

Modélisation du confort thermique dans les espaces semi-ouverts

Fanny Devys-Peyre^{*1,3}, Edouard Walther², Christian Inard¹, Bruno Soulier³

¹ LaSIE UMR CNRS 7356, La Rochelle Université
Av. M. Crépeau, 17042 La Rochelle Cedex 1, France

² AREP

16 av. Ivry, 75013 Paris, France

³ Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, CNRS, LMT
Laboratoire de Mécanique et Technologie, 94235, Cachan, France

*fanny.peyre1@univ-lr.fr

RESUME. En raison de la variabilité temporelle et spatiale des conditions microclimatiques, l'évaluation du confort thermique dans les grands espaces ne peut se satisfaire d'une valeur unique par zone thermique. Dans cet article, une méthodologie de calcul spatial du confort thermique est présentée, suivie d'une application à la gare de Strasbourg. Les fluctuations spatiales des paramètres environnementaux affectant le confort sont prises en compte grâce à un enrichissement du calcul des flux solaire par le biais du logiciel Radiance. Les paramètres découlant des échanges radiatifs en courtes et grandes longueur d'ondes (températures radiante, températures de surface) sont évalués suivant le maillage imposé dans EnergyPlus et conduisent ainsi à une représentation du confort sous forme de cartographie.

MOTS-CLÉS. Confort thermique, rayonnement, cartographie

ABSTRACT. Owing to the temporal and spatial variability of microclimatic conditions, thermal comfort assessment in large spaces cannot be computed with a single value per zone. The present paper focuses on a new methodology for spatial thermal comfort calculation, subsequently applied to the Strasbourg train station. Spatial fluctuations of environmental parameters affecting comfort are taken into account thanks to an enhancement of the calculation of solar fluxes with the Radiance software. The resulting parameters from radiative exchanges in short and long wavelengths (radiant temperatures, surface temperatures) are evaluated according to the EnergyPlus grid mesh and thus lead to a thermal comfort mapping.

KEYWORDS. Thermal comfort, radiant heat transfer, comfort map

1 INTRODUCTION

Dans le domaine de la simulation thermique dynamique (STD), l'évaluation du confort thermique est souvent limitée par les logiciels usuels, d'une part à une valeur nodale par zone thermique, et d'autre part à des indices de confort peu adaptés aux fluctuations des conditions environnantes. Le choix des indices de confort s'est porté sur des modèles transitoires tenant compte des réactions thermophysiques du corps humain tels que la *Standard Effective Temperature* (SET^{*}) de Gagge et al. (1971) et la *Physiological Equivalent Temperature* (PET) de Höpfe (1999). Par ailleurs, la tendance dans la conception des gares contemporaines est tournée

vers l'utilisation d'une large proportion de surfaces vitrées à l'instar des projets du pôle multimodal de Rennes ou de la gare de Chambéry Challes-les-Eaux. Plusieurs études ont mis en évidence une large contribution de la température radiante au confort thermique (Spagnolo et De Dear (2003); Höppe (2002)). Dans des espaces présentant un fort taux de vitrages et par extension des niveaux d'ensoleillement potentiellement élevés, il est donc essentiel d'être en mesure de proposer une évaluation spatiale et temporelle précise des flux solaires.

2 MÉTHODOLOGIE POUR UN CALCUL SPATIAL DES INDICES DE CONFORT

Dans cette section, on présente la méthode utilisée pour calculer les composantes de courtes et grandes longueurs d'onde du rayonnement.

2.1 DESCRIPTION GÉNÉRALE DE L'OUTIL NUMÉRIQUE

En partant du moteur de calcul libre *EnergyPlus*, il est possible d'affiner la modélisation de la répartition intérieure des flux solaires ou les échanges infra-rouges. Afin de pallier aux insuffisances de l'outil en matière de distribution intérieure des flux solaires (ce point sera développé plus loin), celle-ci est précalculée avec un l'outil *Radiance*. Il est ensuite possible d'imposer les flux sur les surfaces intérieures. De même, afin d'évaluer l'influence du modèle choisi pour les échanges en grande longueur d'onde, on choisit de fournir à *EnergyPlus* la liste des facteurs de forme entre les surfaces intérieures.

L'outil numérique mis en place présenté en figure 1 s'appuie ainsi entièrement sur des logiciels libres : *GMSH* pour le maillage du sol de la zone d'intérêt, *EnergyPlus* pour la STD et le calcul des températures de surfaces et *Radiance* pour le calcul des composantes radiatives. Le couplage avec ce dernier est facilité grâce à la librairie Python *lbt-honeybee* développée par Ladybug Tools. Les étapes 2 et 3 peuvent être menées en parallèle.

Techniquement, pour intégrer le calcul des flux solaires de *Radiance* dans la STD, ceux-ci sont ajoutés dans l'objet `SurfaceProperty:SolarIncidentInside`. Les calculs des températures radiantes sont effectués en post-traitement de même que le calcul des indicateurs de confort, en l'occurrence, la SET de Gagge et al. (1971) et la correction de la PET proposée par Walther et Goestchel (2018) .¹

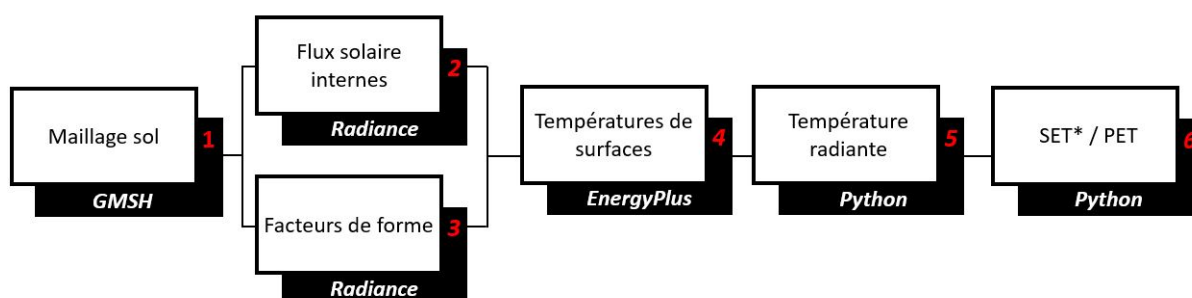


FIGURE 1. Architecture de l'outil numérique développé.

2.2 ENRICHISSEMENT DU CALCUL DES FLUX RADIATIFS D'ENERGYPLUS

2.2.1 FLUX DE GRANDE LONGUEUR D'ONDE

Dans *EnergyPlus*, le calcul des échanges radiatifs en grandes longueur d'onde tient compte des interreflexions entre les surfaces de la zone thermique, ces dernières étant considérées comme des surfaces grises. Ce calcul est basé sur le concept *ScriptF* développé par Hottel et Sarofim

1. Les routines de la SET* et de la PET sont disponibles sur le site d'AREP <https://lhypercube.arep.fr/>

(1967) qui consiste à calculer la matrice des coefficients d'échange entre les surfaces en tenant compte à la fois des échanges directs et des réflexions entre les parois. Les facteurs de forme interviennent dans le cadre des échanges radiatifs directs mais leur détermination est très coûteuse en temps de calcul et dans le cadre de géométries complexes il est impossible de recourir à des expressions analytiques. Le logiciel effectue donc un calcul approximatif : entre deux surfaces 1 et 2, le facteur de forme $F_{1,2}$ est défini comme le rapport de l'aire de la surface 2 sur la somme des aires de la scène "vues" par la surface 1.

EnergyPlus offre la possibilité de calculer la température radiante moyenne (T_{rm}) en tenant compte de la localisation d'un individu dans la zone thermique selon l'équation (1) à condition d'importer dans le logiciel la liste des facteurs de forme associée à l'emplacement de la personne.

$$T_{rm} = \sum_{j=1}^N F_{ind,j} T_j \quad (1)$$

Certaines limitations à cette option peuvent être observées. Premièrement, la géométrie de l'individu est assimilée à un point et non à une forme représentative de celle du corps humain (qui ne pourrait pas être intégrée dans le fichier de définition du modèle thermique). Deuxièmement, il n'est possible de renseigner qu'une seule localisation par STD pour la zone thermique et par conséquent, seulement une valeur de T_{rm} peut être récupérée en sortie de simulation, ce qui est limitant dans notre cas.

La méthode implémentée dans *Radiance* pour la détermination des facteurs de forme est celle du tir de rayons, inspirée de la méthode de Monte-Carlo appliquée en transfert radiatif et présentée dans Hoff et Janni (1989). Une surface i émet une certaine quantité d'énergie sous forme de rayonnement, répartie selon N rayons transportant tous la même quantité d'énergie. $F_{i,j}$ peut alors être défini comme le rapport du nombre de rayons atteignant la surface réceptrice j sur le nombre total de rayons émis par la surface émettrice i . Une surface émettrice peut contenir plusieurs points de départ des rayons tirés aléatoirement selon une loi de distribution uniforme ou bien localisés au niveau des barycentres des mailles sous-jacentes. Les directions associées à chaque rayon sont pilotées par les angles φ et θ (azimut et inclinaison) tirés aléatoirement selon les probabilités P_φ et P_θ données en (2).

$$P_\varphi = \frac{\varphi}{2\pi}, \quad P_\theta = \sin^2\theta \quad (2)$$

Chaque surface de la scène devient tour à tour émettrice et émet par sa face arrière. Les surfaces réceptrices reçoivent par leur face avant (suivant la normale \vec{n}). La manipulation de l'exécutable `rfluxmtx` permettant le calcul des $F_{i,j}$ est présentée dans Sarith et Sabine (2019).

2.2.2 FLUX SOLAIRES

Le modèle de distribution solaire `FullInteriorAndExterior` d'*EnergyPlus* permet de calculer le flux solaire (de courte longueur d'onde - CLO) absorbé par chaque paroi opaque interne de la zone. Le rayonnement direct incident est obtenu par projection des rayons du soleil au travers des fenêtres extérieures grâce à un algorithme de tir de rayons. Une paroi peut donc être partiellement ensoleillée mais le flux sera réparti sur l'ensemble de l'objet lors du bilan thermique. Pour une surface de grandes dimensions, à moins d'être discrétisée plus finement, il est impossible de récupérer l'information sur la localisation de la tâche solaire. Le maillage avec *GMSH* est une première réponse à cette problématique, cependant le moteur de calcul d'*EnergyPlus* a montré ses limites dans la détermination de la distribution intérieure des flux solaires : il produit dans certains cas des répartitions erronées comme le montre la Figure 2.

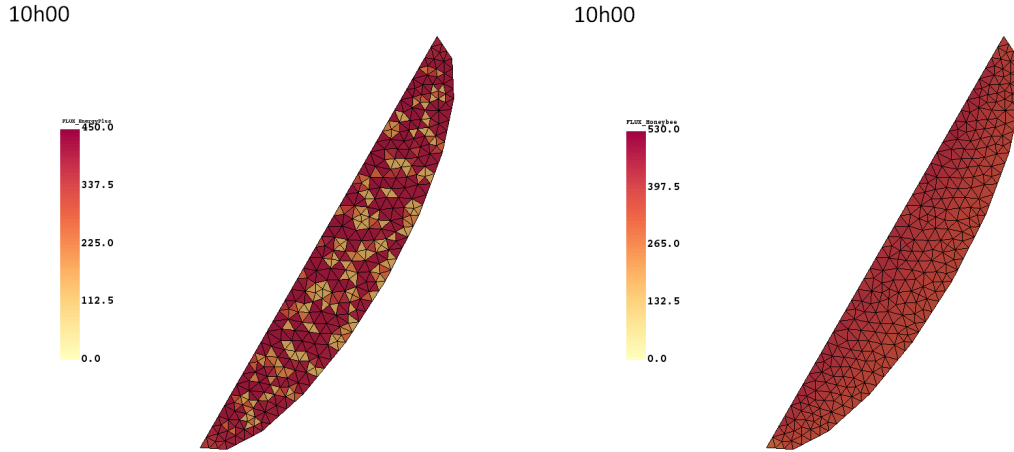


FIGURE 2. Limites de l’outil *EnergyPlus* pour la détermination de la distribution intérieure des flux solaires (Journée du 15/07, 10h du matin avec *EnergyPlus* à gauche et *Radiance* à droite)

Les moteurs de calcul d’*EnergyPlus* et de *Radiance* utilisent le modèle de ciel de Perez et les données d’entrée sont fournies dans le fichier météo (rayonnement direct en incidence normale et rayonnement diffus sur un plan horizontal). Par défaut, *EnergyPlus* effectue le calcul des ombrages, à partir d’une moyenne de la position angulaire journalière du soleil sur une période de 20 jours. Cette valeur peut être abaissée, entraînant une augmentation du temps de calcul sans différence sensible sur les valeurs des flux solaires.

Une évaluation des flux plus précise et diminuée d’un facteur deux en temps peut être conduite avec l’exécutable *gendaylit* de *Radiance*. Les flux sont calculés au niveau des points situés aux barycentres des éléments de surfaces et injectés ensuite comme données d’entrée dans *EnergyPlus*, au niveau de l’objet `SurfaceProperty:SolarIncidentInside`. De même pour un individu représenté sous forme d’un cylindre à base octogonale, le flux solaire est calculé au centre de chaque facette de la géométrie du corps humain.

2.3 CALCUL DE LA T_{mr} SPATIALE

La température radiante moyenne peut être définie comme la température d’un individu échangeant avec son environnement uniquement par rayonnement et permettant d’assurer un bilan radiatif neutre par résolution de l’équation (3). En représentant l’environnement comme une enceinte fictive dont les parois sont assimilées à des corps noirs ($\varepsilon_j = 1$) et en considérant le corps humain comme un corps gris ($\varepsilon_{ind} = \alpha_{GLO} = 0,9$), il en résulte l’expression de la T_{rm} donnée par l’équation (4).

$$S_{ind} \sigma \varepsilon_{ind} T_{rm}^4 - \alpha_{GLO} \sum_{j=1}^N \sigma \varepsilon_j F_{j,ind} T_j^4 S_j - \alpha_{CLO} \varphi_{sol} f_p S_{ind} = 0 \quad (3)$$

$$T_{rm} = \sqrt[4]{\sum_{j=1}^N F_{ind,j} T_j^4 + \frac{\alpha_{CLO} \varphi_{sol} f_p}{\sigma \varepsilon_{ind}}} \quad (4)$$

Dans cette équation (3), on utilise le facteur de projection f_p issu de Helbig et al. (2013), qui permet de convertir un flux au sol en un flux reçu sur un cylindre. La méthode est particulièrement adaptée au cas de figure présent où les indicateurs de confort sélectionnés sont basés sur un modèle thermophysique du corps humain modélisé par deux cylindres concentriques.

Pour tenir compte de la position de l'individu sans ajouter sa géométrie dans le modèle, les $F_{ind,j}$ pourraient être calculés de surface à surface avec comme surface émettrice la maille au sol où se tient la personne. Cette méthode introduirait cependant un biais important dans l'évaluation de la T_{mr} : d'après le calcul des $F_{ind,j}$, un individu ne verrait alors pas les autres mailles au sol y compris celles dans un périmètre proche. Par conséquent, les températures de surface du sol n'apporteraient aucune contribution à la T_{mr} alors que le facteur de forme du sol vers l'individu pèse pour une part non-négligeable des échanges.

Pour modéliser la géométrie d'un corps humain tout en limitant sa complexité, le choix s'est porté sur un cylindre à base octogonale dont l'aire est équivalente à la surface corporelle issue de la formule de Du Bois. En tenant compte de cette géométrie, le bilan radiatif en (5) conduit à une nouvelle expression en (6) qui est celle implémentée dans l'outil numérique.

$$S_{ind} \sigma \varepsilon_{ind} T_{rm}^4 = \alpha_{GLO} \sum_{k=1}^9 \sum_{j=1}^N \sigma \varepsilon_j F_{j,k} S_j T_j^4 + \alpha_{CLO} \sum_{k=1}^9 \varphi_{sol,k} S_k \quad (5)$$

$$T_{rm} = \sqrt[4]{\frac{1}{S_{ind}} \left[\sum_{k=1}^9 \sum_{j=1}^N F_{k,j} S_k T_j^4 + \frac{\alpha_{CLO}}{\sigma \varepsilon_{ind}} \sum_{k=1}^9 \varphi_{sol,k} S_k \right]} \quad (6)$$

Où $S_{ind} = \sum_{k=1}^9 S_k$ est la somme des facettes de l'individu (octogone et surface au sommet).

2.4 ÉVALUATION ET REPRÉSENTATION DES INDICES DE CONFORT

Les cinq variables d'entrée nécessaires à l'évaluation des indices de confort sont la température d'air (T_{air}), la température radiante (T_{mr}), l'humidité relative (HR), la pression (P_{air}) et la vitesse d'air (v_{air}). En l'absence de couplage avec une étude de mécanique des fluides, l'information spatiale sur T_{air} et v_{air} ne peut être intégrée au modèle de confort. A l'exception de la T_{mr} et de la vitesse d'air fixée arbitrairement à $0,13 \text{ m.s}^{-1}$, les valeurs zonales issues de la STD sont conservées pour les autres variables.

Les échelles de sensation de confort associées aux valeurs de SET* et PET sont respectivement tirées de Auliciems et Szokolay (1997) et Matzarakis et Mayer (1996). Pour la SET*, la plage de neutralité thermique est comprise entre $22,2$ et $25,6$ °C et pour la PET elle est comprise entre 18 et 23 °C.

Afin de conserver à la fois l'information temporelle et spatiale sur l'indice de confort, l'*Outdoor Thermal Comfort Autonomy* (OTCA) introduit par Nazarian et al. (2019) a été retenu. Cet indicateur traduit, pour une période donnée, le pourcentage du temps pendant lequel les conditions environnantes conduisent à un état de neutralité thermique, pour l'indicateur de confort choisi. L'expression de l'OTCA est donnée en (7) où n représente le nombre d'heures simulées. Si les conditions de confort optimal sont respectées, TC_h vaut 1, 0 sinon.

$$OTCA = \frac{1}{n} \sum_{h=1}^n TC_h \quad (7)$$

3 APPLICATION AU HALL DE LA GARE DE STRASBOURG

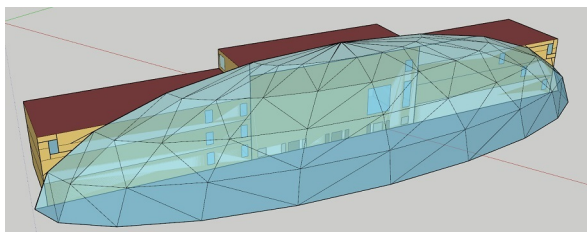
Dans cette section, on présente les résultats issus d'une étude complète de confort thermique dans un hall de gare réalisée avec l'outil numérique décrit en figure 1.

3.1 PRÉSENTATION DU CAS D'ÉTUDE

La gare de Strasbourg présentée en Figure 3 a été rénovée en 2007 avec l'arrivée du train à grande vitesse afin d'absorber le flux de voyageurs supplémentaire. Sa rénovation consistait en un agrandissement par le biais de la construction d'un atrium accolé à la gare historique. Le modèle de la gare en figure 4 comporte quatre zones thermiques. L'évaluation du confort est menée uniquement sur la nouvelle zone de l'atrium, d'un volume de 35000 m³ non conditionné, pour une superficie de 2245 m² et orientée sud-est.



FIGURE 3. Gare de Strasbourg

FIGURE 4. Modélisation sous *DesignBuilder*

3.2 COMPARAISON DES MÉTHODES DE CALCUL DE FLUX SOLAIRES

Pour une journée d'été fortement ensoleillée (15/07), on remarque qualitativement une disparité des flux sur la première cartographie de la figure 2. En effet, en analysant les résultats pour le pas de temps de 10h, un écart-type de 108 [W.m⁻²] pour *EnergyPlus* met en valeur une forte dispersion des résultats contre un écart-type de 22 [W.m⁻²] pour la cartographie de *Radiance*. Pour ce pas de temps, les moyennes spatiales sont respectivement de 317 [W.m⁻²] et 389 [W.m⁻²] et reflètent la tendance générale sur l'ensemble de l'année : les flux solaire obtenus avec *Radiance* sont plus élevés que ceux calculés avec *EnergyPlus*.

En intégrant dans la STD les flux solaire calculés en amont comme suggéré dans la partie 2.1, les valeurs de flux récupérées en sortie du bloc n° 4 auraient dû être identiques à celles en entrée. Or, on constate des résultats anormalement élevés pour les flux ainsi que pour les températures de surface (écart de l'ordre de 20 °C). Il est donc préconisé d'intégrer directement le calcul des flux solaire avec *Radiance* dans celui de la T_{mr} . Néanmoins, l'ajout des facteurs de forme dans la STD contribue au bilan thermique des parois (en particulier dans la répartition des flux diffus) et tend à rétablir un bon ordre de grandeur pour les températures de surface et les flux solaire intérieurs.

3.3 CALCUL DES INDICES DE CONFORT

La Figure 5 montre les niveaux de confort obtenus avec les deux indicateurs, tracés avec le même nombre de catégories de sensation (plages colorées). On peut analyser les résultats à partir des observations suivantes :

- Les tendances des deux indicateurs sont les mêmes pour les valeurs extrêmes d'inconfort chaud.
- En hiver, l'inconfort calculé par la SET* est plus marqué, la plage de ressenti le plus froid atteignant jusqu'à ~ 25% du temps en décembre.
- La PET est plus restrictive en matière de confort estival : sur la saison d'été le pourcentage du temps dans la plage de neutralité thermique est nul tandis que pour la SET* il avoisine les ~ 10%.

Nota bene : Ces résultats peuvent sembler "mauvais" en matière de confort pour un tel espace : nous avons pris le parti ici de ne pas mettre en oeuvre de climatisation ni de chauffage dans

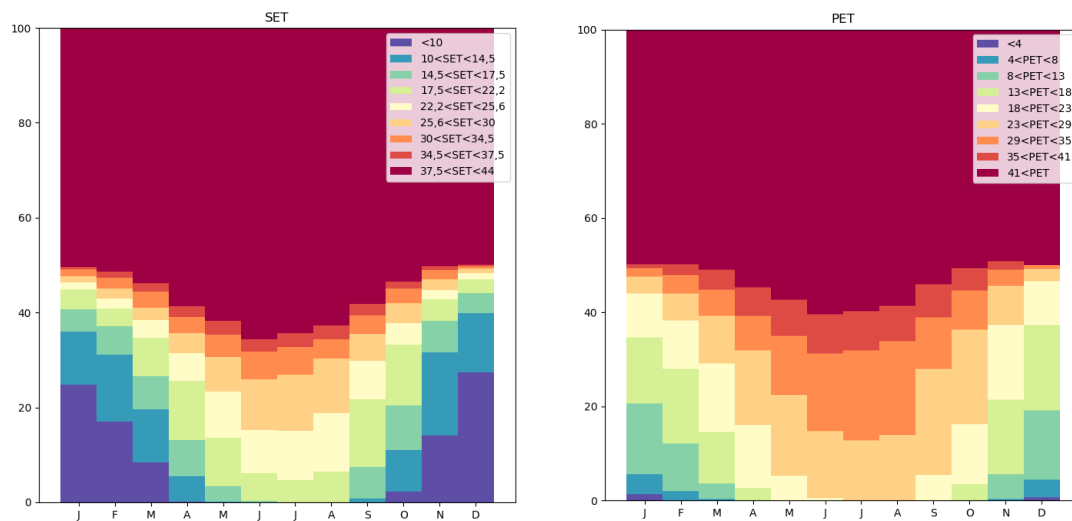


FIGURE 5. Répartition mensuelle des plages de confort pour la SET* (gauche) et pour la PET (droite)

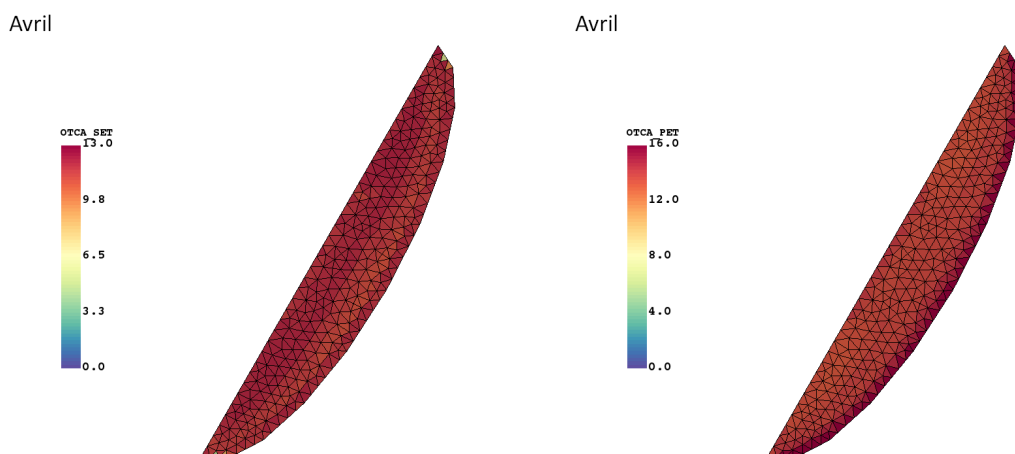


FIGURE 6. OTCA mensuelle en avril pour la SET (gauche) et la PET (droite)

le modèle (en réalité de tels dispositifs existent dans cette gare). La ventilation naturelle est également prise en compte de manière simplifiée, ce qui mène à des valeurs relativement faibles de renouvellement d'air et donc des températures élevées sous la verrière.

La Figure 6 donne l'évolution des valeurs mensuelles de l'OTCA pour les deux indicateurs de confort. Le pourcentage du temps pendant lequel les conditions optimales de confort sont rencontrées dans l'atrium est relativement faible et ne dépasse jamais les 16%. Ce constat est valable dans le temps comme dans l'espace, ce qui pourrait conduire à penser que la méthode n'apporte pas d'information supplémentaire par rapport à l'approche nodale. Il faut cependant souligner que le cas d'étude ne présente pas de dispositifs d'ombrages ou de masques proches qui amèneraient à des variations localement plus marquées. L'ajout ultérieur des champs des vitesses à l'échelle horaire changera également la répartition des zones de confort.

4 CONCLUSION

Dans ce papier, une méthode originale d'enrichissement des valeurs "nodales" de la STD par l'amélioration de la détermination des flux radiatifs pour le calcul du confort a été proposée. Malgré des obstacles techniques à lever, l'implémentation de l'outil numérique a permis d'identifier certaines limitations dans *EnergyPlus* en terme de calcul de facteur de forme, de distribution solaire ou de T_{mr} . De manière intéressante, les résultats obtenus pour la SET* et la PET donnent des tendances similaires pour les catégories extrêmes d'inconfort chaud. Cependant, en raison de leur échelle de sensation de confort, le pourcentage du temps dans la plage confortable est très différent. En effet, celle-ci est très resserrée pour la SET*, les deux indicateurs ne sont donc pas équivalents pour l'analyse du confort. Enfin, le niveau de détail proposé en terme d'évaluation de confort spatial sera certainement pertinent dans des conditions climatiques moins homogènes que dans le cas présent. Les perspectives consistent à intégrer les champs de vitesse d'air afin d'analyser l'influence de ce paramètre sur la répartition mensuelle des plages de confort et la répartition spatiale de l'OTCA. Le rayonnement représente une partie des phénomènes physiques en jeu dans les grands volumes, aussi afin d'améliorer la prédiction de leur comportement d'autres travaux dans la même entité portent en parallèle sur la modélisation aéraulique.

RÉFÉRENCES

- Auliciems, A. et Szokolay, S. V. (1997). Thermal comfort. PLEA sl.
- Gagge, A., Stolwijk, J., et Nishi, Y. (1971). An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. *ASHRAE Transactions*, 77 :21–36.
- Helbig, A., Baumüller, J., et Kerschgens, M. J. (2013). *Stadtklima und Luftreinhaltung*. Springer-Verlag.
- Hoff, S. et Janni, K. A. (1989). Monte carlo technique for the determination of thermal radiation shape factors. *Transactions of the ASAE*, 32(3) :1023–1028.
- Höppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43 :71–75.
- Höppe, P. (2002). Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. *Energy and buildings*, 34(6) :661–665.
- Hottel, H. C. et Sarofim, A. F. (1967). *Radiative transfer*. McGraw-Hill Book Company, New York.
- Matzarakis, A. et Mayer, H. (1996). Another kind of environmental stress : thermal stress. *WHO newsletter*, 18(January 1996) :7–10.
- Nazarian, N., Acero, J. A., et Norford, L. (2019). Outdoor thermal comfort autonomy : Performance metrics for climate-conscious urban design. *Building and Environment*, 155 :145–160.
- Sarith, S. et Sabine, H. (2019). A critical evaluation of radiance as a tool for calculating radiation view factors. In *16th IBPSA International Conference - Rome*.
- Spagnolo, J. et De Dear, R. (2003). A human thermal climatology of subtropical sydney. *International Journal of Climatology : A Journal of the Royal Meteorological Society*, 23(11) :1383–1395.
- Walther, E. et Goestchel, Q. (2018). The PET comfort index : Questioning the model. *Building and Environment*, 137 :1–10.