

## Simulation thermique par éléments finis d'un canyon urbain

Nicolas Duport\*<sup>1</sup>, Antoine Bugeat<sup>1</sup>, Elena Garcia-Nevado<sup>1</sup>, Eduardo Fernandez<sup>2</sup>, Benoit Beckers<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Urban Physics Joint Laboratory, Université de Pau et des Pays de l'Adour. E2S UPPA, Parc Montaury, 64600 Anglet, FRANCE*

<sup>2</sup> *Centro de Cálculo, Universidad de la República, J. H. y Reissig 565, 11300, Montevideo, Uruguay*

\*[nicolas.duport@univ-pau.fr](mailto:nicolas.duport@univ-pau.fr)

---

**RÉSUMÉ.** La performance énergétique d'un bâtiment dans un contexte urbain dépend fortement de la configuration du voisinage. La prise en compte de la géométrie réelle de la scène et la précision du calcul des différents phénomènes physiques tiennent une place majeure dans la prédiction du comportement thermique des bâtiments. De récentes études ont montré l'intérêt de la méthode des éléments finis pour la compréhension du comportement thermique des bâtiments dans un environnement dense. Parmi les phénomènes physiques, les échanges par rayonnement en ondes courtes et ondes longues jouent un rôle prépondérant. Lors de cette étude, les échanges par rayonnement ondes longues à l'intérieur des bâtiments sont modélisés et leur influence sur le comportement thermique de ces derniers est analysée. Une fois le modèle de rayonnement complet établi, une étude de sensibilité visant une réhabilitation énergétique (couleurs des façades) d'un canyon urbain est menée.

**MOTS-CLÉS :** simulation thermique urbaine, rayonnement thermique, méthode des éléments finis.

---

**ABSTRACT.** The energy performance of a building in an urban context is highly dependent on the physical configuration of the neighbourhood. The consideration of the actual geometry of the scene and the accuracy of the calculation of the various physical phenomena play a major role in predicting the thermal behaviour of buildings. Recent studies have shown the contribution of the finite element method to the understanding of the thermal behaviour of buildings in a dense environment. Among the physical phenomena, short wave and long wave radiation exchanges play a predominant role. In this study, long-wave radiation exchanges inside buildings are modelled and their influence on the thermal behaviour of buildings is analysed. Once the complete radiation model is established, a sensitivity study aimed at an energy rehabilitation (colour of façades) of an urban canyon is conducted.

**KEYWORDS:** urban thermal simulation, thermal radiation, finite element method.

---

### 1. INTRODUCTION

De récentes études ont montré l'importance de l'environnement urbain dans le bilan thermique des bâtiments (Allegrini 2012, Beckers 2016, Perera 2018). Evins (2014) et Lauzet (2019) soulignent que les codes de thermique disponibles ne permettent pas d'évaluer les échanges de rayonnement entre les bâtiments de manière précise. Evins et al. (2014) ont trouvé, dans le cas d'un canyon urbain, des variations de température de surface extérieure de 2°C en moyenne, avec des variations maximales de 6°C, entre le modèle de rayonnement ondes longues standard et leur modèle plus détaillé. Ils montrent que ces variations peuvent entraîner d'importantes répercussions sur les besoins des bâtiments en chauffage et en rafraîchissement.

L'objectif de ce travail est d'établir une nouvelle approche permettant de résoudre le problème thermique urbain dans sa globalité. L'accent est porté sur la prise en compte du rayonnement solaire et

infrarouge. Afin d'illustrer cette méthode, une étude de sensibilité est menée sur un canyon urbain. Les auteurs examinent jusqu'où doit aller le calcul du rayonnement en ondes longues. Dans cette optique, deux cas sont comparés, sans et avec la prise en compte des échanges infrarouges à l'intérieur des bâtiments. Une fois le modèle de rayonnement complet établi, l'influence d'une action visant une réhabilitation urbaine est étudiée. L'impact de la couleur des façades des bâtiments sur le comportement d'une rue est analysé. Les modèles physiques sont présentés dans la section 2, le cas d'étude dans la section 3 et les résultats dans la section 4.

## 2. MODELES PHYSIQUES DU RAYONNEMENT

Pour le calcul radiatif en ondes courtes et en ondes longues, un algorithme basé sur la méthode de radiosité (Goral 1984) est utilisé. Cette méthode nécessite que l'environnement (ciel et bâtiments) soit maillé (modèle 3D surfacique). Ici, la peau du modèle utilisé pour le calcul par éléments finis (modèle 3D volumique) constitue le maillage de l'environnement bâti.

### 2.1. MODELE DE CIEL POUR LE RAYONNEMENT ONDES COURTES ET ONDES LONGUES

Le ciel est divisé en 5000 carreaux selon la méthode proposée par Beckers (2012), assurant ainsi une partition avec des carreaux à angles solides égaux et avec le meilleur rapport d'aspect possible. La même partition est utilisée en ondes courtes et en ondes longues. Ainsi, le calcul des facteurs de vue n'est réalisé qu'une seule fois au cours de la simulation. La radiance en ondes courtes de chaque carreau de ciel est calculée grâce au modèle proposé par Pérez (1993). Ce modèle nécessite les irradiances directes normales et diffuses horizontales (fichiers de données climatiques) ainsi que le calcul de la position du soleil pour chaque pas de temps considéré. Le soleil est modélisé par le carreau de ciel dans lequel il se situe. Sa radiance correspond au rapport entre l'irradiance directe normale et l'angle solide du carreau de ciel.

Le rayonnement atmosphérique en ondes longues change avec l'angle zénithal, en particulier pour un ciel clair et froid (Bliss 1961). Suite à des études préliminaires de Nahon (2019), les modèles d'Angström (1915) et de Martin & Berdhal (1984) sont utilisés. Le premier permet de déterminer l'émissivité globale du ciel à partir des mesures de la pression de vapeur d'eau, de l'humidité relative, de la température de l'air et de la couverture nuageuse opaque. À partir de cette émissivité globale, le second modèle permet d'obtenir la variation de l'émissivité du ciel en fonction de l'angle zénithal.

### 2.2. ECHANGES RADIATIFS

En ondes courtes, un système d'équations linéaires (1) liant les irradiances de toutes les faces de la scène est établi. Le premier terme de ce système correspond au rayonnement provenant directement du ciel et du soleil et le deuxième, aux réflexions diffuses provenant de l'environnement (bâtiments et sol de la rue).

$$E_{clo,i} = \sum_j (F_{ij}^* M_{clo,j} + F_{ij}^* \rho_{d,j} E_{clo,j}) \quad (1)$$

$E_{clo,i}$  et  $E_{clo,j}$  sont les irradiances ondes courtes des faces  $i$  et  $j$  (Wm<sup>-2</sup>);  $M_{clo,j}$  est l'émittance ondes courtes de la face  $j$  (Wm<sup>-2</sup>) et correspond à la première réflexion de la face  $j$ ;  $\rho_{d,j}$  est la réflectance diffuse en ondes courtes de la face  $j$ ;  $F_{ij}^*$  est le facteur de vue étendu entre les faces  $i$  et  $j$ .

Les facteurs de vue classiques sont remplacés par les facteurs de vue étendus (Sillion 1989, Bugeat 2020). Ce concept permet d'inclure les échanges par réflexions spéculaires et par transmissions directes au sein de l'algorithme de radiativité. Ces échanges autres que diffus sont pris en compte lors du calcul des facteurs de vue étendus en tenant compte des réflectances spéculaires et des transmittances directes des matériaux. Ainsi, lors de la résolution du système d'équations linéaires des irradiances, le rayonnement est considéré directement de manière globale pour l'ensemble du modèle sans distinction entre intérieur et extérieur. Dans notre cas, le rayonnement provenant de l'extérieur (soleil, ciel et réflexions) parvient dans les espaces intérieurs au travers des vitrages par transmission directe. Cette méthode permet notamment, de calculer avec une considération spatiale précise, les marques produites sur les surfaces intérieures dues aux rayons du soleil.

En ondes longues, nous devons résoudre le système d'équation linéaire (2). Ce système est semblable à celui des ondes courtes (1). Cependant, comme toutes les faces sont considérées, dans ce travail, comme opaques et parfaitement diffuses dans le spectre infrarouge, il n'y a pas de facteurs de vue étendus.

$$E_{glo,i} = \sum_j (F_{ij} M_{glo,j} + F_{ij}(1 - \varepsilon_i)_j E_{glo,j}) \quad (2)$$

$E_{glo,i}$  et  $E_{glo,j}$  sont les irradiances ondes longues des faces  $i$  et  $j$  ( $\text{Wm}^{-2}$ );  $M_{glo,j}$  est l'émittance ondes longues de la face  $j$  ( $\text{Wm}^{-2}$ ) et correspond à la première réflexion de la face  $j$ ;  $(1 - \varepsilon_i)_j$  est la réflectance diffuse ondes longues de la face  $j$ ;  $F_{ij}$  est le facteur de vue classique entre les faces  $i$  et  $j$ .

Pour résoudre les deux systèmes, nous utilisons un algorithme itératif de Jacobi, qui permet de contrôler le nombre de réflexions prises en compte (Cohen 2012). Sur la base de tests de pré-simulation, nous avons défini 10 réflexions pour les calculs d'ondes courtes et longues. Enfin, nous obtenons le flux absorbé par chaque face  $A_i$  en multipliant l'irradiance reçue par son absorbance, exprimée en (3) pour les ondes courtes, et en (4) pour les ondes longues.

$$A_{clo,i} = \alpha_{clo,i} E_{clo,i} \quad \text{With, } \alpha_{clo,i} = 1 - \rho_{r,i} - \rho_{d,i} - \tau_{D,i} \quad (3)$$

$$A_{glo,i} = \alpha_{glo,i} E_{glo,i} \quad \text{With, } \alpha_{glo,i} = \varepsilon_i \quad (4)$$

Avec  $\rho_{r,i}$  la réflectance spéculaire de la face  $i$ ,  $\rho_{d,i}$  la réflectance diffuse,  $\tau_{D,i}$  la transmittance directe et  $\varepsilon_i$  l'émissivité.

En ondes longues, les échanges dépendent des températures de surface. Ils sont traités de la même manière que les conditions aux limites convectives. Les surfaces radiatives produisent de la chaleur proportionnellement à la quatrième puissance de leur température.

$$q_{glo,i} = \varepsilon_i \sigma (T_i^4 - T_{rad,i}^4)$$

$T_{rad,i}$  représente la température moyenne de l'environnement, équivalent à l'ensemble des faces visibles depuis la face  $i$ . La quatrième puissance de  $T_i$  définit un système non linéaire. Un schéma itératif permet de résoudre le système en linéarisant le rayonnement comme un flux convectif. Ainsi,  $T_{rad,i}$  peut être calculée à partir de l'éclairement de la face  $i$  comme dans l'équation (5). Puisque les faces de la scène sont grises et diffuses dans le spectre infrarouge, l'algorithme itératif de Jacobi est utilisé pour calculer l'éclairement ondes longues des faces de la scène à chaque pas de temps du calcul éléments finis.

$$T_{rad,i} = \left(\frac{1}{\sigma \cdot E_i}\right)^{1/4} \quad (5)$$

Ce qui conduit à l'expression du flux net pour la face  $i$ , en linéarisant :

$$q_{glo,i} = h_i^{n+1}(T_i^{n+1} - T_{rad,i}^{n+1}) \quad (6)$$

$$\text{Avec } h_i^{n+1} = \varepsilon_i \sigma ((T_i^n)^2 + (T_{rad,i}^n)^2)(T_i^n + T_{rad,i}^n) \quad (7)$$

Où  $h_i$  représente le coefficient d'échange entre l'ensemble des faces de la scène et la face  $i$ . En définitive, le système matriciel éléments finis à résoudre s'écrit :

$$C \dot{T} + (K_{cond} + K_{conv} + H_{rad}(T)) T = Q + H_{rad}(T) T_{rad eq} \quad (8)$$

$C$  est la matrice de capacité ( $\text{JK}^{-1}$ );  $K_{cond}$  est la matrice de conductivité ( $\text{WK}^{-1}$ );  $K_{conv}$  est la matrice de conductivité pour la convection ( $\text{WK}^{-1}$ ), comprenant tous les coefficients  $h_{conv,i}$  ( $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ );  $Q$  est un vecteur comprenant les conditions limites ( $\text{WK}^{-1}$ ), incluant les flux radiatifs du ciel ( $A_{clo,i} + A_{glo,i}$ ) et les flux convectifs ( $h_{conv,i} \cdot T_{air,i}$ ) ( $\text{Wm}^{-2}$ );  $H_{rad}$  est la matrice de conductivité radiative ( $\text{WK}^{-1}$ );  $T_{rad eq}$  est le vecteur des températures équivalentes de l'environnement pour chaque face ( $\text{K}$ ).

### 3. MODELES NUMERIQUES ET SIMULATIONS

Pour résoudre le problème, le logiciel éléments finis Cast3M (Charras 2011) est utilisé. Ce dernier, permet, à partir des conditions limites et initiales, de résoudre l'équation de la chaleur.

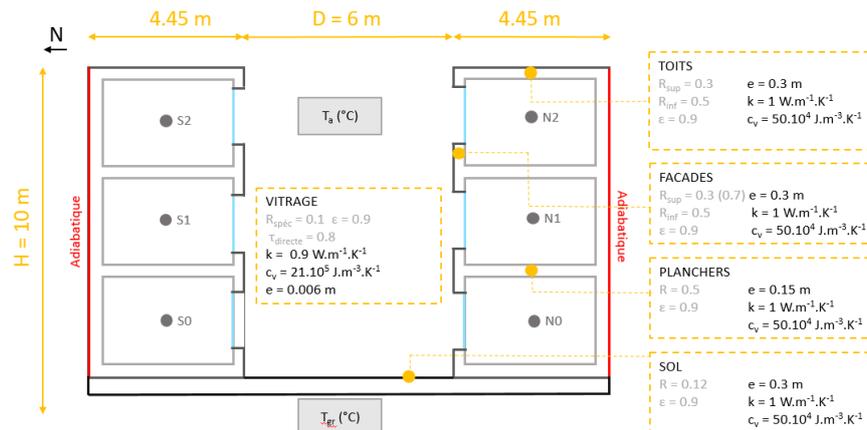


Figure 1 : Schéma du modèle géométrique et paramètres physiques des matériaux.



Figure 2 : Paramètres de simulation

Les simulations présentées ici sont réalisées sur un canyon urbain, avec un rapport d'aspect de  $H/D = 1.67$  et orienté suivant l'axe Est-Ouest. La rue comprend deux séries de cinq bâtiments avec trois étages dont les dimensions sont celles d'un bureau standard ( $6m \times 4m \times 3m$ ). Les paramètres physiques des parois du modèle sont représentés sur la *Figure 1*. Les simulations sont menées sous le climat de la ville de Bordeaux (France) en utilisant les données météorologiques des fichiers IWEC du site Energyplus.net. Celles-ci sont réalisées sur deux jours autour des solstices d'été (21 et 22 Juin) et d'hiver (21 et 22 Décembre). De manière à réduire l'influence de la condition initiale sur les résultats, nous avons réalisé des tests préliminaires. Les températures d'air et de surfaces ont été analysées pour des pré-simulations de 24h et 48h. Les différences sont de  $0,03^{\circ}C$  pour l'air intérieur et de  $0,1^{\circ}C$  pour les surfaces. 24 heures de pré-simulation sont donc suffisantes dans notre cas. De la même manière, le pas de temps de la simulation est analysé et un pas de temps de 10 minutes est nécessaire. Les paramètres de simulation sont récapitulés sur la *Figure 2*. En supposant un vent très faible, les coefficients de transfert par convection sont considérés constants et égaux à  $10 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$  pour les faces extérieures. Le modèle géométrique comprend 182 340 éléments de volumes hexaédriques (*Figure 3*) et 123 492 éléments de surfaces ( $<0,08 m^2$ ). Ces derniers, qui permettent de caractériser le rayonnement, échangent soit avec le ciel soit avec des faces de la scène. L'enceinte formée par la rue et le ciel n'est pas fermée du fait de leurs tailles. Ainsi, nous supposons que le modèle urbain est entouré d'un sol infini à la température de l'air. Le calcul thermique d'une journée sur le modèle urbain de ce travail prend 96 minutes avec un PC standard.

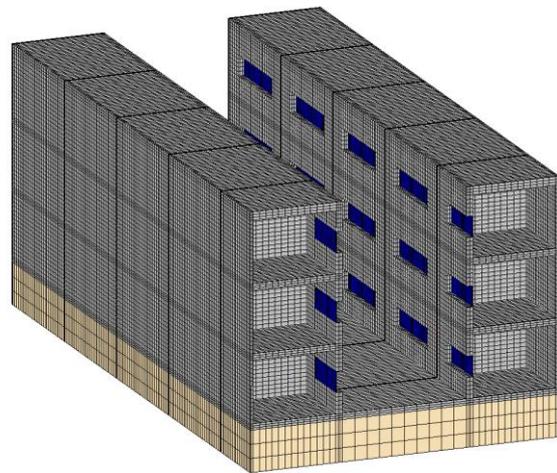


Figure 3 : Coupe du modèle éléments finis.

## 4. RESULTATS

### 4.1. RAYONNEMENT INTERIEUR EN ONDES LONGUES

Tout d'abord, l'influence des échanges en ondes longues à l'intérieur des bâtiments est étudiée. Pour cela, deux cas sont comparés : cas *a*, calcul sans les échanges par rayonnement dans les cavités intérieures (33 648 surfaces) ; cas *b*, calcul complet (99 948 surfaces). La *Figure 3* montre les températures de surface du niveau S2 le 21 juin, pour les cas *a* et *b*, à 7 heures (bas) et à 18 heures (haut). En fin de journée, les parois chaudes (toits et façades) dans le cas *a* se sont rafraîchies dans le cas *b* et les parois froides dans le cas *a* se sont réchauffées dans le cas *b*. Il apparaît une *homogénéisation* des températures de surface lorsque les échanges par rayonnement ondes longues sont pris en compte. Pendant la nuit, on retrouve le même phénomène d'homogénéisation qu'en fin de journée, sauf que dans ce cas, les parois exposées à l'environnement extérieur refroidissent les parois intérieures.

Entre le cas *a* et le cas *b*, la *Figure 5* montre les différences de la température de l'air intérieur des trois étages du bâtiment situé au milieu de la rue faisant face au Sud. La température de l'air intérieur est principalement calculée à partir des températures de surface des parois intérieures (convection). Les échanges par rayonnement ondes longues à l'intérieur des bâtiments jouent un rôle important sur la

température de l'air intérieur, aussi bien durant la nuit que pendant la journée. En effet, la température de l'air du dernier étage (S2) augmente de  $+0.5^{\circ}\text{C}$  à 7h du matin alors que la température de l'air de l'étage intermédiaire (S1) diminue de  $-0.5^{\circ}\text{C}$  à 21h, lorsque le rayonnement ondes longues à l'intérieur est pris en compte. Plus généralement, les trois étages ont le même comportement : augmentation de la température de l'air intérieur pendant la nuit et inversement pendant la journée.

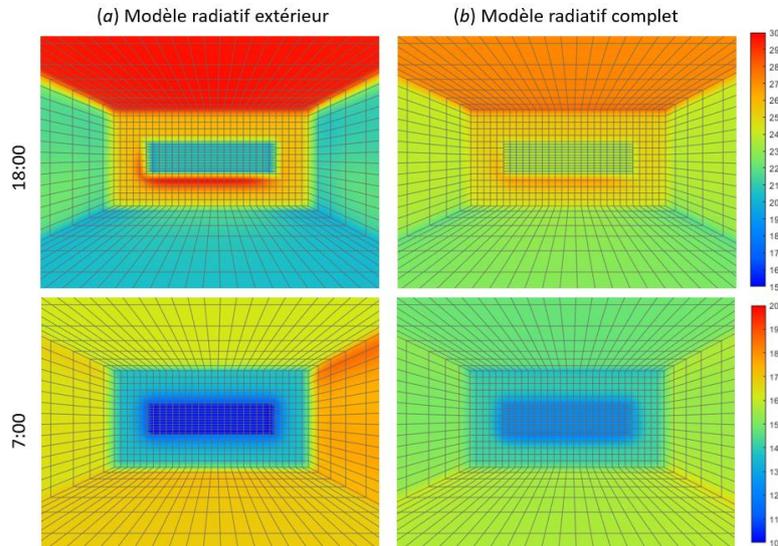


Figure 4 : Températures de surface du niveau S2 le 21 juin pour le cas a et le cas b.

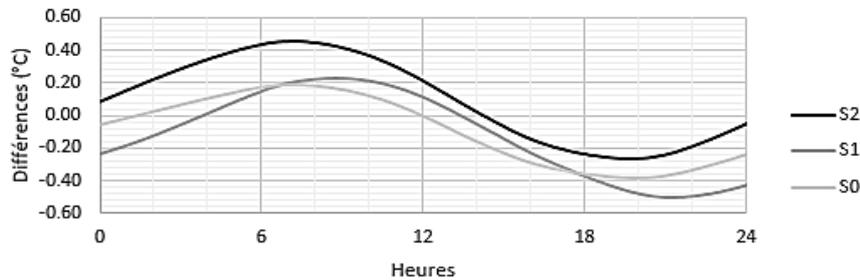


Figure 5 : Ecart de la température de l'air intérieur du bâtiment au centre de la rue faisant face au Sud, entre le cas a et le cas b.

#### 4.2. COULEURS DES FAÇADES

Une fois le modèle de rayonnement complètement établi, une action visant une réhabilitation énergétique urbaine est étudiée. On se demande ici quel serait l'impact d'un changement des couleurs des façades des bâtiments d'un canyon urbain sur son comportement thermique. Ainsi, pour le même cas d'étude présenté en section 3, le cas 1, avec des façades de couleurs sombres (réflectance diffuse,  $r = 0.3$ ), est comparé au cas 2, dans lequel les façades sont modélisées avec des couleurs claires (réflectance diffuse,  $r = 0.7$ ). La Figure 6 montre les températures de surface extérieures pour le cas 1 (à gauche) et 2 (à droite), à 13h, aux solstices d'été (en haut) et d'hiver (en bas). Les façades de couleurs claires réfléchissent plus les ondes courtes que les façades de couleurs sombres. Par conséquent, elles absorbent moins d'énergie solaire et se réchauffent moins que des façades sombres. C'est pourquoi, sur la Figure 6, la façade exposée au Sud est moins chaude à droite qu'à gauche. Puisque les façades claires absorbent moins l'énergie solaire, elles réfléchissent davantage. Ainsi, la partie du sol de la rue qui est à l'ombre est plus chaude dans le cas 2 que dans le cas 1. Au maximum sur la journée, les façades voyant

le Sud se sont rafraichies de  $6.9^{\circ}\text{C}$  en été et de  $5.0^{\circ}\text{C}$  en hiver entre le cas 1 et le cas 2. Le sol de la rue se réchauffe au maximum sur la journée de  $2.7^{\circ}\text{C}$  en été et de  $1.0^{\circ}\text{C}$  en hiver. Repindre les façades de couleurs claires a également un impact sur la température de l'air intérieur des bâtiments. En effet, la température de l'air du dernier étage des bâtiments exposés au Sud est diminuée de  $0.3^{\circ}\text{C}$  à 17h en été. En hiver, ce rafraichissement atteint  $0.5^{\circ}\text{C}$  à la même heure, pour le même étage. Dans cette période, il est préférable d'avoir des façades de couleurs sombres pour augmenter les apports externes. Plusieurs paramètres du modèle peuvent être modifiés afin d'obtenir une influence plus grande sur la température de l'air intérieur : augmenter le coefficient de réflexion diffus des surfaces extérieures du toit, diminuer le rapport d'aspect de la rue et baisser l'inertie des façades.

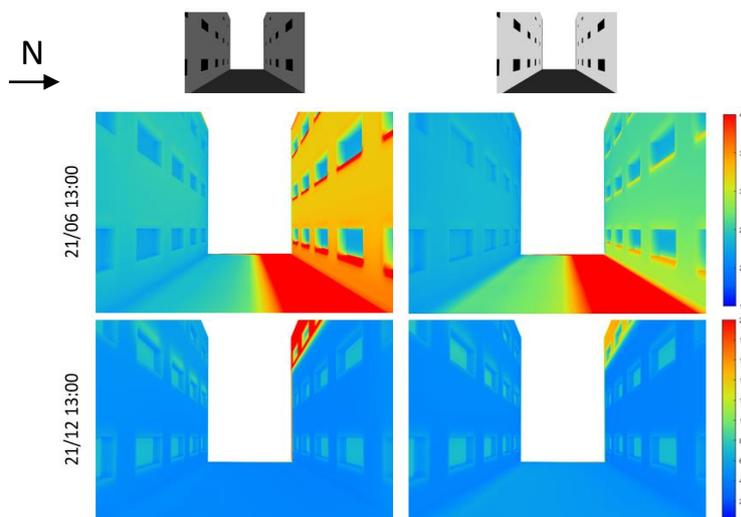


Figure 6 : Températures de surface de la peau extérieure du modèle, le 21 juin à 13h. A gauche, façades sombres et à droite, façades claires.

## 5. CONCLUSION

Une nouvelle approche permettant d'appréhender le comportement thermique d'un site urbain a été développée. Les modèles de rayonnement et de conduction sont pris en compte de manière détaillée (méthode des éléments finis). Il a été choisi d'utiliser la même partition de ciel pour les irradiances en ondes courtes et en ondes longues (Beckers 2012). Le calcul de la matrice des facteurs de vue est ainsi réalisé une seule fois au cours de la simulation. En ondes courtes, le modèle de Pérez (1993) est appliqué sur cette partition pour déterminer les radiances de chaque carreau de ciel, puis la méthode de radiativité est utilisée pour calculer les flux absorbés par les faces de la scène. Les modèles d'Angström (1915) (émissivité globale du ciel) et de Martin & Berdhal (1984) (émissivité directionnelle) sont utilisés afin d'obtenir les flux atmosphériques en ondes longues absorbés par les faces de la scène.

Dans le cas d'un canyon urbain, la prise en compte des échanges par rayonnement ondes longues à l'intérieur des bâtiments est étudiée. Il a été montré que ces échanges provoquent une homogénéisation des températures de surface des parois. Les parois soumises aux environnements extérieurs réchauffent les parois intérieures pendant la journée et les refroidissent pendant la nuit ( $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ). Cette homogénéisation des températures de surface cause une augmentation de la température de l'air en journée et une diminution pendant la nuit en été ( $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ). L'ampleur des différences souligne l'importance de prendre en compte, de manière détaillée, les échanges radiatifs en ondes courtes et en ondes longues, aussi bien à l'extérieur qu'à l'intérieur des bâtiments.

Une fois le modèle de rayonnement complet, l'impact d'une action visant une réhabilitation énergétique urbaine d'un canyon urbain est analysé. Les simulations montrent que des façades repeintes en couleurs claires abaissent les températures de surface des façades (pour les façades orientées face au Sud,  $-7^{\circ}\text{C}$  en été,  $-5^{\circ}\text{C}$  en hiver, au maximum), mais aussi la température de l'air intérieur des bâtiments (pour les derniers étages des bâtiments,  $-0.3^{\circ}\text{C}$  en été,  $-0.5^{\circ}\text{C}$  en hiver, au maximum). Au contraire, elles entraînent un réchauffement du sol de la rue (réflexions diffuses en ondes courtes plus importantes). Cette étude a montré qu'une intervention à l'échelle urbaine peut entraîner d'importantes répercussions sur le comportement thermique des bâtiments. Cependant, l'évaluation de ce type d'intervention nécessite un calcul radiatif multi-échelle à l'image de celui présenté dans ce papier.

## BIBLIOGRAPHIE

- Allegrini, J., Dorer, V. and Carmeliet, J., 2012. Influence of the urban microclimate in street canyons on the energy demand for space cooling and heating of buildings. *Energy and Buildings*, 55, pp.823-832.
- Angström, A. 1915. A study of the radiation of the atmosphere. Based upon observations of the nocturnal radiation during expeditions to Algeria and to California. *Smithsonian Miscellaneous Collections* 65(3).
- Beckers B., 2016 *Multiscale Analysis as a Central Component of Urban Physics Modeling*. In: Ibrahimbegovic A (ed) *Computational Methods for Solids and Fluids: Multiscale Analysis, Probability Aspects and Model Reduction*. Springer International Publishing, pp 1–28
- Beckers, B. and Beckers, P., 2012. A general rule for disk and hemisphere partition into equal-area cells. *Computational Geometry*, 45(7), pp.275-283.
- Bliss Jr, R.W., 1961. Atmospheric radiation near the surface of the ground: a summary for engineers. *Solar Energy*, 5(3), pp.103-120.
- Bugeat, A., Beckers, B. and Fernández, E., 2020. Improving the daylighting performance of residential light wells by reflecting and redirecting approaches. *Solar Energy*, 207, pp.1434-1444.
- Charras, T. and Di Paola, F., 2011. Utiliser Cast3M: la procédure PASAPAS. *Documentation Cast3M*.
- Cohen, M.F. and Wallace, J.R., 2012. *Radiosity and realistic image synthesis*. Elsevier.
- Evins, R., Dorer, V. and Carmeliet, J., 2014. Simulating external longwave radiation exchange for buildings. *Energy and buildings*, 75, pp.472-482.
- Goral, C.M., Torrance, K.E., Greenberg, D.P. and Battaile, B., 1984. Modeling the interaction of light between diffuse surfaces. *ACM SIGGRAPH computer graphics*, 18(3), pp.213-222.
- Lauzet, N., Rodler, A., Musy, M., Azam, M.H., Guernouti, S., Mauree, D. and Colinart, T., 2019. How building energy models take the local climate into account in an urban context—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 116, p.109390.
- Martin, M. and Berdhal, P., 1984. Summary of results from the spectral and angular sky radiation measurement program. *Solar Energy* 33(3/4), 241– 252.
- Nahon, R., Acuña Paz Y Miño, J. and Beckers, B., 2019. Exploring the Sky Longwave Radiance Distribution in the French Basque Country. In *Proceedings of BS2019: 16th IBPSA Building Simulation Conference, Rome, Italy*.
- Perera, A.T.D., Cocco, S., Scartezzini, J.L. and Mauree, D., 2018. Quantifying the impact of urban climate by extending the boundaries of urban energy system modeling. *Applied Energy*, 222, pp.847-860.
- Perez, R., Seals, R. and Michalsky, J., 1993. All-weather model for sky luminance distribution—preliminary configuration and validation. *Solar energy*, 50(3), pp.235-245.
- Schlick, C., 1994, August. An inexpensive BRDF model for physically-based rendering. In *Computer graphics forum* (Vol. 13, No. 3, pp. 233-246). Edinburgh, UK: Blackwell Science Ltd.
- Sillion, F. and Puech, C., 1989, July. A general two-pass method integrating specular and diffuse reflection. In *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* (Vol. 23, No. 3, pp. 335-344).