



**HAL**  
open science

# Contribution solaire au bilan thermique du corps humain : un modèle anisotropique simplifié

Edouard Walther, Mateusz Bogdan

► **To cite this version:**

Edouard Walther, Mateusz Bogdan. Contribution solaire au bilan thermique du corps humain : un modèle anisotropique simplifié. IBPSA France, La Rochelle, France, mai 2024, May 2024, La Rochelle, France. hal-04697038

**HAL Id: hal-04697038**

**<https://hal.science/hal-04697038>**

Submitted on 13 Sep 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Contribution solaire au bilan thermique du corps humain : un modèle anisotropique simplifié

Edouard Walther<sup>1,2\*</sup>, Mateusz Bogdan<sup>3</sup>

<sup>1</sup>INSA Strasbourg, Département Génie Thermique Énergétique et Environnement

24 Boulevard de la Victoire - 67000 Strasbourg

<sup>2</sup>Université de Strasbourg, INSA Strasbourg, CNRS, ICube Laboratory UMR 7357, Strasbourg, France

<sup>3</sup>AREP L'hypercube, 16 avenue d'Ivry 75013 Paris, France

\*[edouard.walther@insa-strasbourg.fr](mailto:edouard.walther@insa-strasbourg.fr)

*RÉSUMÉ.* Le calcul de la contribution solaire au bilan thermique dans les simulations numériques du confort extérieur est divisé en deux approches : soit avec une géométrie simplifiée et un flux solaire sans composante anisotrope, soit avec une géométrie plus complexe de l'humain et un calcul détaillé des flux composantes du flux solaire, utilisant par exemple un ciel paramétré. On se propose ici de développer une approche intermédiaire permettant une reconstitution analytique du flux total reçu par un individu à partir des flux direct et diffus horizontaux, tout en intégrant un modèle anisotrope de ciel diffus.

*MOTS-CLÉS.* flux solaire, individu

*ABSTRACT.* The solar contribution to the heat balance of the individual in numerical simulations of the outdoor climate is divided in two branches : either with a simplified geometry of the human being, or with a detailed computation of the solar flux, for instance with a parametrized sky model. The present work deals with an intermediate approach allowing to compute the direct and diffuse components of the solar flux in unobstructed configurations, integrating the anisotropy of the diffuse sun radiation.

*KEYWORDS.* solar flux, individual

## 1. INTRODUCTION

La contribution du rayonnement solaire au bilan thermique de l'humain en extérieur est significative. Le flux radiant  $S$  reçu par un individu est donné par la somme des flux solaire  $\phi$  et infrarouge  $E$  :

$$S = \alpha\phi + \varepsilon E \quad (1)$$

Diverses méthodes ont été développées pour caractériser le flux solaire reçu par un individu à partir de mesures en flux en extérieur. La difficulté vient de l'intégration des parties diffuses et directes du flux solaire. Une variété importante de modèles existe, cependant on peut les catégoriser de manière simplifiée à partir du modèle géométrique utilisé pour la prise en compte des flux directs et diffus :

- La contribution solaire directe est souvent calculée à partir d'un facteur de projection qui sert à représenter le flux reçu par un individu cylindrique en position debout.
- La contribution diffuse est calculée à partir d'une représentation parallélépipédique de l'individu, soit six faces sur lesquelles il s'agit de calculer ou mesurer les flux solaires diffus (cette méthode provient probablement de la méthode du dispositif expérimental

utilisé pour mesurer la température radiante (Holmer et al., 2015)). On notera par ailleurs que sur le plan de la simulation numérique de température radiante, les flux de grande longueur d'onde sont déterminés par la même méthode (Wallenberg et al., 2020).

En d'autres termes, l'individu est cylindrique vis-à-vis du rayonnement solaire direct et parallélépipédique vis-à-vis du rayonnement diffus et de grande longueur d'onde. L'objectif du présent travail est d'explorer la possibilité d'utiliser une même géométrie cylindrique pour la détermination des flux solaires direct et diffus sur un individu. Outre l'objectif de cohérence géométrique du modèle d'individu vis-à-vis des flux reçus et la démonstration du concept établi dans (Walther and Hamdani, 2018), trois objectifs sont recherchés :

- pour la physique du phénomène, la prise en compte de l'anisotropie du flux diffus qui engendre des différences importante soulignées dans (Wallenberg et al., 2020), qui relève un écart de température radiante compris entre  $-3$  [K] et  $+3$  [K] pour un ciel diffus isotrope ou anisotrope. Des conclusions similaires ont été obtenues par (Li et al., 2022).
- sur le plan numérique on cherche à éviter de calculer le facteur de forme de rayonnement des faces de l'individu avec le ciel (dans le cas du rayonnement solaire non obstrué). En effet, intégrer l'anisotropie du ciel diffus sur un parallélépipède suppose la discrétisation du ciel en plus d'une centaines de faces (Wallenberg et al., 2020).
- pour la simplicité de la méthode, on souhaite également reconstituer la contribution solaire à partir des flux direct et diffus horizontaux couramment disponibles dans les fichiers météorologiques.

Dans les paragraphes qui suivent, deux méthodes existantes qui serviront de comparaison avec le modèle développé sont présentées.

*Méthode du facteur de projection* – Cette méthode utilisée notamment par Fanger se base sur un facteur  $f_p$  défini comme le rapport la surface réellement exposée au soleil sur la surface du corps humain potentiellement exposée au rayonnement. On considère généralement que ce facteur correspond à celui d'un individu cylindrique (Matzarakis et al., 2010). Le facteur  $f_p$  est ainsi défini d'après une corrélation fonction de la hauteur solaire (Pickup et al., 2000) :

$$f_p = 0.42 \cos(h) + 0.043 \sin(h) \quad (2)$$

Il a été montré que le facteur  $f_p$  est pratiquement équivalent à l'intégrale de la surface projetée cylindrique (Walther and Hamdani, 2018) qui évolue avec la hauteur solaire.

Pour intégrer l'impact du flux solaire dans les modèles de confort, la notion de température radiante moyenne est couramment utilisée. Elle est définie par la température d'une surface qui émettrait le même flux que la somme des flux de grande et courte longueur d'onde. On peut la calculer à partir de la température radiante  $T_r$  issue des échanges de grande longueur d'onde et diffus, incrémentée de la contributions solaire directe normale incidente comme suit (Matzarakis et al., 2010) :

$$T_r^* = \sqrt[4]{T_r^4 + \frac{\alpha f_p \varphi_b}{\sigma \varepsilon}} \quad (3)$$

où  $\varphi_b$  est le flux direct normal incident.

*Méthode des 6 directions* – ce procédé expérimental introduit notamment par (Höppe, 1992) sert à déterminer la température radiante en extérieur à partir de six mesures : quatre mesures cardinales et deux plans face vers le haut et bas, pondérées par des coefficients représentant les contributions de chaque surface à l'échange radiatif (avec  $E_i$  l'éclairement infrarouge reçu par surface d'un parallélépipède et  $\varphi_i$  le flux solaire) :

$$T_r^* = \sqrt[4]{\frac{\sum_{i=1}^6 w_i (\alpha \varphi_i + \varepsilon E_i)}{\sigma \varepsilon}} \quad (4)$$

Avec  $w_i = 0.22$  pour les 4 parois cardinales et  $w_i = 0.06$  pour les faces hautes et basses.

Dans la section qui suit on présente le modèle analytique de reconstruction du flux diffus et direct sur l'individu, puis on valide ses résultats à partir d'un calcul numérique. Ensuite le modèle est comparé à deux techniques couramment utilisées dans la bibliographie expérimentale ou numérique. Une illustration sur un calcul de température radiante en milieu extérieur est proposée en ouverture.

## 2. FLUX SOLAIRES REÇUS

Il s'agit de déterminer la contribution des courtes longueurs d'onde à la température radiante à partir des flux direct et diffus reçus sur un plan horizontal. Pour ce faire, on se base sur un modèle géométrique cylindrique de l'humain aux propriétés de symétrie intéressantes et le modèle de rayonnement diffus de (Perez et al., 1990).

### 2.1. FLUX DIRECT $\varphi_b$

Dans la suite on définit comme plan azimutal le plan de normale colinéaire au rayonnement direct incident. Considérons un plan vertical passant par le milieu d'un cylindre soumis à un rayonnement direct et réfléchi tel que représenté sur la Figure 1 a). Le flux direct  $\varphi_b$  pour un azimut nul sur ce plan est donné en fonction du flux direct horizontal  $\varphi_b^h$ , de l'angle d'incidence  $i$  et de la hauteur solaire  $h$  par la relation :

$$\varphi_b = \varphi_b^h \frac{\cos(i)}{\sin(h)} \quad (5)$$

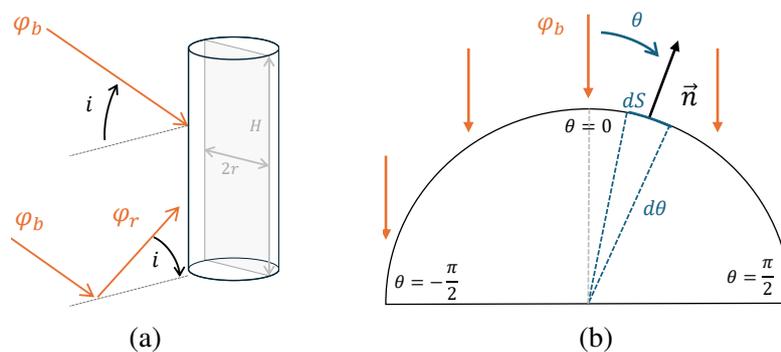


Figure 1 : a) Flux direct  $\varphi_b$  et réfléchi  $\varphi_r$  reçus sur un plan vertical azimutal passant par le centre du cylindre avec un angle d'incidence  $i$  et b) Vue en coupe – flux direct reçu sur la partie éclairée d'un cylindre et surface élémentaire exposée au rayonnement.

On sait également calculer le rayonnement incident sur un plan azimutal pour une hauteur solaire  $h$ . Soit  $\theta$  l'orientation du plan azimutal. Dans le repère lié au cylindre,  $\theta = 0$  et la face éclairée est dans  $\theta \in [-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}]$ . Le flux direct  $\phi_b$  reçu par la surface directement éclairée du cylindre de rayon  $r$  et de hauteur  $H$  peut se calculer à partir du flux incident  $\varphi_b$  avec l'intégrale

suivante, illustrée sur la Figure 1 b) :

$$\phi_b = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \varphi_b \cos(\theta) r H . d\theta = 2\varphi_b r H = S_p \varphi_b \text{ [W]} \quad (6)$$

Avec  $S_p = 2rH$  la surface projetée dans l'axe du rayonnement.

## 2.2. FLUX DIFFUS $\varphi_D$

Le modèle de rayonnement diffus utilisé est celui de (Perez et al., 1990). Il consiste à calculer les contributions du dôme céleste, de l'horizon, ainsi que du disque circumsolaire comme présenté sur la Figure 2 a).

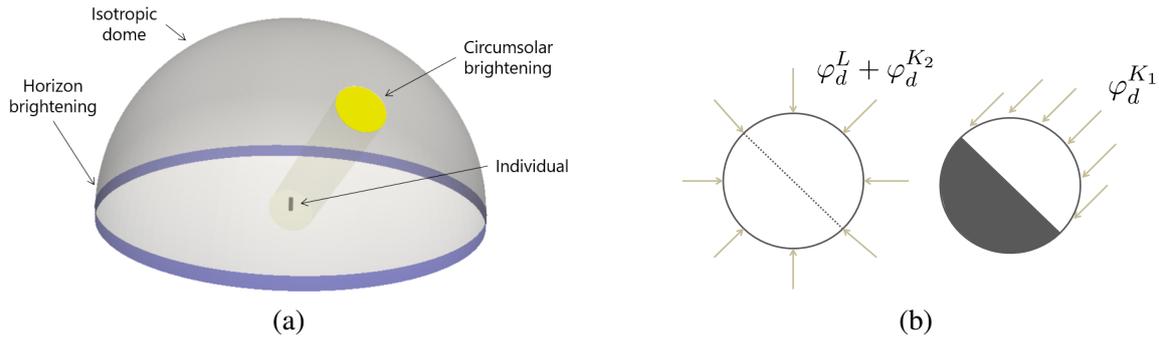


Figure 2 : a) Représentation du modèle diffus de Perez éclairant un individu cylindrique et b) Hypothèses d'isotropie et d'anisotropie pour les composantes diffuses du rayonnement.

Dans le modèle de Perez, le flux diffus  $\varphi_d$  sur un plan quelconque d'inclinaison  $\beta$  est donné à partir du flux diffus horizontal au sol  $\varphi_d^h$  :

$$\varphi_d = \varphi_d^h \left( (1 - K_1) F_{\text{sky}} + K_1 \frac{a}{b} + K_2 \sin(\beta) \right) \quad (7)$$

Les paramètres sont :

- $\beta$  est l'inclinaison de la surface réceptrice, soit dans notre cas  $\beta = \pi/2$ .
- $K_1$  et  $K_2$  sont des coefficients pondérant les densités de flux circumsolaire et de l'horizon, qui évoluent dans le temps en fonction de la hauteur solaire et la localisation (voir également les détails dans (Perez et al., 1987), (Perez et al., 1990))
- $a$  et  $b$  sont respectivement les cosinus des angles d'incidence et solaire zénithal.
- $F_{\text{sky}} = \frac{1+\cos(\beta)}{2}$  est le facteur de forme entre la surface et le ciel, en champ libre.

À partir de l'équation (7), on écrit le flux diffus comme la somme des contributions de l'horizon  $\varphi_d^L$ , de l'éclairement circumsolaire  $\varphi_d^{K_1}$  et de la voûte céleste  $\varphi_d^{K_2}$  :

$$\varphi_d = \varphi_d^L + \varphi_d^{K_1} + \varphi_d^{K_2} \quad (8)$$

$$\varphi_d^L = (1 - K_1) \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \quad (9)$$

$$\varphi_d^{K_1} = K_1 \frac{a}{b} \quad (10)$$

$$\varphi_d^{K_2} = K_2 \sin(\beta) \quad (11)$$

Pour tâcher d'améliorer la prise en compte du flux diffus, on pose les hypothèses suivantes, qui découlent directement du modèle de Perez, illustrées par la Figure 2 b) :

- Hypothèse d’isotropie : le cylindre est éclairé de manière diffuse sur toute sa surface par la voûte céleste (contribution  $(1 - K_1)$  dans l’équation (7)) et par l’horizon avec la contribution  $K_2$ .
- Hypothèse d’anisotropie : la contribution circumsolaire (contribution  $K_1$ ) ne s’applique qu’à une moitié éclairée du cylindre. Cette hypothèse a également été faite par (Li et al., 2022) qui applique en revanche un facteur de projection  $f_p$  au flux diffus en provenance du disque solaire, tandis qu’on calcule ici la contribution avec une intégrale simple – inspirée de l’Equation (6), comme expliqué ci-après.

Pour la contribution circumsolaire  $\varphi_d^{K_1}$ , le calcul intégral présenté dans l’équation (6) est réitéré. Le flux diffus total reçu met donc en jeu les surfaces  $S_p = 2rH$  et  $S_c = 2\pi rH$  :

$$\phi_d = 2rH\varphi_d^{K_1} + 2\pi rH \times (\varphi_d^L + \varphi_d^{K_2}) \quad (12)$$

$$= S_p\varphi_d^{K_1} + S_c(\varphi_d^L + \varphi_d^{K_2}) \quad (13)$$

On ne détaille pas ici le calcul de la composante réfléchi qui sera diffuse et isotrope.

### 2.3. VALIDATION DU MODÈLE DIFFUS ANISOTROPIQUE

Les calculs sont menés sur le fichier météorologique de la ville du Havre (2005) issu de la base de données *Meteonorm*. Les flux diffus et directs sont calculés avec *pvlib* qui se base sur le modèle de Perez pour le flux diffus (Holmgren et al., 2018). Il s’agit alors de calculer le flux total reçu par un cylindre en tenant compte des éléments précédents.

Afin de vérifier l’hypothèse selon laquelle la part anisotrope du flux diffus peut être répartie de la même manière que le flux direct sur le demi-cylindre face au soleil, une approximation de cylindre sous la forme d’un dodécagone est utilisée – voir Figure 3 a). Pour chaque facette d’orientation  $\theta_i \in [0, 2\pi]$ , on récupère les flux diffus et direct par incrément de  $\pi/12$  puis on les somme, à l’instar de l’équation présentée pour le flux direct :  $\phi_d = \sum_{\theta=1}^{12} S_i\varphi_d(\theta_i)$ .



Figure 3 : a) Géométrie du "cylindre" à douze faces et b) Géométrie pour la méthode des 6 directions.

Les résultats montrent une bonne concordance entre les flux calculés sur un cylindre discret et les flux analytiques. L’écart entre modèles est de l’ordre de quelques Watts, avec une RMSE inférieure à 1 [W/m<sup>2</sup>] pour chacun des flux. On obtient respectivement 0.18, 0.61 et 0.76 [W/m<sup>2</sup>] pour les flux direct, diffus et total (voir Tableau 1) ce qui valide l’hypothèse d’anisotropie représentée par l’Équation (13). Il est donc possible de prendre en compte l’anisotropie du ciel diffus à partir de la surface projetée exposée au rayonnement du disque solaire avec l’Équation (6).

### 3. COMPARAISON AVEC DEUX MÉTHODES EXISTANTES

On compare ici les flux solaires obtenus avec les deux méthodes présentées en introduction, pour le cas d’un individu en champ libre.

Flux	RMSE [W/m <sup>2</sup> ]
Direct $\varphi_b$	0.18
Diffus $\varphi_d$	0.61
Total $\varphi$	0.76

Tableau 1 : RMSE pour les différents flux calculé selon la méthode analytique proposée versus *pvlib* pour validation.

### 3.1. COMPARAISON AVEC LA MÉTHODE DU FACTEUR DE PROJECTION $F_P$

La valeur des flux directs reçus calculés par la méthode du  $f_p$  est légèrement plus élevée que celle de l'intégrale cylindrique, comme en témoigne la comparaison des modèles présentée ci-dessous. On notera que d'autres corrélations plus basses sont disponibles dans la littérature et peuvent expliquer cet écart. L'erreur augmente linéairement avec le flux comme l'indique le graphique de Bland-Altman. Les écarts peuvent aller jusqu'à 100 [W/m<sup>2</sup>] et la valeur de RMSE est de  $\sim 27$  [W/m<sup>2</sup>].

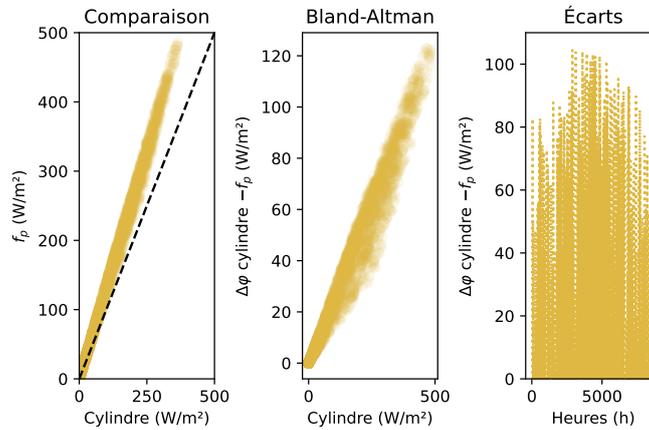


Figure 4 : Comparaison des flux directs pour la méthode proposée et la méthode  $f_p$  sur une année.

### 3.2. COMPARAISON AVEC LA TECHNIQUE DES SIX DIRECTIONS

On compare désormais avec la technique des 6 directions présentée en préambule de ces travaux. La géométrie est celle présentée sur la Figure 3 b). On observe sur la Figure 5 a) et b) des différences plus importantes entre le modèle cylindrique et celui à 6 directions, notamment avec des valeurs plus dispersées pour des flux élevés, cependant les résultats restent similaires. La concordance est meilleure pour le flux diffus que pour le flux direct, avec des écarts de l'ordre de  $\pm 5$  [W/m<sup>2</sup>]. Ainsi pour un effort calculatoire moindre, la reproduction du flux diffus est similaire à celle de la méthode des six directions.

La comparaison sur trois jours en saison hivernale et estivale est présentée sur les Figures 6 a) et b). On constate que les amplitudes et dynamiques des deux méthodes sont similaires. La méthode permet également de retrouver les ordres de grandeur de flux que dans la littérature expérimentale (Kántor et al., 2018) (Park and Tuller, 2011). Les maxima sont du même ordre de grandeur et interviennent à des instants proches.

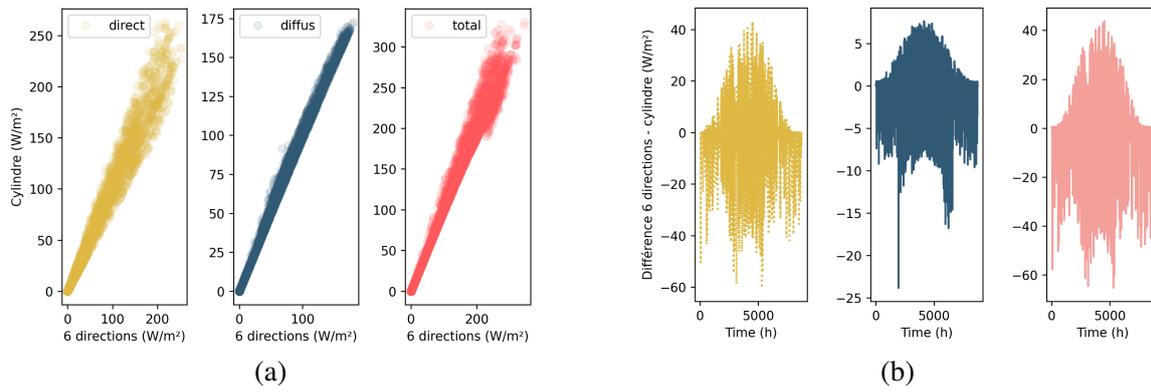


Figure 5 : Comparaison des flux reçus avec la méthode des six directions a) et b) différences de flux en fonction du temps pour les flux direct, diffus et total (de gauche à droite).

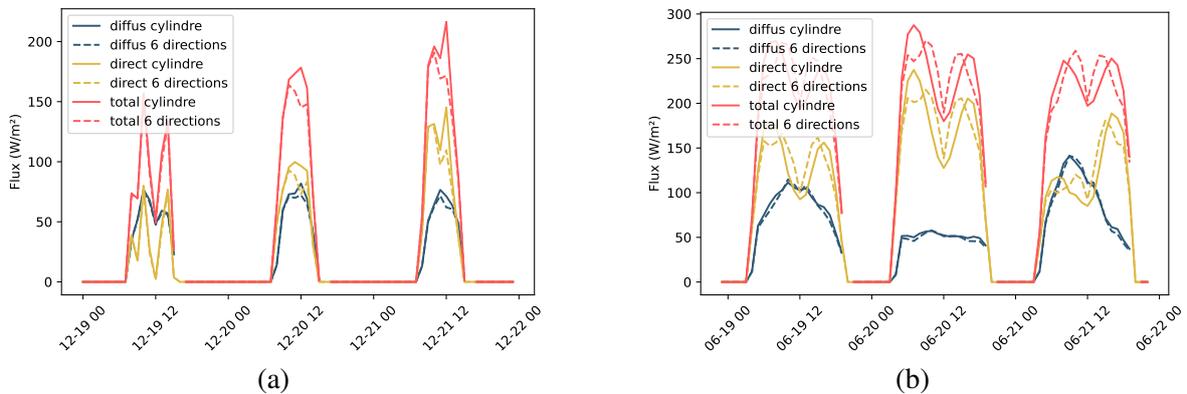


Figure 6 : Comparaison des méthodes sur trois jours autour du solstice a) d'été et b) d'hiver.

#### 4. CONCLUSION

En partant du constat que la géométrie de l'individu varie dans les différents modèles existants en fonction du flux radiatif considéré, ce travail propose une méthode analytique pour le calcul des flux solaires direct et diffus sur un cylindre. Le modèle permet de prendre en compte l'anisotropie du flux diffus.

Dans un premier temps on valide le modèle analytique de calcul sur un cylindre en comparant les résultats avec ceux obtenus par un outil numérique de référence (Holmgren et al., 2018) sur un cylindre discrétisé.

Ensuite les résultats obtenus pour le flux direct sont comparés avec la méthode du facteur de projection  $f_p$ , dérivée par Fanger pour un individu, ce qui permet de vérifier que la méthode de l'intégrale cylindrique est adaptée à la modélisation du flux reçu par l'humain.

Concernant le flux total reçu, les résultats obtenus sont du même ordre de grandeur que ceux de la méthode dite "à 6 directions". Ils montrent une très bonne concordance sur le diffus ainsi que sur le direct. Les résultats sont proches et exhibent des dynamiques similaires.

L'avantage de la technique présentée ici est qu'elle ne requiert que les flux horizontaux direct et diffus, ainsi que la hauteur solaire, généralement présents dans les fichiers météorologiques ou faciles à déterminer avec des outils librement accessibles.

## BIBLIOGRAPHIE

- Holmer, B., Lindberg, F., Rayner, D., and Thorsson, S. (2015). How to transform the standing man from a box to a cylinder—a modified methodology to calculate mean radiant temperature in field studies and models. In *Proceedings of the 9th International Conference on Urban Climate (ICUC9), Toulouse, France*, pages 20–24.
- Holmgren, W. F., Hansen, C. W., and Mikofski, M. A. (2018). pvlib python : A python package for modeling solar energy systems. *Journal of Open Source Software*, 3(29) :884.
- Höppe, P. (1992). Ein neues Verfahren zur Bestimmung der mittleren Strahlungstemperatur im Freien. *Wetter und Leben*, 44(1-3) :147–151.
- Kántor, N., Gál, C. V., Gulyás, Á., and Unger, J. (2018). The impact of façade orientation and woody vegetation on summertime heat stress patterns in a central european square : comparison of radiation measurements and simulations. *Advances in Meteorology*, 2018.
- Li, Z., Feng, X., and Fang, Z. (2022). A modified method to measure outdoor mean radiant temperature : Comparison between two-hemisphere method and six-direction integral method. *Building and Environment*, 221 :109292.
- Matzarakis, A., Rutz, F., and Mayer, H. (2010). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments : basics of the rayman model. *International journal of biometeorology*, 54 :131–139.
- Park, S. and Tuller, S. E. (2011). Comparison of human radiation exchange models in outdoor areas. *Theoretical and applied climatology*, 105(3) :357–370.
- Perez, R., Seals, R., Ineichen, P., Stewart, R., and Menicucci, D. (1987). A new simplified version of the perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. *Solar energy*, 39(3) :221–231.
- Perez, R., Seals, R., Zelenka, A., and Ineichen, P. (1990). Climatic evaluation of models that predict hourly direct irradiance from hourly global irradiance : prospects for performance improvements. *Solar Energy*, 44(2) :99–108.
- Pickup, J., de Dear, R., et al. (2000). An outdoor thermal comfort index (OUT\_SET\*)-part I-the model and its assumptions. In *Biometeorology and urban climatology at the turn of the millenium. Selected papers from the Conference ICB-ICUC*, volume 99, pages 279–283.
- Wallenberg, N., Lindberg, F., Holmer, B., and Thorsson, S. (2020). The influence of anisotropic diffuse shortwave radiation on mean radiant temperature in outdoor urban environments. *Urban Climate*, 31 :100589.
- Walther, E. and Hamdani, E. M. (2018). Calcul trigonométrique du flux reçu par un individu. In *Conférence IBPSA Bordeaux*, pages 1–8.