

Optimisation énergétique des vérandas : mise au point et validation d'un simulateur thermique

Moncef **GAZDALLAH**^{1,*}, Véronique **FELDHEIM**¹, Michel **BAGEIN**²,
Sébastien **WAUQUIER**³

¹ UMONS-Faculté Polytechnique de Mons, Service de Thermique et Combustion, Mons, Belgique.

² UMONS-Faculté Polytechnique de Mons, Service d'Informatique, Mons, Belgique.

³ Cover Group Recherche et Développement, Tournai, Belgique.

RÉSUMÉ

Cet article présente la mise au point d'un simulateur thermique de véranda en vue de son intégration au sein d'un optimisateur énergétique de vérandas capable de minimiser les apports d'énergie nécessaires au maintien d'une plage de température de confort tout au long de l'année. Au vu des différents paramètres continus, discrets ou mixtes, et des phénomènes physiques dont il faut tenir compte, le simulateur assurera une modélisation fine du transfert de chaleur et de masse entre la véranda et son environnement. Il repose sur le concept de "zones thermiques ou cellules" à température homogène. Il comporte des modèles de maillage volumique, de suivi solaire et des échanges conductifs, radiatifs et convectifs utilisant la méthode zonale. Une véranda expérimentale instrumentée a été réalisée pour collecter des données en vraie grandeur pour valider ce simulateur.

Mots Clés : véranda-simulateur – optimisateur-suivi solaire – rayonnement-validation

INTRODUCTION

La simulation du comportement thermique de vérandas découle d'un besoin des professionnels de la véranda de disposer de preuves scientifiques que l'ajout d'une véranda à une maison peut améliorer son bilan énergétique si elle est bien étudiée et ainsi redorer l'image de ce type d'extension qui a réputation d'être énergivore en hiver et inconfortable en été. Pour cela, un simulateur thermique a été mis au point. Il correspond à un code informatique optimisé de simulation du comportement thermique de la véranda hautement paramétrable. Il intègre les critères statiques (géométrie, localisation et orientation, isolation de la dalle de sol, caractéristiques des vitrages, panneaux et profilés) ainsi que les critères dynamiques (stores extérieurs, ventilation, chauffage d'appoint, climatisation, séparation vitrée entre véranda et maison, scénarios d'occupation de la véranda). Cette démarche est assurée par quatre modèles spécifiques qui tiennent compte des phénomènes de transfert de chaleur et de masse au sein et à l'extérieur de la véranda et d'une multitude de paramètres qui affectent fortement son état thermique. Le premier modèle réalise le maillage volumique de tout type de véranda par le biais d'un algorithme de maillage volumique de polyèdres quelconques. Il discrétise la véranda en cellules ou zones à faces planes.

Le deuxième modèle assure le suivi du soleil pour évaluer le rayonnement solaire direct, diffus et réfléchi incident sur une surface quelconque de la véranda à tout moment de l'année et pour n'importe quel endroit sur la surface de la terre. Il évalue aussi les échanges de chaleur par rayonnement infrarouge à l'intérieur de la véranda en utilisant la méthode de Gebhart [1] qui nécessite, entre autres, le calcul des facteurs de vue entre tous les éléments de surfaces solides des cellules de la véranda. Le troisième modèle évalue les échanges convectifs par le biais d'un modèle zonal. Quant au quatrième modèle, il évalue les échanges de chaleur par conduction. Ces quatre modèles manipulent les données par une approche orientée objet modélisant tous les composants de la véranda : site de pose, parois, volume d'air. Le couplage de ces quatre modèles permet de calculer la température, les flux de chaleur et les bilans énergétiques au sein de chaque composant ou sous-composant. L'estimation de ces grandeurs sur les composants principaux est calculée à partir de celles de leurs sous-composants. Le simulateur thermique a été développé sous la forme d'une librairie logicielle indépendante qui est intégrée dans une boucle d'optimisation. Une véranda expérimentale instrumentée a été conçue et réalisée pour collecter des données en vraie grandeur pour valider les résultats du simulateur thermique.

MODÉLISATION

Modèle géométrique

Le modèle géométrique structurel de la véranda décompose la véranda et son environnement en entités distinctes qui sont des zones d'un point de vue thermique (parois, radiateur, climatiseur, ventilateur, interfaces et masques solaires (stores intérieurs et extérieurs)).

Maillage

Maillage en blocs

Les données géométriques de la véranda sont définies en amont par un logiciel de conception 3D, puis transmises à la librairie sous forme de réseaux de mailles 3D. Ces mailles sont constituées par des segments verticaux définis dans un système de coordonnées cartésiennes (O,X,Y,Z) et la position du sol z_0 .

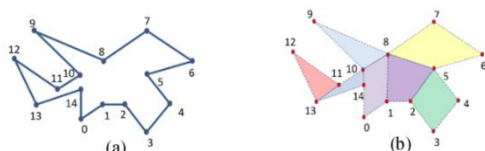


Figure 1 : Découpage en blocs convexes

La projection au sol de ces mailles forme des polygones fermés qui peuvent être concaves ou convexes (figure 1(a)) et dont les nœuds sont numérotés dans le sens antihoraire. Comme le montre la figure 1.b, le module de maillage les décompose tous en polygones convexes (blocs) [2]. Un bloc peut être discrétisé en plusieurs sous blocs.

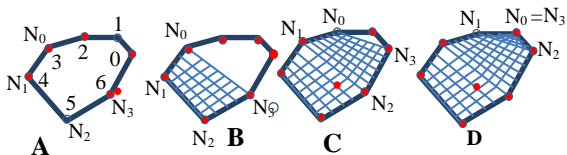


Figure 2 : Discrétisation d'un bloc convexe

La procédure de discrétisation consiste à sélectionner quatre nœuds N_0, N_1, N_2, N_3 du bloc (figure 2A) (trois s'il s'agit d'un triangle). Ensuite les segments sont discrétisés $[N_1N_2], [N_0N_1], [N_2N_3]$ (figure 2B). Si le polygone restant dispose encore de plus de deux nœuds, les opérations de sélection et de discrétisation sont recommencées (figure 2.c). Le cas de la figure 2D correspond au cas où il ne reste plus qu'un seul nœud.

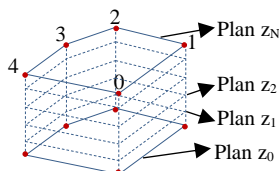


Figure 3 : Discrétisation verticale d'un bloc

La projection des nœuds d'un bloc sur son plan z_0 génère une structure 3D dont la hauteur est égale à la différence entre la coordonnée z du nœud le plus haut et z_0 . Cette hauteur peut être grande ce qui nécessite une

discrétisation verticale du bloc pour affiner le maillage de la véranda en blocs (figure 3).

Génération des cellules

Un modèle de maillage volumique a été développé pour générer les cellules. Il utilise le schéma de subdivision implémentant le schéma de Catmull-Clark [3] généralisé à des polyèdres quelconques ainsi que le schéma de Loop [4] adapté aux tétraèdres et octaèdres.

L'application de ce schéma de subdivision à un bloc consiste à :

1. déterminer le centre du bloc et le centre des segments reliant ses nœuds (figure 4)
2. projeter tous les nœuds sur les plans horizontaux obtenus par discrétisation verticale du bloc (figure 4)
3. relier les nœuds projetés sur deux plans horizontaux successifs pour former les cellules (figure 4).

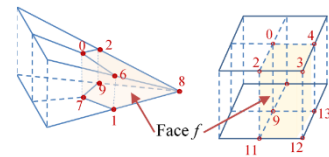


Figure 4 : Définition d'un bloc, des nœuds et des cellules

Une structure de données est associée à chaque cellule. Elle contient, entre autres, ses caractéristiques géométriques intrinsèques (faces, volume, surface des faces, normales aux faces) héritées des caractéristiques des blocs (nature des matériaux et leurs caractéristiques thermiques, composition des panneaux sandwich, etc.) et ses connexions (cellules voisines). Chaque face f est définie par deux nœuds voisins du bloc et leurs projections sur le plan z le plus proche du plan qui les contient (figure 4).

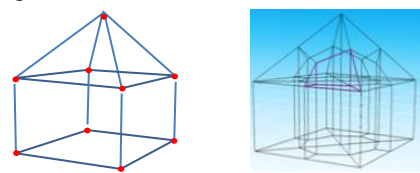


Figure 5 : Maillage d'un modèle de véranda

La figure 5 montre le maillage d'un modèle de véranda obtenu par ce modèle.

Modèle radiatif

Suivi du soleil

Nous avons mis au point un modèle qui évalue les composantes directes, diffuses et réfléchies du rayonnement solaire incident sur une surface quelconque de la véranda à tout moment de l'année et pour n'importe quel endroit de la surface de la terre. Il réalise le suivi du soleil dans un système de coordonnées équatoriales (figure 6) ayant comme centre le site de la véranda. Le plan équatorial devient

alors l'horizontale du lieu et l'axe de la sphère céleste la verticale du site (zénith). Les données géométriques qui définissent la position du soleil dans ce système de coordonnées sont : sa déclinaison δ , sa hauteur angulaire θ_s , son angle horaire et son azimut. A partir de ces données le modèle évalue pour chaque face donnée F de la véranda (figure 6) son inclinaison β et son orientation γ pour calculer l'angle d'incidence des rayons solaires.

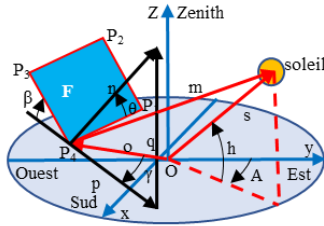


Figure 6 : Orientation et inclinaison d'une surface [5]

Rayonnement direct et diffus

Le rayonnement direct et le rayonnement diffus incidents sur une surface quelconque en l'absence d'obstacles sont calculés en fonction des rayonnements direct et diffus reçus sur un plan horizontal fournis par des mesures météorologiques. Il existe de nombreux modèles de corrélation pour estimer le rayonnement solaire global ou diffus sur une surface horizontale ; les modèles de ciel isotrope de Liu et Jordan [6] et de ciel anisotrope de source ponctuelle de Perez [7] que nous avons utilisé ici. Si $I_{b,h}$ est la mesure de l'intensité du rayonnement direct incident sur un plan horizontal, θ_s la hauteur angulaire du soleil et i l'angle d'incidence du rayon direct sur la face F alors l'intensité du rayonnement direct $I_{b,i}$ incident sur la face F non soumise à des effets d'ombrage, est égale à :

$$I_{b,i} = I_{b,h} \frac{\cos(i)}{\sin(\theta_s)} \quad (1)$$

Soient $I_{d,h}$ et $I_{G,h}$ les mesures de l'intensité des rayonnements, respectivement, diffus et global incidents sur un plan horizontal et ρ l'albédo. L'intensité du rayonnement diffus $I_{d,i}$, incident sur la face F est alors égale à :

$$I_{d,i} = I_{d,h} \frac{1 + \cos(\beta)}{2} + \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \cdot \rho \cdot I_{G,h} \quad (2)$$

Rayonnement solaire : distribution à l'intérieur de véranda

Globalement, le rayonnement solaire total I_i incident sur une face interne i est donné par :

$$A_i I_i = A_i I_i^0 + \sum_{j=1}^n A_j \cdot F_{j,i} \cdot \rho_j \cdot I_j \quad (4)$$

A_i aire de la face i , ρ_j son coefficient de réflexion, $F_{j,i}$ facteur de vue et n le nombre de surfaces de la véranda. Il est composé du rayonnement I_i^0 (direct et diffus) reçu de l'extérieur et du rayonnement réfléchi par les autres

surfaces. Comme les réflexions multiples à l'intérieur de la véranda sont supposées diffuses, I_i^0 aura pour expression :

$$I_i^0 = \frac{1}{A_i} (1 - Chs_i) \cdot \sum_{k=1}^N A_k \cdot F_{k,i} \cdot \tau_{d,k} \cdot I_{d,k} + \sum_{k=1}^N \text{projection}(A_k \cdot \tau_{b,k} I_{b,k}) \quad (5)$$

Où $\tau_{d,k}$ est le coefficient de transmission du rayonnement diffus, $\tau_{b,k}$ le coefficient de transmission du rayonnement direct, $I_{d,k}$ l'intensité du rayonnement diffus incident (W/m^2), $I_{b,k}$ l'intensité du rayonnement diffus incident (W/m^2), Chs_i la proportion de châssis (profils) d'une face vitrée i , A_k son aire et $F_{k,i}$ le facteur de vue de la face i avec les autres surfaces de la véranda.

Flux nets radiatifs

Ils sont calculés par la méthode de Gebhart [1]. Chaque surface est considérée isotherme, grise et lambertienne. Les coefficients de Gebhart[1] sont mis sous la forme matricielle suivante :

$$G_{ir} = (I - F \rho_{ir})^{-1} \cdot F \cdot \varepsilon_{ir} \quad (6)$$

ρ_{ir} est la matrice diagonale des coefficients de réflexion hémisphérique, ε_{ir} la matrice diagonale des émissivités, I la matrice unité et F la matrice des facteurs d'angle calculés par la librairie View3D[8]. Soit la matrice auxiliaire G_{ir}^* définie par :

$$G_{ir}^* = (I - G_{ir}^T) \cdot A \cdot \varepsilon \cdot \sigma \quad (7)$$

G_{ir}^T est la transposée de G_{ir} , I la matrice unité, ε la matrice diagonale des émissivités et σ la constante de Stefan-Boltzmann. Le vecteur flux net Q_{ir} de rayonnement infrarouge d'une face intérieure i de la véranda est égal alors à :

$$Q_{ir} = G_{ir}^* T^4 \quad (8)$$

Où T^4 est le vecteur des quatrièmes puissances des températures des faces intérieures de la véranda.

Modèle convectif

Pour évaluer les échanges convectifs dans la véranda nous utilisons un modèle zonal. Il permet le traitement des grands volumes et l'estimation du confort thermique avec un temps de calcul raisonnable.

Principe

Les hypothèses de base du modèle zonal sont :

1. au sein de chaque cellule, les variables d'état du fluide (température, masse volumique) sont uniformes à tout instant.
2. à chaque cellule, correspondent des équations de bilan de masse, d'énergie et d'état du fluide.

Échanges entre cellules

Le calcul du débit se base sur le théorème de Bernoulli généralisé [9] entre deux points dans le cas d'une conduite cylindrique de section S:

$$q_m = P_r \cdot \rho (\Delta P)^n S \quad (9)$$

Où q_m est le débit massique entre deux cellules adjacentes ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$), ΔP leur différence de pression ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$), ρ la masse volumique de la cellule d'origine ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), P_r le coefficient de perméabilité ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-n}$), n un exposant déterminé expérimentalement et représentant l'allure de l'écoulement et S la section d'une conduite cylindrique. Des valeurs de 0,5 pour P_r et n donnent de bons résultats [10]. Le flux de chaleur entrant dans une cellule est directement déduit du débit :

$$\Phi = q_m \cdot C_p \cdot (T - T_0) \quad (10)$$

Où Φ est le flux de chaleur entrant dans une zone (W), q_m le débit d'air traversant la frontière (kg/s), C_p la chaleur spécifique ($\text{J}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$), T la température de la cellule ($^\circ\text{C}$), T_0 la température de référence ($^\circ\text{C}$).

Équations du modèle

Pour chaque cellule, sont définies:

1. l'équation de conservation de la masse :

$$\sum q_m = 0 \text{ en } \text{kg}/\text{s} \quad (11)$$

2. l'équation de conservation de la chaleur :

$$\sum \Phi_e - \sum \Phi_s + \Phi_{source} - \Phi_{puits} = 0 \text{ en } W \quad (12)$$

Φ_e et Φ_s sont les flux entrant et traversant les interfaces de la cellule. Φ_{source} et Φ_{puits} sont les flux de chaleur cédés ou absorbés.

3. l'équation du gaz parfait, reliant la pression et la masse volumique.

$$P = \rho \cdot \frac{r}{m} \cdot T \quad (13)$$

4. l'équation de pression, en supposant les chutes de pression hydrostatiques :

$$P(z) = P_0 - \rho \cdot g \cdot z, z(m) \quad (14)$$

Modélisation des frontières verticales

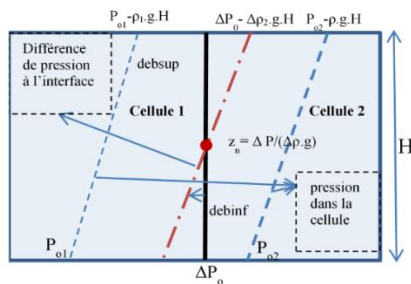


Figure 7 : Débit d'air à travers une frontière verticale

Le point neutre z_n est tel que les pressions de part et d'autre de l'interface sont égales. ΔP_0 représente la différence de pression à $z=0$. z_n permet de distinguer les débits supérieur et inférieur mentionnés sur la figure 7.

$$z_n = \frac{\Delta P_0}{\Delta \rho g} \quad (15)$$

Ces débits sont calculés en intégrant l'équation (8) sur l'axe vertical :

$$q_m = \int_0^H P_r \cdot l \cdot \rho \cdot (\Delta P)^n \cdot dz \quad (16)$$

$$\Delta P = \Delta P_0 - \Delta \rho g z, \Delta P_0 = z_n \Delta \rho g \quad (17)$$

D'où:

$$q_m = \int_0^H P_r \cdot l \cdot \rho \cdot (\Delta \rho g (z_n - z))^n \cdot dz \quad (18)$$

$$\text{Avec : } (z)^n = -|z|^n \text{ si } z \leq 0 \quad (19)$$

En intégrant l'équation (15), le débit horizontal peut être décomposé en 2 parties :

Intégration de z_n à H :

$$debsup = P_r \cdot l \cdot \rho \cdot (\Delta \rho g)^n \frac{(z_n - H)^{n+1}}{n+1} \quad (20)$$

Intégration de 0 à z_n :

$$debinf = P_r \cdot l \cdot \rho \cdot (\Delta \rho g)^n \frac{-(z_n)^{n+1}}{n+1} \quad (21)$$

Modélisation des frontières horizontales

L'écoulement est lié à la différence de pression de part et d'autre de l'interface horizontale $\Delta P = (P_{inf} - P_{sup})$. Les pressions P_{sup} et P_{inf} sont calculées au centre des cellules. Les équations décrivant l'écoulement à travers une interface horizontale de surface S sont donc:

$$debver = Pr \cdot \rho \cdot (\Delta P)^n \cdot S \quad (22)$$

$$\text{flux vertical} = debver \cdot C_p \cdot T \quad (23)$$

Debver est le débit vertical à la frontière.

Conditions aux limites

Une paroi est modélisée par une condition de Newton linéaire. Le flux de chaleur Φ_{cv} échangé par convection:

$$\Phi_{cv} = h_{cv} \cdot \Delta T \cdot S \quad (24)$$

h_{cv} est le coefficient de transfert de chaleur ($\text{W}/\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$), ΔT ($^\circ\text{C}$) est la différence de température entre l'air de la zone et S (m^2) la surface intérieure de la paroi.

Coefficients de convection

Pour évaluer les coefficients de convection à l'intérieur de la véranda nous avons utilisé des corrélations recommandées par [11].

Modèle conductif

Pour calculer le transfert de chaleur par conduction à travers les parois la véranda nous avons supposé un flux de chaleur unidimensionnel. Nous avons supposé aussi

que les couches de verre sont opaques au rayonnement infrarouge, isothermes et suffisamment minces pour négliger leurs termes capacitifs.

RÉSULTATS

Données météorologiques

Le simulateur nécessite des données météorologiques relatives à l'évolution du contexte extérieur de la véranda. Pour ce faire, nous avons utilisé les données horaires d'une année moyenne (températures, albédo, luminosité...) relevées dans la localité d'Uccle (Belgique) à partir du logiciel TRNSYS [12].

Véranda expérimentale

Pour valider le simulateur, une véranda expérimentale a été imaginée et construite. Ses dimensions (figure 8) sont de 4.8 m de largeur, 3.15 m de profondeur et une hauteur qui varie entre 2.2 et 2.8 m. Un système de relevé automatique récupère les mesures de température d'une centaine de capteurs disposés dans la véranda ainsi qu'à l'extérieur et à l'intérieur du bâtiment d'appui. Des capteurs de pluviosité, de direction et de vitesse du vent sont aussi pris en compte. Les actionneurs de la véranda sont les commandes de chauffage, de climatisation et de déroulement d'un store extérieur, situé au-dessus de la toiture vitrée.



Figure 8 : Véranda expérimentale

Simulation

Temps de calcul

L'objectif de cette librairie est de pouvoir estimer dans un temps raisonnable (quelques minutes tout au plus) les conditions d'utilisation *a priori* de n'importe quelle véranda, définie et conçue en présence des clients finaux.

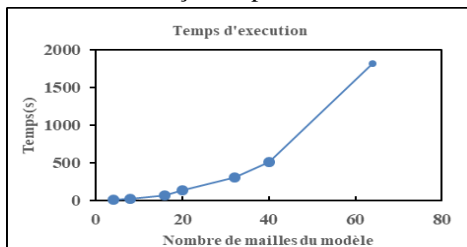


Figure 9 : Maillage-temps de calcul

L'évolution du temps de calcul dépend essentiellement de la finesse géométrique du modèle (nombre de cellules). L'augmentation du nombre de cellules suit approximativement une tendance exponentielle (figure 9). Pour atteindre un temps de réponse acceptable, il nous a fallu d'une part drastiquement optimiser les algorithmes de calcul (réécriture en C++, optimisation du

code source, alternatives optimisées de bibliothèques mathématiques ...) et d'autre part, accepter de dégrader la précision du modèle pour atteindre un compromis raisonnable entre temps de calcul et précision.

Température moyenne de la véranda

L'étude détaillée des données estimées révèle que les températures moyennes de la véranda (figures 10 et 11) sont effectivement supérieures aux températures extérieures (courbes bleues).

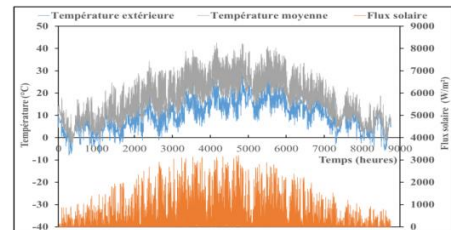


Figure 10 : Température moyenne de la véranda, température extérieure et flux solaire

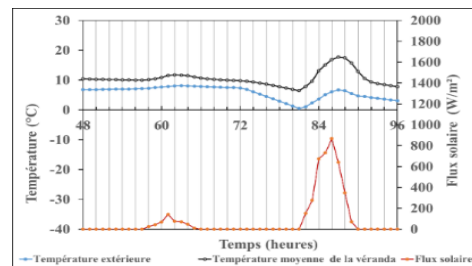


Figure 11 : Détail des températures et flux solaires sur 2 jours

La courbe de la figure 11 montre la variation de la température de la véranda lorsque les apports en flux solaires directs et diffus varient de façon significative. Le déphasage entre les variations de flux solaire, température moyenne, de l'ordre d'une demi-heure, illustre l'inertie thermique de la véranda.

Les deux courbes présentent des comportements similaires en terme de période, de déphasage et de valeur moyenne. Cette similitude se confirme sur l'année entière (figure 10) et nous conforte sur la justesse des hypothèses de base du simulateur.

Validation

La figure 12 montre les profils de températures moyennes de la véranda mesurées et estimées par le simulateur sur une période de 7 jours (du 21 au 27 février 2016). Les courbes de la figure 12 font apparaître des décalages aux niveaux des températures nocturnes, ce qui s'explique principalement par le fait que le site de la véranda expérimentale est éloigné de 65 km de Uccle (la localité de référence météorologique la plus proche) et que les données utilisées sont des données d'une année de référence et non pas des données mesurées sur site. En outre, il est possible que les couvertures nuageuses nocturnes soient différentes à ces dates de relevé.

Ces écarts ponctuels ne sont pas rédhibitoires pour notre problématique où il s'agit de déterminer le comportement thermique d'une véranda en vue d'en déterminer sa performance énergétique sur une année moyenne.

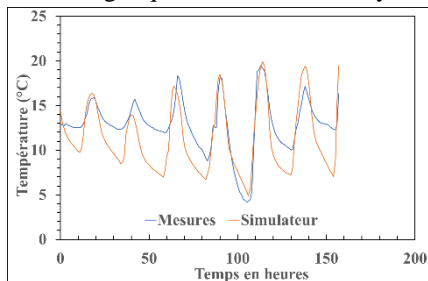


Figure 12 : Comparaison : températures mesurées- températures calculées sur 7 jours

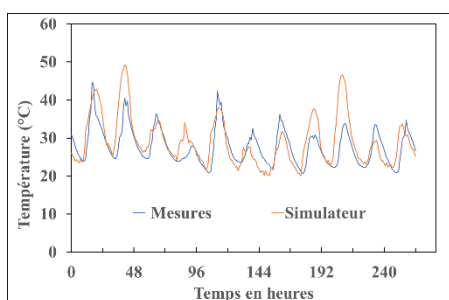


Figure 13: Température en un point de la véranda

La figure 13 montre la moyenne des températures mesurées situés au point de coordonnées $x=2.1$ $y=3m$, $z=2.1$ et les températures calculées au niveau d'une maille centrée autour de ce point. Ces mesures correspondent à une période allant de 19/7/2016 jusqu'au 31/7/2016. Si les estimations du simulateur restent globalement acceptables, les deux courbes de températures font apparaître des décalages au niveau des températures diurnes. Il est possible que le fait d'avoir négligé l'effet d'ombrage du bâtiment auquel est adossé la véranda et les obstacles qui l'entourent soit à l'origine des surestimations du simulateur.

CONCLUSION

Cet article décrit les étapes de développement d'un simulateur de comportement thermique des vérandas reposant sur le concept de zones thermiques à température homogène. Il comporte une modélisation géométrique (discrétisation des volumes en cellules), un modèle radiatif (rayonnements solaires directs, diffus et réfléchis, facteurs d'angle, méthode de Gebhart...), un modèle convectif et un modèle conductif. Des relevés météorologiques représentant une année de mesure moyenne ont été utilisés par les différents modèles du simulateur pour calculer l'évolution du champ de températures de la véranda. La comparaison avec des mesures prélevées sur la véranda expérimentale montre la justesse des hypothèses adoptées et la cohérence des résultats fournis par le simulateur.

REMERCIEMENTS

Les auteurs de cet article tiennent à remercier tout particulièrement:

- le soutien financier de la Région Wallonne, au travers de son programme CWALITY de la DGO6.
- la société Cover Group (www.cover3d.com), leader des éditeurs de solutions logicielles de conception de menuiseries, et l'ensemble de ses collaborateurs.

RÉFÉRENCES

- [1] Gebhart, B.: Surface Temperature Calculations in Radiant Surroundings of Arbitrary Complexity for Gray, Diffuse Radiation. Intern. J. Heat Mass Transfer 3, 341/346, 1961.
- [2] J. Fernandez, L. Canovas, B. Pelegrin, "Algorithms for the decomposition of a polygon into convex polygons", European Journal of Operational Research 121, 330±342, 2000.
- [3] Catmull E., Clark J. "Recursively generated b-spline surfaces on arbitrary topological meshes" Computer-Aided Design. Vol. 10, Num. 6, 350 –355, 1978.
- [4] Loop.C. "Smooth Subdivision Surfaces Based on Triangles". Department of mathematics, University of Utah, USA, 1987.
- [5] Emerson G. Melo, Marcelo P. Almeida, Roberto Zilles, Jose A.B. Grimoni, "Using a shading matrix to estimate the shading factor and the irradiation in a three-dimensional model of a receiving surface in an urban environment". Solar Energy 92, 15–25, 2013.
- [6] Liu, B. Y. H., et Jordan, R. C. « Daily insolation on surfaces tilted towards the equator ». *ASHRAE Journal*, 3, 53-59, 1962.
- [7] Perez, R., Ineichen, P., et Seals, R. « Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance ». *Solar Energy*, 44(5), 271-289, 1990.
- [8] Walton, G. N.: "Calculation of obstructed view factors by adaptive integration", Technical Report NISTIR-6925, National Institute of standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2002.
- [9] K. Limam, C. Inard, et F. Allard. Etude expérimentale des transferts de masse et de chaleur à travers les grandes ouvertures verticales. In *Ventilation et renouvellement d'air*, Lyon, mars 1991. GEVRA.
- [10] E. Rodriguez et I. Cáceres. Draft proposal for a stratification predictive model. Rapport technique, Commission of the European Communities, janvier 1993.
- [11] EnergyPlus, "The Reference to EnergyPlus Calculations". September 25, 2014.
- [12] TRNSYS 17 –meteonorm-weather data.