

Influence des propriétés radiatives des revêtements intérieurs sur le confort thermique estival des occupants.

Valentin Lahaye*¹, Marion Bonhomme¹, Claire Oms¹, Nicolas Duport², Stéphane Ginestet¹

¹ LMDC, Université de Toulouse, INSA, UPS, Toulouse, France

² B2R, UniLaSalle, Amiens, France

*lahaye@insa-toulouse.fr

RESUME. Cette étude évalue l'impact du rayonnement, tant en ondes courtes qu'en ondes longues, sur le confort thermique estival d'un logement sous un climat méditerranéen. Le solveur aux éléments finis Cast3m est couplé à une méthode de radiativité externalisée pour réaliser un calcul en régime transitoire en considérant une multitude de réflexions diffuses et spéculaires, ainsi et la transmission directe à travers les vitrages. L'influence des propriétés surfaciques intérieures sur la température physiologique équivalente (PET) est étudiée, soulignant son influence sur la distribution du rayonnement et sur le confort intérieur. Ces observations ont un intérêt dans des spécificités urbaines, comme l'absence de protections solaires et de volets sur les façades des quartiers historiques, ou le piégeage du rayonnement solaire dans les rues canyon.

MOTS-CLÉS : confort d'été, rayonnement, modélisation spatiale.

ABSTRACT. This study assesses the impact of both shortwave and longwave radiation on the summer thermal comfort of a dwelling in a Mediterranean climate. The Cast3m finite element solver is coupled to an externalized radiosity method to perform a transient calculation considering a multitude of diffuse and specular reflections, as well as direct transmission through glazing. The influence of interior surface properties on the physiological equivalent temperature (PET) is studied, highlighting its influence on radiation distribution and indoor comfort. These observations are of interest in specific urban situations, such as the absence of solar protection and shutters on facades in historic districts, or solar radiation trapping in canyon streets.

KEYWORDS: summer comfort, radiation, spatial modelling.

INTRODUCTION

Le confort thermique estival dans les bâtiments résidentiels européens est une préoccupation grandissante face aux enjeux du dérèglement climatique, caractérisés par des vagues de chaleur plus fréquentes et intenses (Smid et al. 2019). Le phénomène d'îlot de chaleur urbain aggrave cette situation dans les centres-villes, compliquant davantage la gestion des surchauffes, dont l'une des causes principales est le piégeage du rayonnement entre les bâtiments (T.R. Oke 1982). Les façades situées au cœur des centres-villes denses (parfois dépourvues de protections solaires ou de volets) sont donc plus sensibles aux phénomènes radiatifs.

Pour l'étude du rayonnement urbain, une méthode de radiosité a été développée dans des travaux antérieurs (Bugeat 2020). Couplée au solveur d'éléments finis Cast3m (Duport 2021), cette méthodologie permet de modéliser en régime transitoire le problème thermique complet : conduction, convection, et rayonnement, en considérant un grand nombre de réflexions (diffuses et spéculaires) ainsi que la transmittance (directe et diffuse) à travers les vitrages. Le rayonnement pénétrant à l'intérieur du logement depuis le ciel, ainsi que les inter-réflexions auxquels il est soumis avant d'être absorbé par les parois, sont modélisés. Cette méthode ajoute une information supplémentaire quant à l'évaluation du confort intérieur liée aux échanges radiatifs.

L'objectif de ce travail est double. Le premier est de modéliser le rayonnement en ondes courtes reçu par des capteurs (représentés par des globes noirs) pour évaluer son influence sur le confort. Le second, plus exploratoire, est de faire varier les propriétés radiatives (CLO et GLO) des revêtements intérieurs dans une étude de cas, et d'analyser leur impact sur le confort.

DESCRIPTION DU CAS D'ETUDE ET DE LA METHODE

Le cas d'étude représente un appartement d'une surface habitable de 47,1 m² (figure 1). Les fenêtres sont orientées au sud, et les masques proches ne sont pas modélisés. Les compositions des parois et propriétés des matériaux sont décomposés ci-après (tableaux 1 et 2). Des capteurs sont modélisés pour interpréter spatialement le confort (figure 2) par des sphères d'un diamètre de 15cm, espacés de 50cm, et à une hauteur de 1.1m, qui sont représentatives de thermomètres à globe noir.

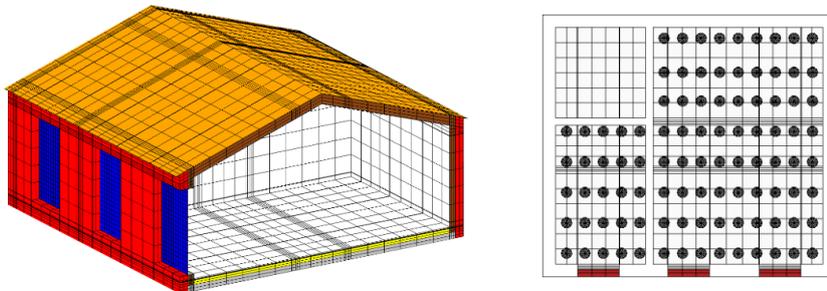


Figure 1: Maquette numérique utilisée pour le calcul. A gauche : vue 3D en coupe du modèle / A droite : vue du dessus du modèle, avec la représentation des capteurs.

Le processus de simulation se divise en plusieurs phases. Les échanges radiatifs sont d'abord effectués sur les surfaces de la maquette numérique, composée de quadrilatères en 3D (sous-section 2.1). Le rayonnement émis (CLO et GLO) depuis le ciel vers les surfaces du modèle (y compris vers les surfaces intérieures et les capteurs) est calculé à chaque pas de temps horaire. Les données météorologiques de Toulouse issues du logiciel **Meteonorm** sont utilisées en entrée. La période de calcul est définie à partir du 10 août jusqu'au 17 août.

Les charges par rayonnement sont intégrées dans le logiciel de résolution aux éléments finis **Cast3m**. Le problème thermique complet y est résolu en régime transitoire, incluant la conduction, la convection et le rayonnement (sous-section 2.2), et détermine les températures de l'air intérieur et les températures de surfaces des nœuds du modèle pour chacun des pas de temps (Duport 2021).

Le rayonnement en ondes longues reçu par les capteurs depuis les surfaces intérieures est calculé à partir des facteurs de vue, de la température, et de l'émissivité de ces dernières. Il est ajouté au

rayonnement reçu depuis le ciel calculé précédemment pour obtenir l'irradiance totale des capteurs (W/m^2), qui est ensuite convertie en température moyenne radiante (T_{mr}). Elle est ensuite associée à la température de l'air (T_{int}) en tant que variables d'entrées pour le calcul de la température physiologique équivalente (PET), permettant d'évaluer le confort thermique (sous-section 2.3).

1.1. RAYONNEMENT DEPUIS LE CIEL VERS LA MAQUETTE NUMERIQUE (PRE-TRAITEMENT)

Le ciel est décomposé en 2000 tuiles d'angles solides équivalents (Beckers et Beckers 2012), et intégré dans le modèle géométrique importé dans le logiciel **Matlab**. Les facteurs de vue entre le ciel, les surfaces, et les capteurs, sont calculés séparément pour les ondes courtes et pour les ondes longues à partir de l'algorithme de lancer de rayon **Embree**, en utilisant la méthode de calcul des facteurs de vue étendus développée par (Bugeat 2020). Les ondes courtes et les ondes longues sont considérées comme respectivement inférieures et supérieures à $4\mu m$ (Beckers 2016). À partir des propriétés radiatives de chaque surface (tableau 1), cette méthode permet de considérer un grand nombre de réflexions diffuses, de transmissions directes, et de réflexions spéculaires (considérées soit parfaitement diffuses, soit parfaitement spéculaires).

Surfaces		OC				OL	
		τ_s	τ_d	ρ_s	ρ_d	α	ϵ
Fenêtres	<i>Verre</i>	0,80	0	0,10	0	0,10	0,90
Façades extérieures	<i>Brique foraine</i>	0	0	0	0,15	0,85	0,92
Couverture	<i>Tuiles en terre cuite</i>	0	0	0	0,10	0,90	0,97
Sols	<i>Carrelage clair</i>	0	0	0	0,85	0,15	0,95
	<i>Carrelage sombre</i>	0	0	0	0,04	0,96	0,95
Revêtements intérieurs murs et plafonds	<i>Peinture blanche acrylique</i>	0	0	0	0,80	0,20	0,94
	<i>Peinture blanche faible ϵ</i>	0	0	0	0,80	0,20	0,67

Tableau 1 : Propriétés radiatives des surfaces : transmittance directe et diffuse (τ_r , τ_d), réflexion spéculaire et diffuse (ρ_r , ρ_d), absorptivité (α), émissivité (ϵ)

À partir des données météorologiques, les radiances des différentes tuiles du ciel sont calculées séparément pour les ondes courtes et pour les ondes longues à partir des distributions proposées respectivement par (Perez, Seals, et Michalsky 1993) et (Martin et Berdahl 1984). Le flux reçu par chaque surface du modèle depuis le ciel est ensuite calculé à partir de l'équation (1).

$$E_i = \sum_{j=1}^N F_{ij} B_j \quad (1)$$

E_i est le flux reçu par unité de surface (W/m^2), F_{ij} le facteur de vue entre la face i et j , et B_j la radiositivité de la face j (W/m^2). Pour modéliser le rayonnement reçu des capteurs, ces derniers sont décomposés en de minuscules surfaces orientées (figure 2) qui voient leur environnement mais qui ne sont pas vues. C'est-à-dire qu'elles reçoivent le rayonnement sans interagir, émettre, réfléchir, transmettre ni absorber ce dernier, n'influençant pas sa distribution.

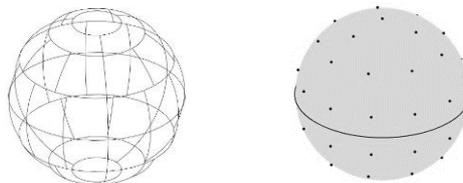


Figure 2 : Représentation d'un thermomètre à globe noir.

A gauche : Décomposition en 50 surfaces à angles solides équivalents.

A droite : Représentations des 50 points "capteurs" au centre de chaque face

1.2. CALCUL THERMIQUE PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS

1.2.1. Conduction

La conduction au niveau des matériaux est résolue par la méthode des éléments finis. Les conditions limites sont imposées par les flux convectifs et radiatifs au niveau des surfaces intérieures et extérieures. Les propriétés des matériaux sont définies ci-après (tableau 2). La température du sol est fixée à 15°C à une profondeur de 2m.

Matériaux		Ep (m)	λ (W/m.K)	Cp (J/kg.K)	ρ (kg/m ³)
Plafond	Tuiles	0,015	1,0	800	1700
	Isolant laine de verre	0,20	0,04	840	30
	Plâtre	0,013	0,25	1008	825
Menuiseries	Double vitrage	0,006	0,009	750	2500
Murs	Brique foraine	0,20	0,22	1000	700
	Isolant laine de verre	0,10	0,040	840	30
	Plâtre	0,013	0,25	1008	825
Sol	Carrelage	0,02	2,91	1000	2800
	Chape béton	0,05	2,1	840	2400
	Polyuréthane	0,10	0,022	1450	14
	Dalle béton	0,20	2,1	840	2400
Refend	Béton	0,15	2,1	840	2400

Tableau 2 : Propriétés des différents matériaux qui composent la maquette numérique

1.2.2. Convection

Les échanges convectifs intérieurs et extérieurs sont traités distinctement. Côté extérieur, un flux convectif est imposé à partir de la température de l'air extérieur issue des données météorologiques, de la température des nœuds de la surface extérieure au début du pas de résolution, et du coefficient de convection associé au sens du flux : 2,5 W/m².K pour un flux horizontal, 0,7 W/m².K pour un flux ascendant, et 5 W/m².K pour un flux descendant (CSTB 2012).

Côté intérieur, la température de l'air laissée en évolution libre est calculée à chaque pas de temps. Un nœud conductif virtuel est modélisé au centre de la pièce, à partir duquel des éléments pyramidaux à cinq nœud sont associés (Duport 2021). Le coefficient de convection associé au sens du flux est attribué comme précédemment à la face correspondant à la peau intérieure.

Un débit de renouvellement d'air correspondant à 61,87 m³/h (selon l'arrêté du 24 mars 1982 relatif à l'aération des logements) est adopté pour prendre en compte le flux correspondant au renouvellement d'air. Cet échange thermique avec l'extérieur est calculé à partir de l'équation (2), proportionnellement à la différence de température entre l'air intérieur et l'air extérieur (Duport 2021).

$$\phi_v = (V_i \cdot \rho_{air} \cdot c_{p,air}) \cdot \Delta T_{ext-int} \quad (2)$$

ϕ_v est le flux thermiques lié au renouvellement d'air (W/m²), V_i est le débit de renouvellement d'air (m³/h), ρ_{air} est la masse volumique de l'air (kg/m³), $c_{p,air}$ est la capacité thermique massique de l'air (J/kg.K), $\Delta T_{ext-int}$ est la différence de température entre l'air intérieur et extérieur (K).

1.2.3. Grandes longueurs d'ondes (GLO)

La méthode de résolution des échanges par rayonnement intégrée dans Cast3m a été modifiée. L'algorithme de Gauss-Seidel a été remplacé par l'algorithme de Jacobi, qui approxime la radiosité comme étant égale à l'émission (Duport 2021). De plus, le calcul des facteurs de vue est externalisé pour utiliser la méthode de radiosité décrite précédemment (Bugeat 2020). L'avantage principal réside dans la modélisation d'un très grand nombre de réflexions diffuses et spéculaires à l'intérieur du logement.

1.3. TEMPERATURE PHYSIOLOGIQUE EQUIVALENTE (PET) (POST-TRAITEMENT)

L'évaluation du confort est réalisée à travers l'indicateur PET (Physiological Equivalent Temperature) introduit par (Höppe 1999). Basé sur la méthode de calcul à 3 nœuds MEMI, il est défini comme la température physiologique équivalente en un lieu donné (intérieur ou extérieur) et correspond à la température de l'air à laquelle, dans un environnement intérieur typique, l'équilibre du corps humain (métabolisme de travail 80 W d'activité légère, ajouté au métabolisme de base ; résistance thermique des vêtements 0,9 clo) est maintenu avec des températures centrales et cutanées égales à celles des conditions évaluées. Il est souvent utilisé dans l'évaluation du confort extérieur car il a la particularité de prendre en compte le spectre radiatif complet (ondes courtes et ondes longues) comme variables d'entrée. Il a été utilisé plus récemment dans l'évaluation des risques de surchauffes pour des conditions intérieures (Attia et al. 2023).

Dans les résultats présentés ci-après, seule la température de l'air et le rayonnement reçu par chacun des capteurs seront utilisées comme variables (les autres variables d'entrées sont considérées constantes). Le rayonnement total reçu par les capteurs est d'abord converti en T_{mr} (K), définie par (ANSI/ASHRAE 2004) comme « la température d'une enceinte noire uniforme dans laquelle un corps solide ou un occupant échangerait la même quantité de chaleur radiante que dans l'environnement existant » à partir de l'équation (3).

$$T_{mr} = \sqrt[4]{\frac{\Phi_r}{\sigma \varepsilon_{g,ol}}} \quad (3)$$

T_{mr} est la température moyenne radiante (K), Φ_r est le flux radiatif reçu par le capteur (W), σ est la constante de Stefan-Boltzmann ($5,670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$), $\varepsilon_{g,ol}$ est l'émissivité du globe noir, considéré comme un corps noir (égale à 1). La température moyenne radiante est ensuite intégrée dans les équations (4) et (5) utilisées lors du calcul du PET.

$$S_{skin} = \frac{A_{r,eff}(1-f_{a,cl}) \varepsilon_{skin} \sigma (T_{mr}^4 - T_{skin}^4)}{A_{dubois}} \quad S_{clo} = \frac{f_{eff} a_{clo} \varepsilon_{clo} \sigma (T_{mr}^4 - T_{clo}^4)}{A_{dubois}} \quad (4) (5)$$

S_{skin} S_{clo} sont respectivement l'astreinte thermique due au rayonnement de la peau et des vêtements (W/m^2), $A_{r,eff}$ est l'aire effective d'échange radiant (m^2), $f_{a,cl}$ est le facteur d'habillement (SU), ε_{skin} , ε_{clo} sont respectivement l'émissivité de la peau et des vêtements (SU), T_{skin} , T_{clo} sont respectivement la température de la peau et des vêtements (K), et A_{dubois} est l'aire du sujet (m^2).

Les asymétries de rayonnement reçu par les capteurs amènent à une répartition spatiale du confort. Une interpolation linéaire des valeurs calculées sur chacun des capteurs est proposée sur un plan à une hauteur de 1,10m.

RESULTATS

1.4. INFLUENCE DES COURTES LONGUEURS D'ONDES (CLO) SUR LA PET

La figure (3) représente la part des CLO sur l'irradiance totale des capteurs et son influence sur la température physiologique de confort le 17 août à 12h00. Deux cas distincts sont étudiés : le premier avec un carrelage blanc au sol et le second avec un carrelage noir. Les murs et plafonds sont peints en blanc dans les deux cas. La température intérieure est laissée en évolution libre au cours de la simulation. A 12h00, elle atteint 33,13°C pour le premier cas, et 33,23°C pour le deuxième cas. Les variations de PET présentées ci-après sont donc majoritairement impactées par l'irradiance des capteurs.

Dans le cas du sol blanc, la part d'irradiance en CLO des capteurs représente en moyenne 9,08 % de l'irradiance totale (soit 49,96 W/m² sur 550,40 W/m²). Elle induit une augmentation moyenne de la PET de 3,87 K, pour des valeurs comprises entre 2,06 K et 13,04 K. Elles sont moins élevées au fond de la pièce car les inter-réflexions du rayonnement provenant des fenêtres sont progressivement absorbées par les surfaces, et sont très élevées aux abords des fenêtres car reçoivent du rayonnement direct.

Dans le cas d'un carrelage noir (absorptivité $\alpha = 0,96$), la majorité des CLO est absorbée dès la première réflexion au niveau du sol, ce qui réduit le nombre d'inter-réflexions dans le reste de la pièce. La part d'irradiance en CLO sur l'irradiance totale des capteurs représente alors seulement 3,34 % (soit 17,25 W/m² sur 511,51 W/m²). L'irradiance en GLO est également plus faible dans le cas du sol noir par rapport à celui du sol blanc (différence moyenne de 6,17 W/m²). En effet, le rayonnement global émis par les parois est plus faible car les murs et plafonds ont absorbé moins de rayonnement issu des réflexions (contrairement au sol qui absorbe davantage de rayonnement). Les PET calculées varient alors entre 0,34 K et 9,77 K, pour une moyenne de 1,35 K.

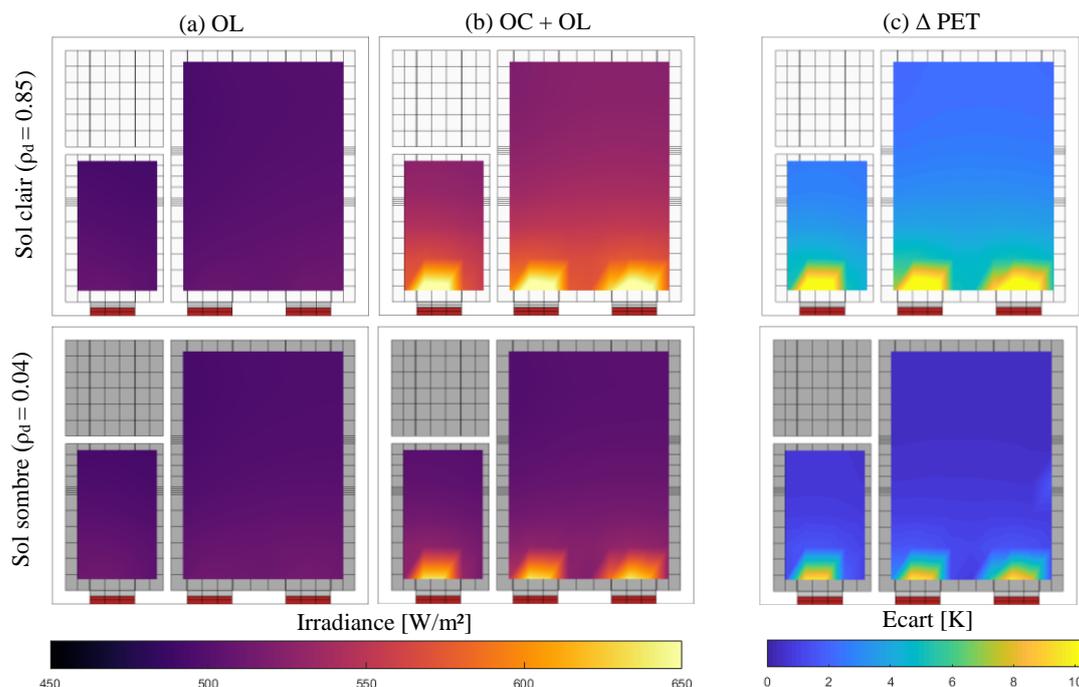


Figure 3 : (a) Irradiance en GLO reçue par les capteurs ; (b) Irradiance en GLO+CLO reçue par les capteurs ; (c) Différence de Température Physiologique Equivalente (PET) causée par la prise en compte des CLO ((b)-(a))

1.5. INFLUENCE DES GRANDES LONGUEURS D'ONDES (GLO) SUR LA PET

Pour la suite de l'analyse, les vitrages sont considérés opaques aux CLO. Les GLO sont donc les seules à influencer le calcul de la PET. La figure (4) représente les PET de 2 scénarios distincts à 12h00 : le cas (1) considère l'ensemble des murs et plafonds recouverts d'une peinture acrylique blanche ($\varepsilon = 0,94$), et le cas (2) reprends ces mêmes hypothèses mais considère une peinture à faible émissivité ($\varepsilon = 0,67$) au niveau du mur de refend intérieur. Les températures de surface et de l'air sont ensuite calculées à partir de ces hypothèses.

Pour les cas (1) et (2), la répartition du PET est homogène dans l'espace avec des écarts respectifs de 0,93 K, et 1,63 K (correspondants à des moyennes de 30,62°C, et 33,94°C). La PET est plus élevée dans le cas (2) car une émissivité (et donc absorptivité) plus faible au niveau du refend engendre une réduction du rayonnement déchargé par les autres faces intérieures, qui montent alors davantage en température que dans le cas (1). Les échanges par rayonnement avec les capteurs sont plus importants, de même que les échanges convectifs avec l'air ambiant.

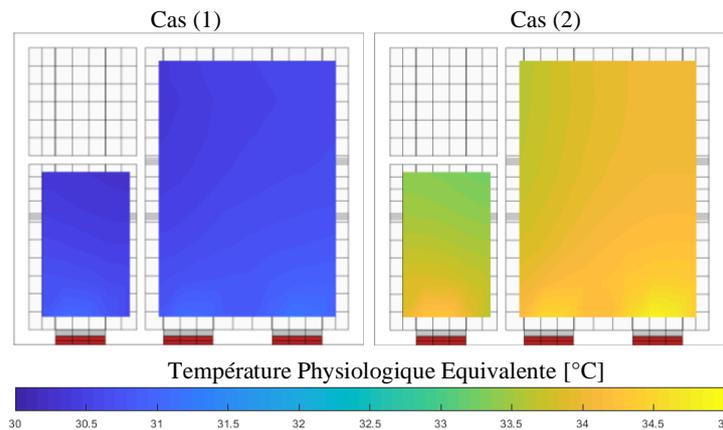


Figure 4 : Températures physiologique équivalente (°C) pour deux scénarios différents

CONCLUSION

Ce travail approfondit la compréhension de l'influence du rayonnement, en ondes courtes comme en ondes longues, sur le confort thermique intérieur. Il montre comment les propriétés radiatives des revêtements intérieurs affectent la distribution du rayonnement et le calcul du PET. Dans les conditions fixées par cette étude, la présence au sol d'un carrelage blanc a augmenté le nombre d'inter-réflexions du rayonnement intérieur en ondes courtes, ce qui a augmenté la PET moyenne de 2,52°C par rapport à un carrelage noir. En ondes longues, l'application d'une peinture blanche à faible émissivité sur le mur de refend intérieur à la place d'une peinture blanche acrylique a limité la décharge par rayonnement des murs extérieurs vers le mur de refend, ce qui a induit à une augmentation de la PET de 3,32°C.

Des modélisations complémentaires sont cependant utiles pour évaluer le comportement de différents revêtements intérieurs face au rayonnement en fonction de paramètres complémentaires, notamment leur diffusivité et leur effusivité. En outre, (Aviv et al. 2022) précisent qu'un environnement à émissivité hétérogène peut influencer directement la T_{mr} dans le cas où les températures de surfaces des parois sont aussi différentes.

De plus, la modélisation géométrique des températures de surface ajoute la possibilité de calibrer et de vérifier les simulations avec des mesures spatiales via une caméra thermique, autorisant une analyse spatiale des températures de surface.

REFERENCES

- ANSI/ASHRAE. 2004. « Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy ». <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-condition>.
- Attia, Shady, Caroline Benzidane, Ramin Rahif, Deepak Amaripadath, Mohamed Hamdy, Peter Holzer, Annkatrin Koch, et al. 2023. « Overheating Calculation Methods, Criteria, and Indicators in European Regulation for Residential Buildings ». *Energy and Buildings*, mai, 113170. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113170>.
- Aviv, Dorit, Julie Gros, Hayder Alsaad, Eric Teitelbaum, Conrad Voelker, Jovan Pantelic, et Forrest Meggers. 2022. « A data-driven ray tracing simulation for mean radiant temperature and spatial variations in the indoor radiant field with experimental validation ». *Energy and Buildings* 254 (janvier): 111585. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111585>.
- Beckers, Benoit. 2016. « Multiscale Analysis as a Central Component of Urban Physics Modeling ». In , 41:pp 1-27. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27996-1_1.
- Beckers, Benoit, et Pierre Beckers. 2012. « A general rule for disk and hemisphere partition into equal-area cells ». *Computational Geometry* 45 (7): 275-83. <https://doi.org/10.1016/j.comgeo.2012.01.011>.
- Bugeat, Antoine. 2020. « Développement d'une méthode de radiosité pour l'étude du rayonnement solaire en milieu urbain ». These de doctorat, Pau. <https://www.theses.fr/2020PAUU3032>.
- CSTB. 2012. « CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), Règles Th-U Fascicule 4: Parois Opaques, CSTB Editions, 2012. »
- Duport, Nicolas. 2021. « Études thermiques urbaines à différentes échelles par éléments finis ». Phdthesis, Université de Pau et des Pays de l'Adour. <https://theses.hal.science/tel-03520505>.
- Höppe, P. 1999. « The Physiological Equivalent Temperature - a Universal Index for the Biometeorological Assessment of the Thermal Environment ». *International Journal of Biometeorology* 43 (2): 71-75. <https://doi.org/10.1007/s004840050118>.
- Martin, Marlo, et Paul Berdahl. 1984. « Summary of results from the spectral and angular sky radiation measurement program ». *Solar Energy* 33 (3): 241-52. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(84\)90155-5](https://doi.org/10.1016/0038-092X(84)90155-5).
- Perez, R., R. Seals, et J. Michalsky. 1993. « All-weather model for sky luminance distribution—Preliminary configuration and validation ». *Solar Energy* 50 (3): 235-45. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(93\)90017-I](https://doi.org/10.1016/0038-092X(93)90017-I).
- Smid, M., S. Russo, A. C. Costa, C. Granell, et E. Pebesma. 2019. « Ranking European capitals by exposure to heat waves and cold waves ». *Urban Climate* 27 (mars): 388-402. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.12.010>.
- T.R. Oke. 1982. « The energetic basis of the urban heat island ». <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>.