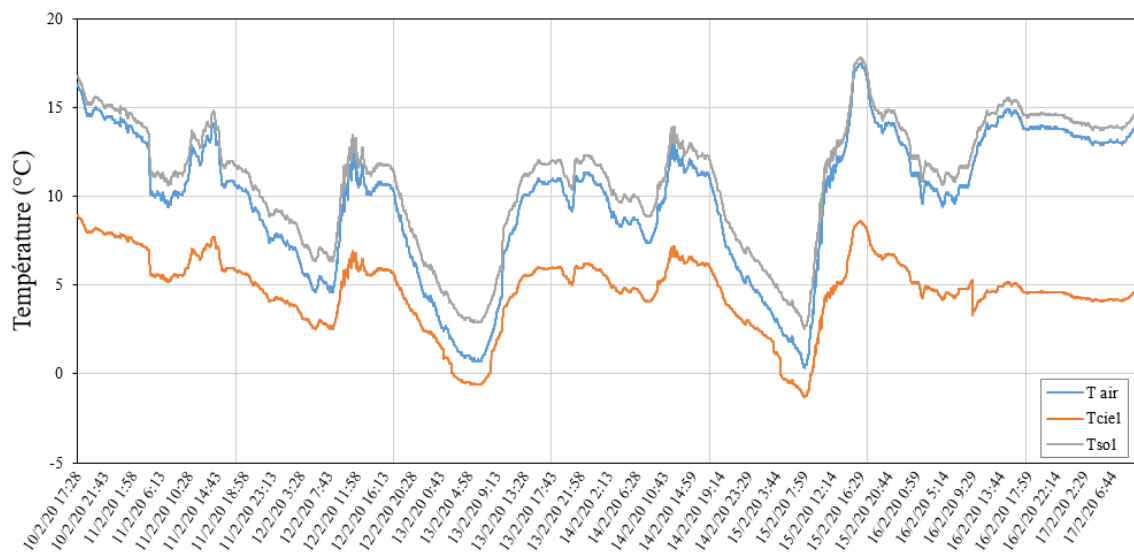


Figure 2 : Variation temporelle de les températures d'air mesurée, du sol et du ciel.

Une régression linéaire multiple a été utilisée pour développer une corrélation entre le coefficient h mesuré, la vitesse du vent local V_{loc} , la température de surface de la paroi étudiée T_s , et la température de l'air T_{air} , et ce pour inclure les composantes de la convection naturelle et forcée de telle sorte que l'effet de chaque composante, dans son intervalle de variation, influe sur le calcul de h exprimé dans l'équation ci-dessous :

$$h = 10,01V_{loc} + 5,58T_s - 2,62T_{air} - 0,09V_{loc}^2 - 0,05T_s^2 + 0,96T_{air}^2 - 3,20V_{loc} \times T_s + 2,72V_{loc} \times T_{air} - 0,89T_s \times T_{air} \quad (13)$$

Le pourcentage de variation de la réponse donné par le modèle (R^2) est égal à 0,9988. C'est-à-dire environ 99,88% de la variation est donné par ce modèle et les points des données mesurées sont proches de la droite de régression ajustée et 0,12% seulement reste inexplicable. Et par conséquent, on a obtenu un bon ajustement du modèle de régression par rapport aux données mesurées.

Pour évaluer la validité du modèle développé, nous avons effectué une comparaison entre les valeurs calculées du coefficient h par celui-ci et celles mesurées pendant une semaine (Figure 3). Nous avons observé un bon accord entre les valeurs de h mesurées et celles calculées avec un coefficient de régression R^2 de 0,9921, une erreur absolue moyenne de 0,59 W/m²k et une erreur relative moyenne qui ne dépasse pas 2,7%. On peut alors conclure que le modèle développé peut être utilisé pour déterminer le coefficient h des surfaces extérieures des bâtiments de faible hauteur situés en zone urbaine.

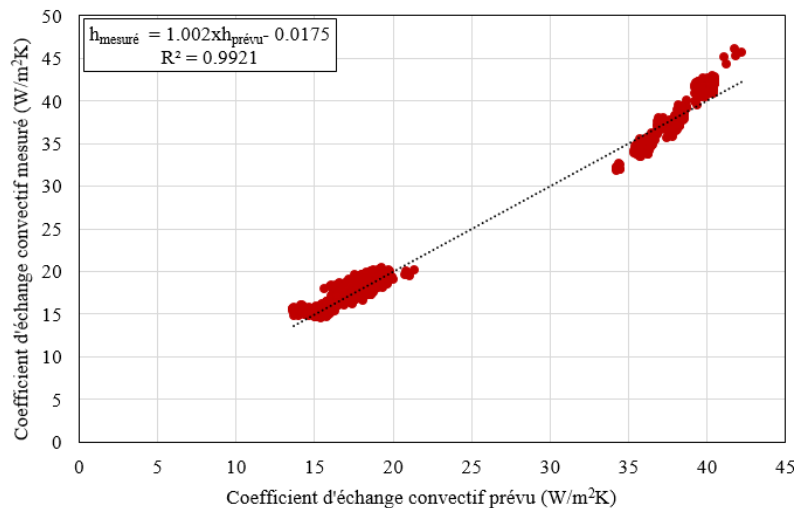


Figure 3 : Comparaison entre les valeurs de h calculées et celles mesurées.

Une comparaison qualitative a été effectuée entre les résultats de cette étude et ceux de certains travaux de recherche antérieurs relatifs à la vitesse du vent local (Yazdanian et Klems 1994; Nicol 1977; Hagishima et Tanimoto 2003) ainsi que ceux donnés par les règles françaises de calcul en thermique des bâtiments (*Règles Th-bat – Parois opaques* 2017) (Figure 4). Dans cette étude comparative, nous avons calculé le coefficient h par l'équation (10) pour deux cas différents de la température de surface extérieure et de celle de l'air ($T_{air} = 5^\circ\text{C}$; $T_s = 5^\circ\text{C}$) et ($T_{air} = 6^\circ\text{C}$; $T_s = 7^\circ\text{C}$). On constate alors que le modèle de calcul du coefficient h que nous avons développé fournit des valeurs de celui-ci comprises dans l'intervalle de celles obtenues par les modèles sélectionnés dans cette étude comparative. Cependant, ces résultats montrent la forte dépendance du coefficient h en fonction de la température de surface de la paroi considérée et celle de l'air en particulier pour les bâtiments de faible hauteur.

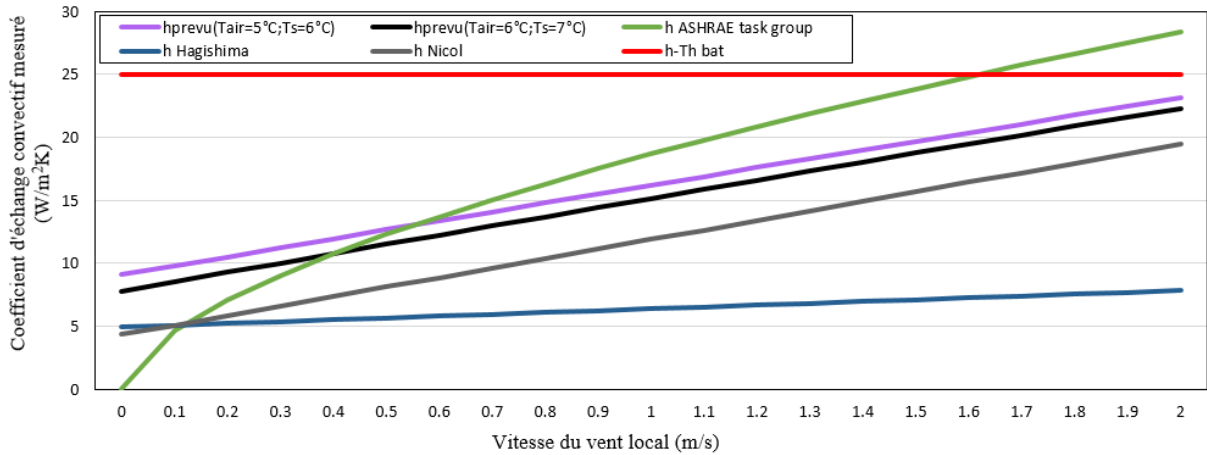


Figure 4 : Comparaison des différentes corrélations du coefficient h .

5. CONCLUSION

Dans cette étude, la mesure du coefficient h de transfert de chaleur convective extérieure a été effectuée pour un bâtiment de faible hauteur dans une zone urbaine. Le bâtiment considéré est une plateforme expérimentale située à l'ENTPE de Vaulx-en-Velin en France. Tous les tests sont effectués la nuit pendant l'hiver 2019-2020 pour éviter l'influence du rayonnement solaire. Les données relatives à la vitesse du vent local sont mesurées par une station météo de type Anémomètre à ultrasons 2 axes HD 52.3D installée à 1 m au-dessus de la toiture de la cellule expérimentales. Ce choix est motivé par la facilité de l'intégration des corrélations de coefficient h dans les outils de simulation thermique dynamique (STD) en se basant seulement sur les fichiers des données météorologiques utilisées par ces derniers.

Dans cette perspective, un nouveau modèle de calcul a été développé en se basant sur les flux conductifs mesurés ainsi que sur la vitesse du vent local, sur la température de surface et sur celle de l'air, prenant en considération la température du sol, celle du ciel et les facteurs de vue. La température du sol et celle du ciel ont été calculées en fonction de celle mesurée de l'air extérieur. À partir des résultats obtenus par ce modèle, une corrélation linéaire multiple du coefficient de transfert de chaleur convective a été développée, permettant la prise en compte de la vitesse du vent local, la température de surface et celle de l'air, tout en considérant les composantes de la convection naturelle et forcée.

L'utilisation de cette corrélation s'avère donc intéressante, d'une part pour aider les ingénieurs et les chercheurs dans l'analyse du transfert de chaleur à travers l'enveloppe des bâtiments à faible hauteur et d'autre part pour avoir plus de précision dans les résultats de simulations énergétiques des bâtiments. Finalement, étant donné que les mesures expérimentales de cette étude ont été effectuées en hiver pour une période d'une semaine et plus de mesures sont privilégiées pour avoir une grande plage de vitesse et de température.

6. BIBLIOGRAPHIE

Benhmidou, Hajar, Zaid Romani, et Abdeslam Draoui. 2018. « Développement d'une approche inverse par diagnostic thermique des façades pour une réhabilitation optimale d'un bâtiment résidentiel ». Dans *Proceedings IBPSA France 2018*. .

Benhmidou, Hajar, Zaid Romani, Mohamed El Mankibi, et Abdeslam Draoui. 2020. « Thermal performance prediction of an existing building with framing system using the IRT method ».

- Advances in Building Energy Research*, 1-25. <https://doi.org/10.1080/17512549.2020.1781689>.
- Berdahl, Paul, et Richard Fromberg. 1981. « AN EMPIRICAL METHOD FOR ESTIMATING THE THERMAL RADIANCE OF CLEAR SKIES ». <https://www.osti.gov/biblio/1149588>.
- Coillot, Mike. 2019. « Caractérisations numérique et expérimentale du comportement thermo-aérodynamique d'une double-fenêtre active (Thèse de doctorat) ». au sein de l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat.
- Cole, R. J. 1976. « The longwave radiative environment around buildings ». *Building and Environment* 11 (1) : 3-13. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(76\)90014-7](https://doi.org/10.1016/0360-1323(76)90014-7).
- Evangelisti, L., C. Guattari, P. Gori, et F. Bianchi. 2017. « Heat transfer study of external convective and radiative coefficients for building applications ». *Energy and Buildings* 151 : 429-38. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.004>.
- Hagishima, Aya, et Jun Tanimoto. 2003. « Field measurements for estimating the convective heat transfer coefficient at building surfaces ». *Building and Environment* 38 (7) : 873-81.
- Journal officiel de l'Union Européenne. 2019. « RECOMMANDATION (UE) 2019/786 DE LA COMMISSION du 8 mai 2019 sur la rénovation des bâtiments ». Vol. 6. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:32019H0786>.
- Liu, Y, et D. J. Harris. 2015. « Measurements of wind speed and convective coefficient on the external surface of a low-rise building ». *International Journal of Ambient Energy* 36 (5) : 225-34. <https://doi.org/10.1080/01430750.2013.853204>.
- Loveday, D. L., et A. H. Taki. 1996a. « Convective heat transfer coefficients at a plane surface on a full-scale building facade ». *International Journal of Heat and Mass Transfer* 39 (8) : 1729-42. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(95\)00268-5](https://doi.org/10.1016/0017-9310(95)00268-5).
- Loveday, D L, et A H Taki. 1996b. « Convective heat transfer coefficients at a plane surface on a full-scale building facade ». *International Journal of Heat and Mass Transfer* 39 (8) : 1729-42. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(95\)00268-5](https://doi.org/10.1016/0017-9310(95)00268-5).
- Lu, Xinrui, et Ali M. Memari. 2019. « Determination of exterior convective heat transfer coefficient for low-rise residential buildings ». *Advances in Building Energy Research* 0 (0) : 1-20. <https://doi.org/10.1080/17512549.2019.1612468>.
- Martin, Marlo, et Paul Berdahl. 1984. « Characteristics of infrared sky radiation in the United States ». *Solar Energy* 33 (3) : 321-36. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0038-092X\(84\)90162-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0038-092X(84)90162-2).
- Mirsadeghi, M, D Cóstola, B Blocken, et J L M Hensen. 2013. « Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy simulation programs: Implementation and uncertainty ». *Applied Thermal Engineering*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.03.003>.
- Nicol, Keith. 1977. « The energy balance of an exterior window surface, Inuvik, N.W.T., Canada ». *Building and Environment* 12 (4) : 215-19. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(77\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0360-1323(77)90022-1).
- Prata, A. J. 1996. « A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface ». *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 122 (533). <https://doi.org/10.1002/qj.49712253306>.
- Règles Th-bat – Parois opaques*. 2017. Publié le 20 décembre 2017.
- Walton, George. 1983. « Thermal Analysis Research Program. », 22-23.
- Yazdaniyan, M, et J.H Klems. 1994. « Measurement of the exterior convective film coefficient for windows in low-rise buildings ». Dans *ASHRAE Transactions*. . United States. <https://www.osti.gov/servlets/purl/10167169>.
- Zhang, Kun, Timothy P Mcdowell, et Michaël Kummert. 2017. « Sky Temperature Estimation and Measurement for Longwave Radiation Calculation Polytechnique Montréal, Dept . of Mechanical Engineering, Montréal, QC, Canada Thermal Energy System Specialists, LLC, Madison, WI, USA Abstract Modelling longwave heat ». *Building Simulation*, n° 3 : 2093-2102.