



HAL
open science

Études thermiques urbaines à différentes échelles par éléments finis

Nicolas Duport

► **To cite this version:**

Nicolas Duport. Études thermiques urbaines à différentes échelles par éléments finis. Thermique [physics.class-ph]. Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2021. Français. NNT : 2021PAUU3030 . tel-03520505

HAL Id: tel-03520505

<https://theses.hal.science/tel-03520505>

Submitted on 11 Jan 2022

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.

Université de Pau et des Pays de l'Adour

Urban Physics Joint Laboratory

ÉTUDES THERMIQUES URBAINES À DIFFÉRENTES ÉCHELLES PAR ÉLÉMENTS FINIS

Thèse de doctorat

Présentée et soutenue par

Nicolas DUPORT

Le 29 octobre 2021 à Université de Pau et des Pays de l'Adour

Anglet, France

Membres du jury :

Éric Florentin – Rapporteur

INSA Centre-Val de Loire, France

Alain Rassinoux – Rapporteur

UMR 6253 CNRS–UTC

Université de Technologie de Compiègne, France

Jérôme Fortin – Président du jury

UniLaSalle Amiens (ESIEE-Amiens)

Pierre Joyot

ESTIA Recherche, France

Claire Tognazzi-Lawrence

SIAME

Université de Pau et des Pays de l'Adour, France

Benoit Beckers – Directeur de thèse

Urban Physics Joint Laboratory

Université de Pau et des Pays de l'Adour, France

Table des matières

Remerciements.....	iv
Résumé.....	vi
Resumen.....	viii
Abstract.....	x
Introduction.....	xii
Chapitre 1 État de l’art.....	1
1.1 Environnement thermique de la physique urbaine.....	1
1.2 Quantification des échanges par la simulation.....	3
1.3 Éléments finis appliqués à la thermique urbaine	4
Chapitre 2 Méthode et Cadre	11
2.1 Transfert de chaleur par conduction : rectangle 2D.....	12
2.2 Transfert de chaleur par convection : cavité 2D	19
2.3 Transfert de chaleur par rayonnement : cavité 3D.....	25
2.4 Convection intérieure en trois dimensions.....	36
2.5 Régime transitoire	40
2.6 Rayonnement en ondes courtes : cavité 3D avec fenêtre.....	44
2.7 Rayonnement du ciel en ondes longues : chambre avec fenêtre de toit.....	57
2.8 Assemblage de deux bâtiments : maillage non conforme.....	66
2.9 Problème complet : cas d’une rue idéalisée	70
2.10 Synthèse de la méthode.....	101
Chapitre 3 Études thermiques à l’échelle de la rue	105
3.1 Contexte	105
3.2 Description du modèle géométrique de la rue	108

3.3	Comparaison entre simulations et mesures.....	116
3.4	Influence du type de réflexion des modèles radiatifs.....	138
3.5	Influence d'une isolation thermique par l'extérieur.....	146
3.6	Conclusions.....	155
Chapitre 4 Études thermiques à l'échelle du quartier.....		157
4.1	Introduction.....	157
4.2	Description du modèle géométrique et de simulation.....	159
4.3	Comparaison entre inertie thermique faible et forte	167
4.4	Relation entre couleur et inertie thermique.....	175
4.5	Réhabilitation énergétique du quartier.....	184
4.6	Conclusions.....	194
Conclusions et perspectives		197
Bibliographie.....		203
Listes des figures et tableaux.....		215
Nomenclature.....		223
Publications de l'auteur		225

Remerciements

Par ces quelques mots, je souhaite remercier les personnes ayant contribué à cette thèse. Toute ma gratitude revient à la Communauté d'Agglomération du Pays Basque qui a financé et porté mes travaux.

J'adresse tout d'abord mes remerciements à M. Jérôme Fortin, d'avoir accepté d'être le président de mon jury ainsi que M. Éric Florentin et M. Alain Rassineux d'avoir accepté d'être rapporteurs de mon manuscrit. Je remercie également M. Pierre Joyot et Mme Claire Lawrence d'avoir accepté d'être membre de mon jury.

Mes profonds remerciements vont à mon directeur de thèse, Benoit Beckers, pour m'avoir offert la possibilité de réaliser ce travail passionnant. Merci pour ta confiance, ta disponibilité et ton ouverture qui ont été un guide précieux à toutes les étapes de ce long chemin. Aussi, je voudrais particulièrement remercier M. Christian La Borderie pour sa disponibilité et son soutien depuis le commencement de ce projet.

Je voudrais également remercier toutes les personnes avec lesquelles j'ai pu collaborer au sein de la chaire : Raphaël, Elena, Antoine, Jairo, José et enfin Ines. Merci pour votre aide, votre sympathie et pour tous les bons moments passés ensemble. Aussi, mes remerciements s'adressent à tous les membres de l'ISA BTP que j'ai pu côtoyer (doctorants, professeurs et élèves) et plus particulièrement à Youssef pour sa bonne humeur légendaire sans faille. Une mention spéciale revient à mon ami Sylvain pour sa présence, son humour et son soutien.

Je ne pourrais finir ces remerciements sans penser à ma famille dont l'affection et le soutien m'ont permis de m'épanouir et m'ont été d'un grand réconfort, comme toujours. Je voudrais terminer ces remerciements en adressant mon éternelle reconnaissance à Emma, sans qui, rien de tout cela n'aurait été possible. Merci pour ta patience, ton soutien et surtout, de m'avoir fait le plus beau cadeau au monde.

Résumé

Le confort thermique des piétons, l'îlot de chaleur urbain et les consommations énergétiques des bâtiments constituent les trois grands problèmes thermiques de la physique urbaine. Ils sont fortement couplés et dépendent des interactions entre les bâtiments : vent, ombrage, réflexions multiples, émission infrarouge. Leur étude nécessite de développer des outils capables de quantifier précisément ces interactions en lien étroit avec la géométrie de la scène.

Dans cette thèse, l'accent est porté sur les aspects conductifs et radiatifs. Les simulations sont réalisées avec le solveur éléments finis Cast3M. Le cadre proposé permet d'aborder différentes échelles (chambre, bâtiment, rue, quartier). Les principaux apports concernent : l'utilisation de maillages structurés (hexaèdres et prismes), la prise en compte des transmissions directes et des réflexions spéculaires grâce aux facteurs de vue étendus, la représentation graphique des résultats. Les quantités d'intérêt sont la température de l'air intérieur des bâtiments (confort de l'habitant) et la température moyenne radiante (confort du piéton).

Dans le chapitre traitant de la méthode, des géométries de complexité croissante permettent d'introduire les fonctions de prétraitement et de post-traitement : la construction du maillage, le calcul des conditions aux limites convectives et radiatives, ainsi que les différentes formes de représentation des résultats.

La première application présente l'étude d'une rue de Bayonne. Elle permet de comparer la méthode à une campagne de mesures (thermographies simulées et mesurées). Une discussion est menée sur la position de l'isolant (intérieure ou extérieure). L'isolation par l'extérieur permet de réduire les ponts thermiques, mais augmente l'inconfort des piétons.

La seconde application est réalisée à l'échelle du quartier et traite principalement de l'inertie thermique. Elle souligne l'importance de sa distribution en relation avec le rayonnement solaire.

Cette thèse montre que la méthode des éléments finis permet d'appréhender les différents problèmes thermiques de la physique urbaine et conduit à une analyse fine des quantités d'intérêt.

Mots-clés :

Physique urbaine, Méthode des éléments finis, Rayonnement thermique, Inertie thermique.

Resumen

El confort térmico de los peatones, la isla de calor y el consumo energético de los edificios constituyen los tres grandes problemas térmicos de la física urbana. Están fuertemente vinculados y dependen de las interacciones entre edificios: viento, sombras, reflejos múltiples, emisión de infrarrojos. Su estudio requiere el desarrollo de herramientas capaces de cuantificar con precisión estas interacciones en estrecha conexión con la geometría de la escena.

Esta tesis se enfoca en los aspectos conductivos y radiativos. Las simulaciones se llevan a cabo con el programa de elementos finitos Cast3M. El marco propuesto permite abordar diferentes escalas (habitación, edificio, calle, barrio). Las principales contribuciones conciernen : el uso de mallados estructurados (hexaedros y prismas), la toma en cuenta de transmisiones directas y reflexiones especulares gracias a los factores de vista extendidos, la representación gráfica de los resultados. Las magnitudes de interés son la temperatura del aire en el interior de los edificios (confort del habitante) y la temperatura media radiante (confort del peatón).

En el capítulo que trata del método, unas geometrías de complejidad creciente permiten introducir las funciones de preprocesamiento y posprocesamiento: la construcción del mallado, el cálculo de las condiciones de frontera convectivas y radiativas, así como las diversas formas de representación de los resultados.

La primera aplicación presenta el estudio de una calle de Bayona. Permite comparar el método con una campaña de medición (termografías simuladas y medidas). Se lleva a cabo una discusión sobre la posición del aislamiento (interior o exterior). El aislamiento exterior reduce los puentes térmicos, pero aumenta la incomodidad de los peatones.

La segunda aplicación se lleva a cabo a nivel de barrio y se ocupa principalmente de la inercia térmica. Destaca la importancia de su distribución en relación a la radiación solar.

Esta tesis muestra que el método de los elementos finitos permite entender los diversos problemas térmicos de la física urbana y conduce a un análisis detallado de las cantidades de interés.

Palabras clave :

Física urbana, Método de los elementos finitos, Radiación térmica, Inercia térmica.

Abstract

Thermal comfort of pedestrians, the urban heat island and energy consumption of buildings are the three major thermal problems of urban physics. They are strongly coupled and depend on building interactions : wind, shading, multiple reflections, infrared emission. Their study requires the development of tools capable of quantifying precisely these interactions in close connection with the geometry of the scene.

This thesis focuses on the conductive and radiative aspects. The simulations are performed with the finite element solver Cast3M. The proposed framework allows to address different scales (room, building, street, neighbourhood). The main contributions concern : the use of structured meshes (hexahedrons and prisms), the consideration of direct transmissions and specular reflections thanks to the extended view factors, the graphical representation of the results. The quantities of interest are the indoor air temperature of buildings (inhabitant comfort) and the mean radiant temperature (pedestrian comfort).

In the chapter dealing with the method, geometries of increasing complexity are used to introduce the pre- and post-processing functions: the construction of the mesh, the calculation of the convective and radiative boundary conditions, as well as the different forms of representation of the results.

The first application presents the study of a street in Bayonne. It allows to compare the method with a measurement campaign (simulated and measured thermograms). A discussion is held on the position of the insulation (inside or outside). The outside insulation reduces thermal bridges, but increases the discomfort of pedestrians.

The second application is carried out at the neighbourhood level and deals mainly with thermal inertia. It underlines the importance of its distribution in relation to solar radiation.

This thesis shows that the finite element method allows to better understand the different thermal problems of urban physics and leads to a fine analysis of the quantities of interest.

Keywords :

Urban physics, Finite element method, Thermal radiation, Thermal inertia.

Introduction

La conférence Habitat III (2016) des Nations Unies avait pour objectif de définir un nouvel agenda urbain visant à « *repenser la façon dont nous envisageons de gérer et de vivre dans les villes* ». L'Assemblée générale des Nations Unies a reconnu la nécessité d'une approche plus durable pour aider les villes à croître. L'urbanisation s'est accélérée au cours des 20 dernières années. 66 % de la population mondiale devrait résider dans les villes d'ici 2050 contre 54 % aujourd'hui. D'après l'agence internationale de l'énergie (AIE), les villes représentent deux tiers de la demande en énergie primaire et 70 % des émissions de CO₂ (rapport *Energy Technology Perspectives* de 2016). Ces deux entités s'accordent à dire que « *les villes ne sont pas seulement des lieux énergivores déstabilisateurs pour l'environnement, elles offrent également des opportunités pour améliorer la durabilité du système énergétique mondial* ». La gestion et le contrôle de l'urbanisation est donc un enjeu crucial pour le développement durable et la santé des populations.

La physique urbaine se situe entre la physique de l'environnement et celle du bâtiment. Elle s'intéresse aux relations entre les bâtiments de la ville et tente de quantifier leur influence sur les champs d'énergie. Dans le cas de l'énergie thermique, l'environnement urbain est devenu une interface dynamique complexe entraînant trois grands problèmes : la génération de microclimats urbains (îlot de chaleur urbain), l'augmentation des consommations énergétiques des bâtiments, et la modification du confort [Oke 1982] [Beckers 2019b].

L'étude de ces trois phénomènes nécessite de développer des outils de simulation capables de quantifier non seulement la température de l'air (îlot de chaleur urbain) et la température des surfaces (bilan thermique des bâtiments), mais aussi la température moyenne radiante (confort urbain). Ces outils doivent être en adéquation avec les moyens de mesure utilisés aujourd'hui comme la télémessure et la thermographie dont le développement est venu compléter les outils de mesure ponctuels.

Nous proposons de déterminer ces quantités d'intérêt en utilisant la méthode des éléments finis. Elle permet d'obtenir des résultats précis tant géométriquement que physiquement, elle est naturellement compatible avec les méthodes de calcul radiatif, et elle produit des résultats spatialisés en accord avec la thermographie.

Pour réaliser des études thermiques urbaines à l'aide des éléments finis, il est nécessaire de définir un modèle géométrique et son maillage ainsi que les conditions aux limites qui sont principalement liées aux conditions atmosphériques : le rayonnement du ciel et du soleil en ondes courtes, le rayonnement du ciel en ondes longues, la conduction de chaleur dans le sous-sol, les échanges convectifs. On appelle ondes courtes et ondes longues les parties du spectre respectivement inférieure et supérieure à $4 \mu\text{m}$ [Beckers 2016]. Comme les ondes courtes et les ondes longues sont parfaitement séparées, la répartition des ondes courtes sur la géométrie ne dépend pas de la température de la scène, contrairement aux ondes longues.

Les travaux antérieurs à cette thèse développés dans la chaire Architecture et Physique Urbaine, ont permis de définir certains de ces aspects et constituent la base de nos développements.

L'échelle de la ville et du quartier urbain est particulièrement difficile à appréhender, car elle met en jeu des géométries complexes qui doivent être détaillées précisément [Beckers 2016]. Elles incitent à abandonner les méthodes nodales traditionnelles pour les éléments finis [Beckers 2019a].

Le code de calcul par éléments finis Cast3M [Le Fichoux 2011], développé par le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), est disponible gratuitement pour le domaine de l'enseignement et de la recherche académique. Sa structure algorithmique est robuste et offre la possibilité de modifier certaines routines pour les besoins de nos applications. En revanche, un travail supplémentaire est nécessaire pour obtenir des représentations graphiques en adéquation avec les géométries urbaines complexes.

L'utilisation de maillages structurés (hexaèdres et prismes) permet de correspondre aux structures des bâtiments et facilite la manipulation des différents éléments qui les composent [Acuña Paz y Miño 2018] [Aguerre 2020a]. Le couplage avec les méthodes de calculs radiatifs est facilité par l'utilisation d'une géométrie discrétisée.

Le calcul du rayonnement à l'intérieur d'une scène implique la définition des sources, des modes de réflexion et de transmission des éléments ainsi que des méthodes pour calculer la propagation du rayonnement dans la scène. Ces dernières sont basées sur des méthodes de lancer de rayons [Ward 1994] et de radiosité [Goral 1984]. La méthode de radiosité a l'avantage de traiter les échanges radiatifs pour l'ensemble de la scène. Elle se base sur deux hypothèses : l'environnement est discrétisé en éléments de surfaces où les grandeurs sont constantes et les émissions et les réflexions se produisent uniquement de manière diffuse. Pour lever cette limitation et prendre en compte la transmittance directe et la réflexion spéculaire, le concept des facteurs de vue étendus, initialement introduit par [Sillion 1994], a été utilisé pour des études d'éclairages naturels dans des environnements urbains denses [Bugeat 2020].

Les images thermographiques existantes, à l'échelle urbaine (réalisées à l'aide de satellites, d'avions ou de drones) et à hauteur d'homme (images en perspective), constituent autant de cas d'essai disponibles pour calibrer et valider les simulations. L'image en perspective introduit des biais dans l'interprétation des résultats qui sont principalement dus à l'angle d'observation des éléments [García-Nevado 2019b]. À cause de ces distorsions, un travail additionnel de correction des images a été réalisé pour obtenir les températures de surface des scènes urbaines [Acuña Paz y Miño 2020a]. Ainsi, l'utilisation de la thermographie et des éléments finis permet d'abandonner les comparaisons ponctuelles historiques au profit de comparaisons spatiales entre thermographies mesurées et thermographies simulées.

Pour réaliser ce type de comparaison, il est nécessaire de développer des outils de post-traitement des résultats afin d'obtenir des images de même nature (point de vue, projection).

Le but général de cette thèse est de développer un cadre de simulation basé sur les éléments finis pour mener à bien des études thermiques à différentes échelles. L'accent est porté sur le

traitement de la géométrie, la représentation graphique des résultats et le calcul des quantités d'intérêt qui sont la température de l'air intérieur des bâtiments (confort de l'habitant) et la température moyenne radiante (confort du piéton).

Dans le chapitre traitant de la méthode (chapitre 2), des géométries de complexité croissante permettent d'introduire les fonctions de prétraitement et de post-traitement du cadre de simulation proposé : la construction du maillage, le calcul des conditions aux limites convectives et radiatives, le calcul des quantités d'intérêt ainsi que les différentes formes de représentation des résultats.

Ensuite, deux applications, à l'échelle de la rue et du quartier, permettent d'illustrer le cadre des simulations.

La première application présente l'étude d'une rue de Bayonne (chapitre 3). L'objectif premier est de valider le modèle de simulation par comparaison à une campagne de mesures. Le second est de montrer l'influence de la position de l'isolant thermique sur le confort des habitants et des piétons dans la configuration d'une rue canyon.

La seconde application présente l'étude d'un quartier idéalisé de Cordoue (chapitre 4). Le but est de souligner l'importance de la distribution de l'inertie thermique en fonction des trajets solaires. Elle montre également l'intérêt de prendre en compte la géométrie du quartier dans l'étude de différents scénarios visant une amélioration du confort.

Chapitre 1

État de l'art

1.1 Environnement thermique de la physique urbaine

La physique urbaine s'intéresse aux relations entre les bâtiments de la ville et tente de quantifier leurs influences sur les champs d'énergie. Dans le cas de l'énergie thermique, trois grands problèmes sont apparus progressivement avec l'édification des villes :

- Le confort urbain
- L'îlot de chaleur urbain
- Les consommations énergétiques

Le problème du confort urbain s'est posé dès la construction des premières villes [Beckers 2019b]. Des dispositions visant à l'amélioration des conditions de vie des habitants et des piétons ont été étudiées : forme de la ville, orientation et largeur des rues, végétalisation, toiles d'ombrage, protections solaires, matériaux à fort albédo et à faible émissivité [Erell 2014]. Le projet européen RUROS (Rediscovering the Urban Real and Open Spaces) a étudié le confort thermique dans de nombreuses villes européennes et a montré que la vitesse du vent et la température moyenne radiante étaient les deux facteurs prédominants pour le confort thermique des piétons [Nikolopoulou 2004].

Le phénomène de l'îlot de chaleur urbain est apparu avec la révolution industrielle dont les premiers effets se sont fait sentir dès le début du XIX^{ème} siècle à Paris et à Londres [Howard 1833] avec des températures de l'air plus élevées dans les zones urbaines que dans les zones

rurales environnantes. Les trois causes principales sont : le piégeage du rayonnement thermique entre les bâtiments (ondes courtes et ondes longues), la diminution du rafraîchissement par rayonnement en ondes longues en raison de la réduction des facteurs de vue du ciel, et l'augmentation du stockage de la chaleur dans les matériaux de construction [Oke 1982].

Le problème des consommations énergétiques des bâtiments est devenu un sujet de préoccupation majeur en Europe à la suite des chocs pétroliers de 1973 et de 1979. De nouvelles réglementations ont été établies et les pertes de chaleur par l'enveloppe des bâtiments ont été réduites grâce à l'utilisation de matériaux isolants. Les bâtiments sont alors devenus plus performants et donc plus sensibles aux interactions avec le bâti avoisinant. Ce dernier modifie les échanges convectifs, les apports solaires [Beckers 2010b] et les apports par rayonnement en ondes longues ainsi que le rafraîchissement nocturne [Evins 2014].

L'étude du confort thermique, de l'îlot de chaleur urbain et des consommations énergétiques nécessite de développer des outils de mesure et de simulation capables de quantifier non seulement la température de l'air (îlot de chaleur urbain) et la température des surfaces (bilan thermique des bâtiments), mais aussi la température moyenne radiante (confort urbain).

Ces trois températures sont mesurées à partir de thermomètres, de thermomètres de contact [Christen 2012] et de thermomètres à globe noir [Vernon 1932]. Le développement de la télémétrie et de la thermographie est venu compléter ces outils de mesure ponctuels. Accessible au grand public à la fin des années 1960 [Barreira 2012], la thermographie est utilisée à l'échelle du bâtiment pour diagnostiquer les défauts de construction (défauts d'isolation, fuites d'air, ponts thermiques, défauts d'humidité) [Kylili 2014]. Dans l'environnement urbain, elle permet de mesurer spatialement les températures de surface à différentes échelles : bâtiments, rues et villes entières grâce à des caméras thermiques placées sur des satellites ou des drones [Lagouarde 2010] [Ghandehari 2018] [Acuña Paz y Miño 2020a] [Morrison 2021].

Cette évolution des outils de mesure appelle un progrès des outils de simulation.

1.2 Quantification des échanges par la simulation

Historiquement, la simulation des échanges thermiques a été étudiée par trois communautés scientifiques :

- Les thermiciens
- Les aérauliciens
- Les infographistes

Les thermiciens, poussés par les réglementations thermiques, ont développé des outils permettant de quantifier la conduction de chaleur à travers l'enveloppe des bâtiments. Ces outils reposent sur des méthodes nodales qui utilisent l'analogie électrique. La conduction à travers les éléments est modélisée par un réseau de nœuds liés entre eux par des résistances et des capacités. La géométrie des bâtiments est donc perdue et les résultats sont imprécis. Ces méthodes ont été généralisées à beaucoup de domaines de l'ingénierie dans les années 1960. Le passage à des méthodes géométriquement plus élaborées (méthode des éléments finis), qui s'est effectué dès les années 1970 dans les domaines de l'aéronautique et le calcul des structures, ne s'est pas encore produit dans le domaine de la thermique urbaine.

Les scientifiques qui étudient la mécanique des fluides (*Computational Fluid Dynamics*, CFD) ont développé des méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles, en particulier celles de Navier-Stokes, à partir des années 1970. Leurs méthodes sont basées sur l'utilisation des volumes finis ou des éléments finis, puisque des modèles tridimensionnels sont nécessaires [Blocken 2015].

Enfin, les spécialistes de l'image qui travaillent sur la propagation du rayonnement ont développé des méthodes numériques permettant d'approcher l'équation du rendu [Kajiya 1986]. Ces techniques ont été majoritairement développées dans le domaine du rendu réaliste [Sillion 1994]. La méthode de radiosité [Gebhart 1961] [Goral 1984] et le lancer de rayons de

type Monte-Carlo [Ward 1994] sont les deux principales techniques qui permettent de simuler le rayonnement thermique. Dans sa formulation originale, la méthode de radiosité permet de calculer l'infinitt des réflexions purement diffuses. La méthode de lancer de rayons permet de calculer un nombre limité de n'importe quel type de réflexions. Elle a progressivement pris le pas sur la méthode de radiosité, principalement grâce aux progrès des cartes graphiques et des processeurs, bien que la limitation de la radiosité sur le type de réflexion puisse être surmontée grâce à l'utilisation des facteurs de vue étendus [Sillion 1994].

Ces dernières années, ces trois communautés ont tenté de dialoguer dans le but de résoudre le problème thermique complet   l'échelle urbaine en se basant sur les outils existants qui reposent sur les méthodes nodales, la CFD et le lancer de rayons : ENVI-met et EnergyPlus [Yang 2012], OpenFoam (CFD) et Trnsys [Dorer 2013], CitySim et EnergyPlus [Thomas 2014], SOLENE-Microclimat et BuildSysPro [Merlier 2017]. Le couplage de ces méthodes conduit à des études longues en temps de calcul avec des résultats imprécis. En effet, il s'agit de coupler une méthode qui élimine la géométrie (méthode nodale) avec une méthode (CFD) qui nécessite un modèle géométrique 3D et implique des temps de calcul conséquents, ainsi qu'une méthode (lancer de rayon) qui est limitée dans la propagation du rayonnement.

La thèse propose d'aborder le problème thermique complet en utilisant la méthode des éléments finis couplée à la méthode de radiosité. Ce couplage permet d'obtenir des résultats précis tant géométriquement que physiquement et d'être naturellement compatible avec les méthodes de mécanique des fluides (CFD).

1.3  l ments finis appliqués à la thermique urbaine

La méthode des éléments finis a été développée pour des applications de l'ingénierie civile et aéronautique dans les années 1950-1960. Son application s'est ensuite étendue à des problèmes de diffusion thermique. Elle a dans un premier temps été établie pour des problèmes de conduction avec des conditions aux limites linéaires [Zienkiewicz 1965 cité par Lee 1972].

Les conditions aux limites radiatives non linéaires ont été progressivement intégrées à partir du début des années 1970 : les échanges en corps noir avec l'environnement [Richardson 1969] puis en corps gris [Lee 1971], les échanges en corps gris entre les surfaces du même domaine [Lee 1972] (basés sur les travaux de [Howell 1969]) et enfin le couplage de surfaces diffuses et spéculaires [Lee 1975]. Les problèmes étudiés étaient alors limités dans la prise en compte géométrique des échanges radiatifs en raison des limitations des puissances des ordinateurs et de méthodes de calcul du rayonnement.

Ces limitations ont été levées grâce aux travaux menés dans le domaine des images de synthèse dans les années 1980. Tout d'abord, le calcul des facteurs de vue est devenu possible dans des environnements où les faces peuvent être obstruées. Les premiers travaux portant sur le traitement des parties cachées dans la radiosité datent du milieu des années 1980 [Nishita 1985]. L'algorithme de l'hémicube est une des approches les plus connues [Cohen 1985]. De plus, le développement des algorithmes de résolution itératifs de la radiosité a permis d'augmenter la taille des modèles [Fernández 2014]. On peut citer en particulier l'algorithme de Gauss-Seidel ou de Jacobi. Le premier consiste à réutiliser dès que possible les nouvelles radiosités fraîchement calculées alors que le deuxième ajoute la contribution de chaque réflexion à chaque itération en utilisant généralement l'hypothèse de départ que la radiosité est égale à l'émission.

Ces méthodes ont permis d'améliorer la prise en compte des échanges radiatifs dans la méthode des éléments finis. Les méthodes de résolution itératives de la radiosité ont permis de découpler le problème radiatif et de traiter le rayonnement de la même manière que la convection, mais en recalculant le coefficient de convection radiatif à chaque pas de temps [Péniguel 2004]. Cette approche s'est généralisée dans les logiciels éléments finis dans les années 1990. A titre d'exemple, le logiciel Cast3M [Le Fichoux 2011], basé sur le code Syrthes anciennement TRIO-EF, utilise les algorithmes de l'hémicube et de Gauss-Seidel pour modéliser les échanges radiatifs.

L'utilisation de ces couplages est relativement récente. Ces derniers ont été utilisés dans le domaine de l'aérospatial [van Eekelen 2013] et dans le domaine de la thermique urbaine, on retrouve les travaux de [Aguerre 2020a] dans lesquels l'accent a été mis sur la réalisation de rendus graphiques.

*

Pour réaliser des études thermiques urbaines à l'aide des éléments finis, il est nécessaire de définir les conditions aux limites qui sont principalement liées aux conditions atmosphériques : le rayonnement du ciel et du soleil en ondes courtes, le rayonnement du ciel en ondes longues, la conduction de chaleur dans le sous-sol, les échanges convectifs.

Ces conditions atmosphériques sont obtenues à partir de modèles dont les données d'entrée sont disponibles dans les fichiers de données climatiques. Ces fichiers sont normalisés et proposent les données horaires sous la forme d'une année standard représentant les mesures collectées sur une trentaine d'années [Crawley 1999]. Elles sont mesurées par les stations météorologiques de nombreuses villes dans le monde [ASHRAE 2001]. On y retrouve par exemple la température de l'air, l'humidité, la couverture nuageuse, le rayonnement solaire, la vitesse et la direction du vent, ainsi que la température du sous-sol à différentes profondeurs.

*

[Perez 1993] a développé un modèle empirique du rayonnement solaire du ciel et du soleil qui permet de prendre en compte n'importe quelles conditions de ciel de manière continue et en tout lieu. Il a été établi grâce à des mesures de luminances de ciel au laboratoire de Berkeley (Etats-Unis). C'est le modèle le plus utilisé par la communauté scientifique, car il possède l'avantage de n'utiliser qu'un nombre limité de données d'entrée (mesurables et facilement accessibles). Il donne la distribution de la radiance du ciel à partir de deux données : la position du soleil et les données météorologiques. La première est obtenue à partir de la localisation de la scène, de l'heure locale et du jour de l'année (latitude, longitude, altitude et fuseau horaire) [Beckers 2010a]. La seconde concerne l'irradiance diffuse horizontale et l'irradiance directe normale. L'irradiance diffuse horizontale correspond au rayonnement provenant uniquement du ciel reçu sur un plan horizontal.

L'irradiance directe normale correspond au rayonnement provenant uniquement du soleil sur un plan orienté perpendiculairement au rayon solaire. Elles peuvent être mesurées avec un pyranomètre et un pyr géomètre, extraites des fichiers de données climatiques ou calculées pour un ciel clair avec le modèle proposé par [Liu and Jordan 1960] en considérant l'atténuation atmosphérique [Beckers 2011].

*

Le rayonnement atmosphérique de grande longueur d'onde (supérieure à 4 μm) émise par le ciel joue un rôle prépondérant sur les températures des surfaces extérieures et donc sur les consommations de chauffage et de rafraîchissement des bâtiments [Zeyghami 2018]. Le ciel peut être assimilé à un corps noir, caractérisé par sa température, ou à un corps gris à la température de l'air, caractérisé, dans ce cas, par son émissivité :

$$E_{lw} = \sigma \cdot T_{ciel}^4 = \sigma \cdot \varepsilon_{ciel} \cdot T_{air}^4 \quad (Wm^{-2}) \quad \text{Éq 1-1}$$

Les programmes de simulation de la thermique des bâtiments utilisent généralement des données météorologiques représentatives du climat local associées à une classe d'incertitude [Crawley 1999]. Le rayonnement infrarouge horizontal est associé à une incertitude supérieure à 50% et d'autre part, la température de l'air, du point de rosée ainsi que la hauteur du couvert nuageux, la couverture opaque et totale du ciel, sont associées à des incertitudes « *conformes aux instruments utilisés pour les mesurer* ». Il est ainsi préférable de déterminer l'émissivité globale du ciel à partir de ces données plutôt que d'utiliser l'irradiance horizontale diffuse. Des modèles permettant d'estimer le rayonnement en ondes longues du ciel ont donc été développés à partir de ces paramètres.

[Evangelisti 2019] propose un état de l'art sur le sujet. La plupart des modèles sont construits pour un ciel clair et seuls quelques-uns permettent de prendre en compte la couverture nuageuse. Par exemple, des logiciels de simulation thermique comme EnergyPlus ou TRNSYS utilisent respectivement les modèles de [Clark 1978] et de [Martin 1984b] [Berdahl 1984] pour estimer l'émissivité globale du ciel. Ces modèles sont basés sur les conditions météorologiques locales et considèrent le rayonnement en ondes longues du ciel

comme isotrope. En réalité, il augmente avec l'angle zénithal, en particulier pour un ciel clair et froid [Bliss 1961].

Un autre travail de Martin et Berdahl [Martin 1984a] propose une distribution angulaire de l'émissivité pour n'importe quelles conditions météorologiques. Alors que l'anisotropie du ciel dans le spectre infrarouge a été étudiée depuis le début du siècle dernier [Ångström 1915], la difficulté de la mesurer a ralenti son développement. Il existe plusieurs propositions de distribution de l'émissivité dans la littérature. Toutefois, elles sont souvent limitées à certaines conditions géographiques et, dans la plupart des cas, des études plus approfondies sont recommandées. Le travail de Martin et Berdahl présente une séquence ordonnée. Il commence par une campagne de mesures effectuée en 1979 par Berdahl et Fromberg où ils ont cherché à expliquer les caractéristiques du rayonnement thermique dans le ciel et à esquisser une relation entre l'émissivité du ciel et la température du point de rosée [Berdahl 1982]. Plus tard, ils ont montré que l'émissivité directionnelle du ciel pouvait être estimée à partir de son émissivité globale [Martin 1984a] [Martin 1984b]. La mise en œuvre de ce modèle est simple et le processus se déroule en cinq étapes :

- Calcul de l'émissivité globale du ciel clair.
- Correction pour la couverture nuageuse.
- Distribution zénithale de l'émissivité du ciel.
- Calcul de la température effective du ciel.
- Calcul du rayonnement infrarouge

Ces cinq étapes nécessitent les données suivantes (disponibles dans les fichiers de données climatiques) : pression de vapeur d'eau, humidité relative, température de l'air et couverture nuageuse. Sur la base de l'émissivité globale, la variation de l'émissivité du ciel est calculée en fonction de l'angle zénithal.

*

L'échange de chaleur par convection des surfaces des bâtiments est généralement calculé sur la base des coefficients de transfert de chaleur par convection (h , $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$). Ils sont définis par la loi de Newton qui exprime le flux thermique convectif comme le produit du coefficient

de convection par la différence de température entre l'air et la surface. Les échanges convectifs sont séparés en deux parties : à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments. À l'intérieur, les réglementations proposent des valeurs de coefficient en fonction de la paroi considérée et du sens du flux de chaleur (ascendant, horizontal, descendant). À l'extérieur, ils sont calculés à partir de modèles numériques ou empiriques influencés par plusieurs facteurs, tels que la géométrie du bâtiment, l'enveloppe du bâtiment, la rugosité de la surface du bâtiment, la vitesse et la direction du vent, les schémas d'écoulement de l'air local et les différences de température entre la surface et l'air [Mirsadeghi 2013].

*

Le confort thermique urbain présente une grande complexité du fait des conditions ambiantes. Les paramètres identifiés comme les plus influents sont : la température de l'air (humidité relative et vitesse du vent) et les flux radiatifs [Thorsson 2007]. Le confort thermique lié aux flux radiatifs repose sur le concept de la Température Moyenne Radiante (T_{mrt}) [Fanger 1972]. Cette dernière est définie comme « *la température uniforme d'une enceinte imaginaire constituée de surfaces noires dans laquelle le transfert de chaleur radiante du corps humain (avec une émissivité égale à l'unité) est égal au transfert de chaleur radiante dans l'enceinte non uniforme réelle* » [ASHRAE 2017]. Elle est calculée à partir du rayonnement reçu directement et réfléchi par l'environnement bâti comprenant le rayonnement direct et diffus en ondes courtes (ciel et soleil) et du rayonnement en ondes longues de l'environnement bâti et du ciel. De manière générale, pour la calculer précisément il est nécessaire de considérer la géométrie de la scène de manière très précise.

Une méthode permettant de mesurer la température moyenne radiante repose sur des mesures intégrales du rayonnement (*Integral radiation measurements*) [Krüger 2014] en utilisant des pyranomètres et des pyrgéomètres. Une autre méthode moins coûteuse et plus pratique consiste à utiliser un

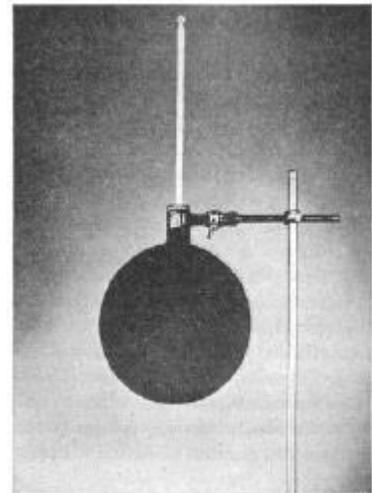


Figure 1.1 Globe noir
[Bedford 1934].

thermomètre à globe noir (Figure 1.1). Il s'agit d'une sphère noire et creuse à l'intérieur de laquelle se trouve un thermomètre [Bedford 1934]. Le globe noir étant affecté par la convection, sa réponse doit être corrigée et nécessite la mesure additionnelle de la température de l'air et de la vitesse du vent [Thorsson 2007].

Des méthodes d'imagerie sont également utilisées pour mesurer la T_{mrt} [Tamura 2001] [Lindberg 2008]. [Acuña Paz y Miño 2020b] propose une méthode reposant sur l'utilisation de photographies et de thermographies pour mesurer directement la T_{mrt} . Le principe est de capturer des images de l'environnement urbain dans six directions différentes couvrant un angle solide de 4π stéradians. Le résultat spatialisé permet d'évaluer l'influence de chaque élément de la scène sur la T_{mrt} , ce qui permet une meilleure compréhension de son comportement énergétique. La méthode 4π est présentée comme une alternative pour évaluer l'environnement radiant dans une scène complexe dont les conditions climatiques changent rapidement. Contrairement au globe noir, cette méthode d'imagerie utilise des capteurs de radiance, contournant ainsi l'influence de la convection. Pour tenir compte de la discrimination spectrale, les rayonnements en ondes courtes et en ondes longues sont mesurés séparément, le premier par photographie et le second par thermographie.

*

Les moyens de mesure et les outils de simulation disponibles aujourd'hui permettent d'étudier les géométries complexes générées par les scènes urbaines à condition que l'influence du vent soit limitée.

Chapitre 2

Méthode et Cadre

L'objectif de ce chapitre est de montrer le cadre établi durant cette thèse pour mener à bien des études thermiques urbaines. Le solveur éléments finis Cast3M [Le Fichoux 2011] est utilisé pour réaliser le calcul thermique. Il a été créé et développé par le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) pour des applications de calcul de structure et d'énergie nucléaire. Il est gratuit et en accès libre pour la recherche scientifique. Le cadre comporte le prétraitement et le post-traitement du calcul. Le prétraitement porte sur la gestion de la géométrie et de son maillage ainsi que sur la spécification des conditions aux limites. Le post-traitement concerne les différentes représentations des résultats.

Dans ce chapitre, nous décrivons cet ensemble sur des exemples de plus en plus complexes. Nous commençons par montrer les exemples de conduction et de convection dans des situations simples à deux dimensions qui facilitent la représentation de certaines grandeurs de la thermique (gradients, flux). Ensuite, le rayonnement infrarouge et le rayonnement solaire sont introduits pour une cavité en trois dimensions. Pour finir, l'étude thermique d'une rue idéalisée est présentée.

Le maillage et le calcul sont réalisés dans Cast3M[®], le prétraitement et le post-traitement dans des procédures écrites par l'auteur en utilisant le logiciel Matlab[®].

2.1 Transfert de chaleur par conduction : rectangle 2D

Dans cette section, nous introduisons le phénomène de conduction de chaleur et le rôle de la conductivité thermique des matériaux sur la distribution des températures. Les notions de gradient thermique, de flux de chaleur, de flux généralisé et de flux imposé sont explicitées.

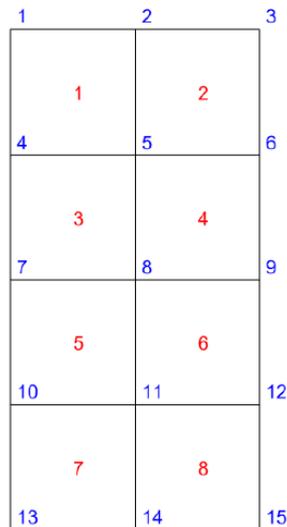


Figure 2.1 Numérotation des nœuds et des éléments du maillage.

Le modèle éléments finis est constitué d'un rectangle deux fois plus haut que large composé de carrés d'un mètre de côté (Figure 2.1). Une seule conductivité thermique (k , $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) par élément est spécifiée. Les éléments finis sont des quadrilatères à quatre nœuds et leurs fonctions de forme sont bilinéaires (carreaux de Coons, [Coons 1967]).

Nous imposons d'abord des températures sur les bords horizontaux avec une différence de 50 K entre le haut et le bas du rectangle. Le maillage comporte 10 x 20 éléments et la conductivité thermique a une valeur constante de $1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ (Figure 2.2). En régime permanent, le système à résoudre s'écrit [Lewis 2004] :

$$[K]\{T\} = 0 \quad \text{Éq 2-1}$$

avec $[K]$ la matrice de conductivité globale et $\{T\}$ le vecteur des températures nodales.

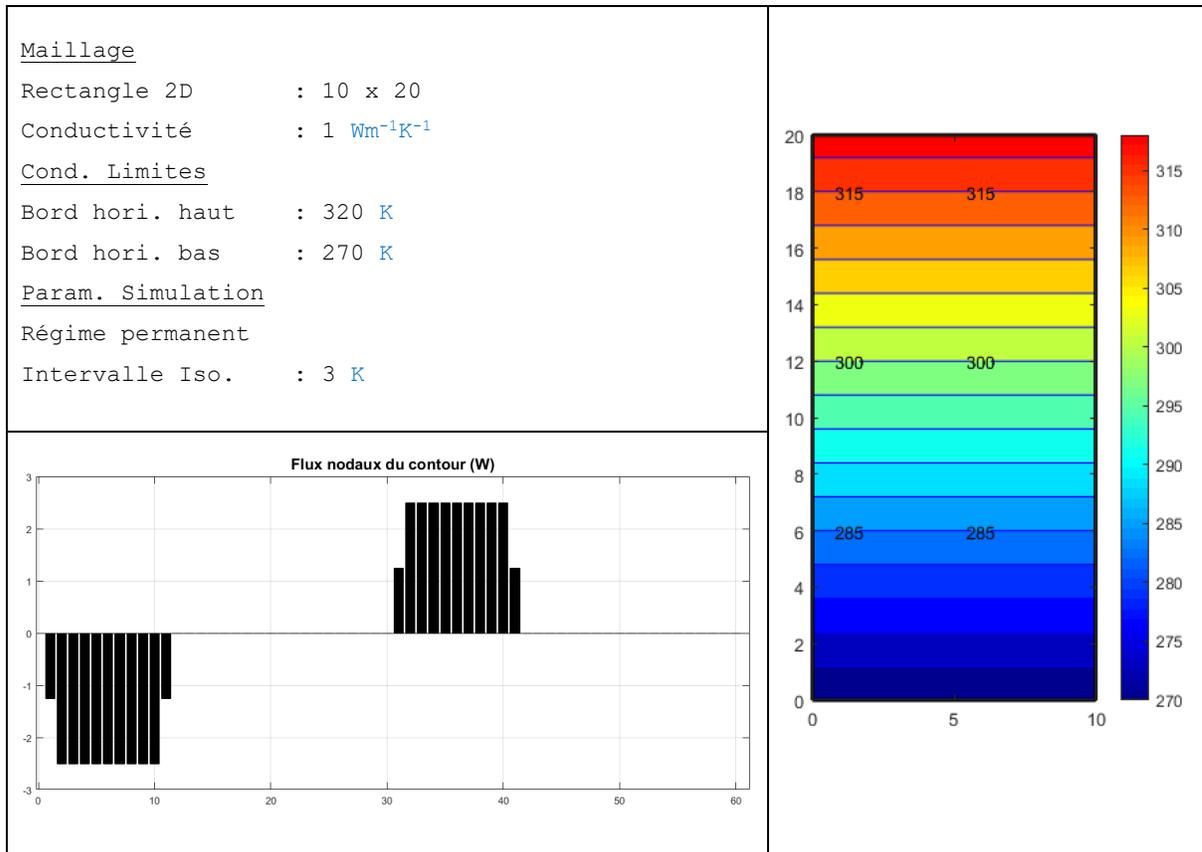


Figure 2.2 Températures imposées produisant un gradient vertical constant.

La résolution de cette équation ne comprenant que des températures imposées s'effectue comme suit : les températures imposées sont divisées en deux ensembles de dimensions nb , le premier au début du vecteur des températures nodales et le second à la fin. La variable nb désigne le nombre de nœuds de chaque bord horizontal dont la température est fixée. La taille de la matrice à inverser est égale à nu (nombre de nœuds dont la température est inconnue). La matrice de conductivité globale est divisée en 9 sous-matrices. Les nb températures fixées sont mémorisées dans le vecteur $\{T_3\}$ pour le bord horizontal inférieur et dans $\{T_1\}$ pour le bord horizontal supérieur.

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \quad [K] \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{Bmatrix} = 0$$

$$\{T_2\} = [K_{22}]^{-1}(-[K_{23}]\{T_3\} - [K_{21}]\{T_1\}) \quad \text{Éq 2-2}$$

On obtient un gradient vertical constant entre les températures supérieures et inférieures. Les lignes isothermes sont représentées avec un pas de 3 K. Comme les bords verticaux sont adiabatiques, elles leur sont orthogonales.

Pour les nœuds du domaine, les flux généralisés sont calculés en multipliant la matrice de conductivité globale $[K]$ par le vecteur des températures $\{T\}$. Ils représentent les flux de chaleur entrant et sortant ; leur somme est nulle. Sur la Figure 2.2, les nœuds du contour sont représentés en commençant par le nœud en bas à gauche puis en parcourant le contour dans le sens antihoraire. En faisant la somme de ces flux pour chaque bord, on obtient -25 W pour le bord inférieur, 25 W pour le bord supérieur et 0 W pour les bords verticaux.

La Figure 2.3 montre les gradients thermiques et les flux de chaleur. Les premiers représentent la variation du champ de température. Ils sont calculés et dessinés au centre de chaque élément. Leur longueur est proportionnelle à la valeur de leur module. Les seconds sont obtenus par application de la loi de Fourier :

$$\vec{q} = -k \vec{\nabla} \tau \quad [Wm^{-2}] \quad \text{Éq 2-3}$$

Dans cet exemple, les températures ne sont imposées que sur une partie des bords horizontaux. Les trois derniers nœuds du bord inférieur sont fixés à 270 K et les trois premiers nœuds du bord supérieur à 320 K. Le maillage comporte 16×32 éléments.

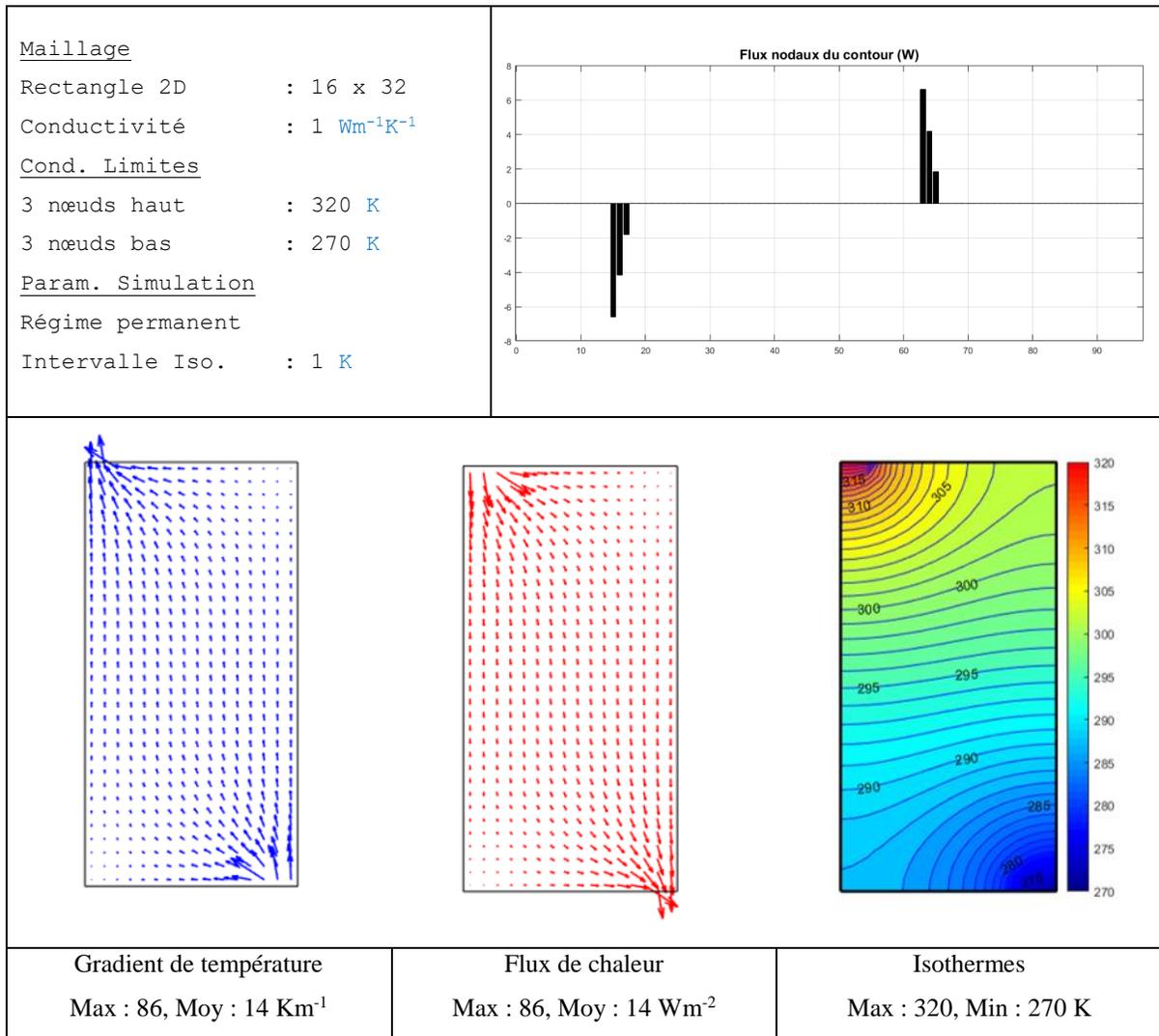


Figure 2.3 Température imposée sur une partie des bords horizontaux.

*

Dans les exemples suivants, nous nous intéressons à l'influence de la conductivité thermique et nous créons un pont thermique ainsi qu'une isolation. Nous procédons avec le même maillage et les mêmes conditions aux limites que dans le cas précédent. La conductivité des éléments d'une bande verticale est multipliée par 1000 pour créer un pont thermique (Figure 2.4). Le flux de chaleur atteint son maximum au voisinage des zones soumises aux

conditions aux limites ainsi qu'au centre du pont thermique. Cela s'explique par le fait que la chaleur emprunte toujours le chemin le plus facile.

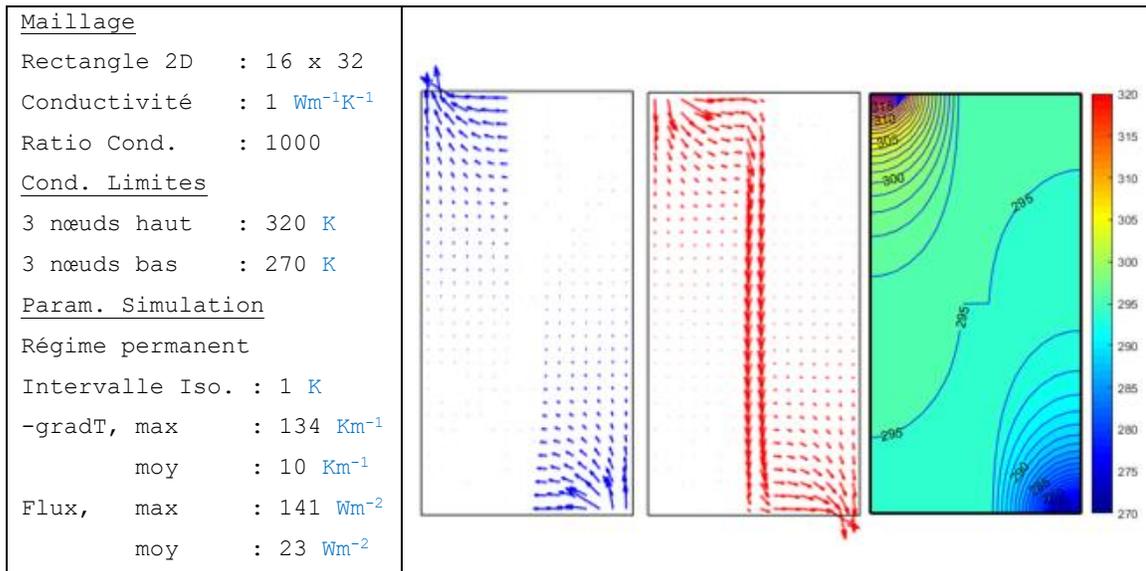


Figure 2.4 Pont thermique.

Dans l'exemple de la Figure 2.5, la conductivité des éléments de la bande verticale est divisée par 10 pour créer un isolant thermique. La chaleur est bloquée de part et d'autre de la bande verticale. Le gradient de température y est maximal, le flux de chaleur y est quasi nul et les isothermes y sont déviées.

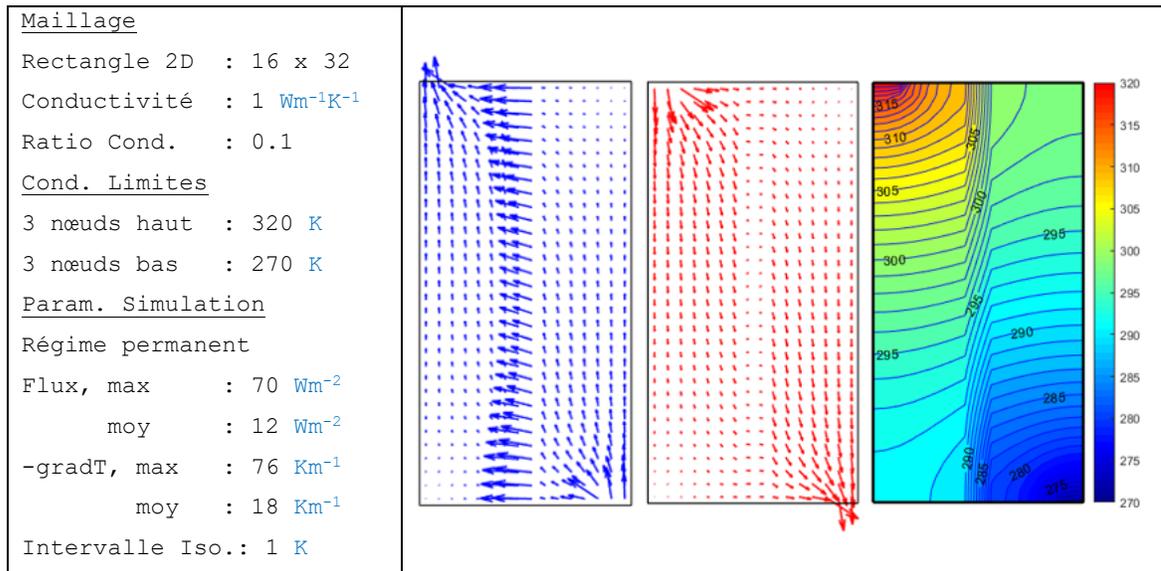


Figure 2.5 Isolant thermique.

Les flux nodaux imposés sont considérés comme des charges (conditions aux limites de type Neumann). Ils interviennent dans le second membre du système d'équations. Pour l'exemple de la Figure 2.6, on impose une température constante sur le bord inférieur (273 K) et un flux constant sur le bord vertical gauche (25 W). Le maillage comporte 20 x 40 éléments. L'équation à résoudre s'écrit :

$$[K]\{T\} = \{Q\} \quad \text{Éq 2-4}$$

Avec $\{Q\}$ le vecteur des flux nodaux, dont les termes sont non nuls sur les nœuds du bord gauche. Cette équation se résout de la même manière que l'Éq 2-2 (partition de matrice).

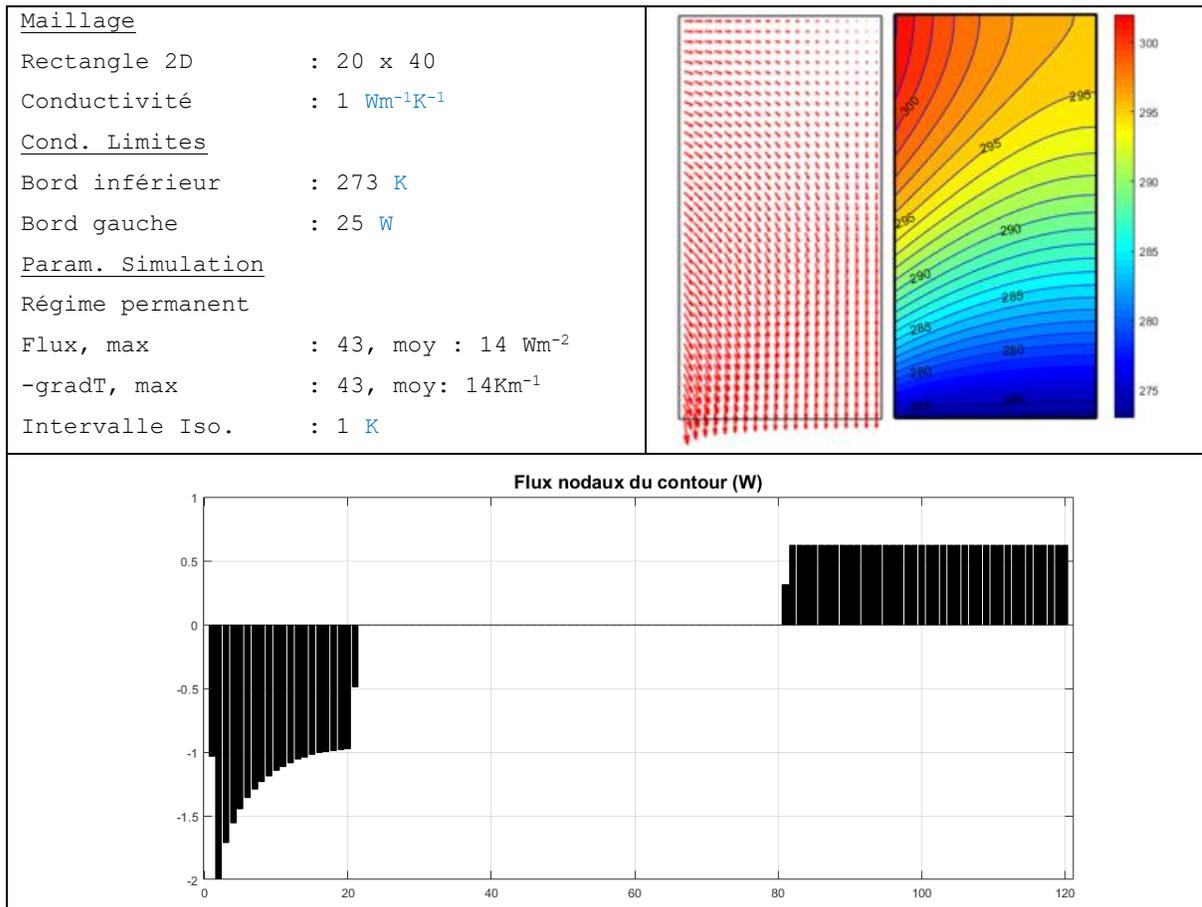


Figure 2.6 Flux imposé sur le bord vertical de gauche et température imposée sur le bord horizontal inférieur.

Comme le bord supérieur et le bord droit sont adiabatiques, les isothermes leur sont orthogonales. Chaque nœud du bord vertical gauche reçoit un flux constant de 0.625W, sauf les nœuds des extrémités qui reçoivent la moitié, c'est-à-dire 0.3125 W. Dans le calcul du second membre du système d'équations (flux généralisés), il y a une ambiguïté pour le nœud du coin inférieur gauche qui reçoit un flux de 0,3125 W, mais émet aussi un flux réactif car sa température est fixée. C'est la somme des deux qui est affichée dans l'histogramme.

2.2 Transfert de chaleur par convection : cavité 2D

Dans cette section, nous introduisons les échanges de chaleur par convection avec des nœuds virtuels correspondant à l'air. La température des nœuds virtuels peut être imposée ou libre.

2.2.1 Echange convectif extérieur

Les échanges de chaleur entre un fluide à une température T_{air} et une surface à une température T_s sont régis par la loi de Newton :

$$\varphi = hA (T_s - T_{air}) [W] \quad \text{Éq 2-5}$$

Avec h le coefficient d'échange convectif ($Wm^{-2}K^{-1}$) et A l'aire de la face (m^2).

La partie de ce flux qui dépend de la température de la face (T_s) est ajoutée à la matrice de conductivité $[K]$ du système matriciel et la seconde partie, qui dépend de la température du fluide, est ajoutée au vecteur du second membre $\{Q\}$. Le système matriciel à résoudre en présence de flux convectifs s'écrit alors :

$$[K_{cond} + K_{conv}]\{T\} = \{Q\} \quad \text{Éq 2-6}$$

Avec K_{cond} la matrice de conductivité et K_{conv} la matrice de conductivité pour la convection du domaine.

Le transfert de chaleur par convection est illustré avec une cavité 2D dont les éléments sont des carrés d'un mètre de côté (Figure 2.7). Les températures de l'air extérieur sont imposées sur les bords verticaux avec une différence de 30 K (Figure 2.8). On désigne par nx le nombre d'éléments sur le côté du domaine et par n_{th} le nombre

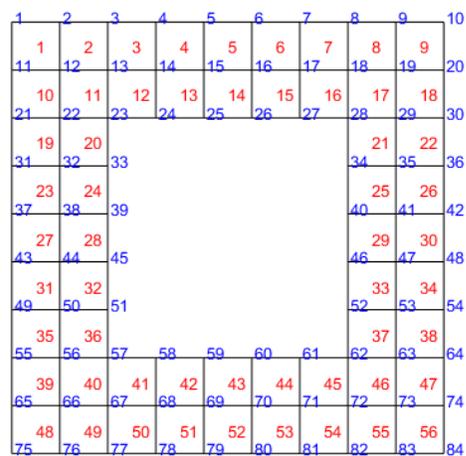


Figure 2.7 Numérotation des nœuds et des éléments du maillage d'une cavité 2D.

d'éléments dans l'épaisseur. Sur la Figure 2.7, $nx = 9$ et $nth = 2$. Les coefficients d'échange convectifs sur les bords verticaux de gauche et de droite sont égaux respectivement à $5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ et $20 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Les bords horizontaux sont adiabatiques.

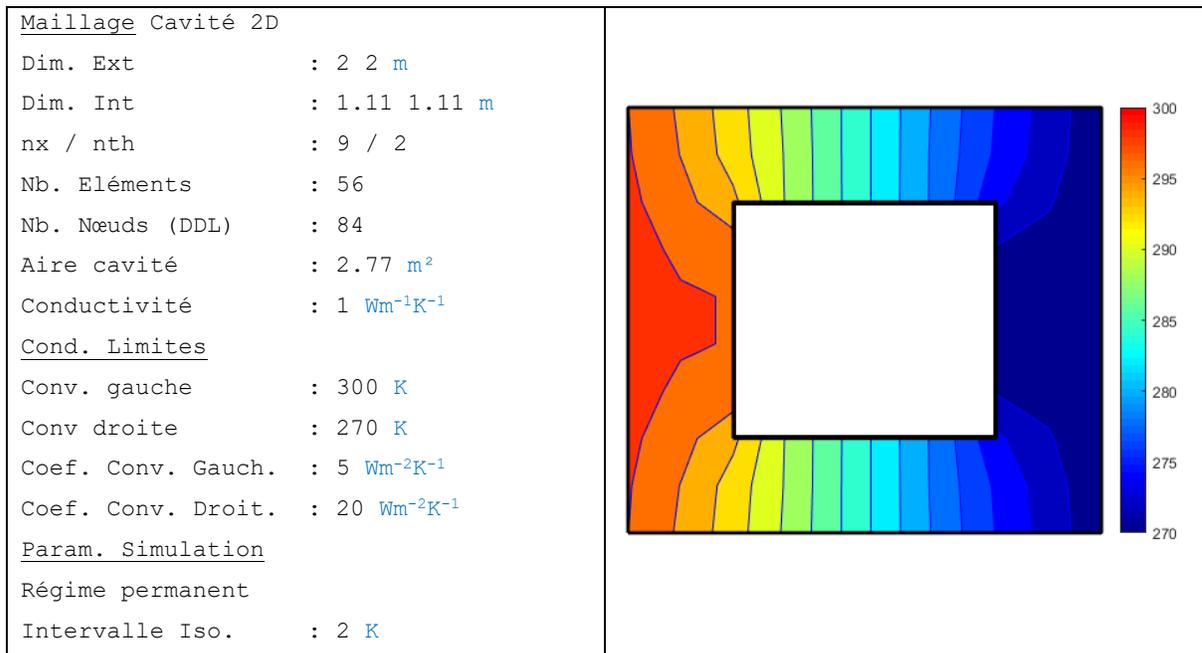


Figure 2.8 échanges convectifs sur les bords verticaux extérieurs.

*

La température de l'air extérieur et le coefficient d'échange convectif peuvent varier dans le temps et selon la géométrie. Dans les deux exemples de la Figure 2.9, la température de l'air et le coefficient h varient selon la hauteur de la cavité. Dans le premier exemple, seule la température imposée du fluide varie (270 K – 300 K) inversement sur les bords verticaux. Pour les deux bords verticaux, le coefficient de convection est égal à $20 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Le maillage est raffiné ($nx = 45$, $nth = 10$) pour obtenir une meilleure distribution de la température. Les lignes isothermes sont symétriques du fait du chargement et orthogonales aux bords horizontaux.

Sur le deuxième exemple, le coefficient h du bord vertical droit varie selon la température de l'air ($h = \frac{2}{3}(T_{air} - 270) \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$). Plus la température de l'air augmente, plus le coefficient d'échange augmente. La température de l'air varie entre 300K et 270K et le coefficient h entre 20 et 0 $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. La température des nœuds est plus élevée dans la zone du coin inférieur droit que dans le cas précédent, puisque les flux convectifs dans cette zone sont plus faibles.

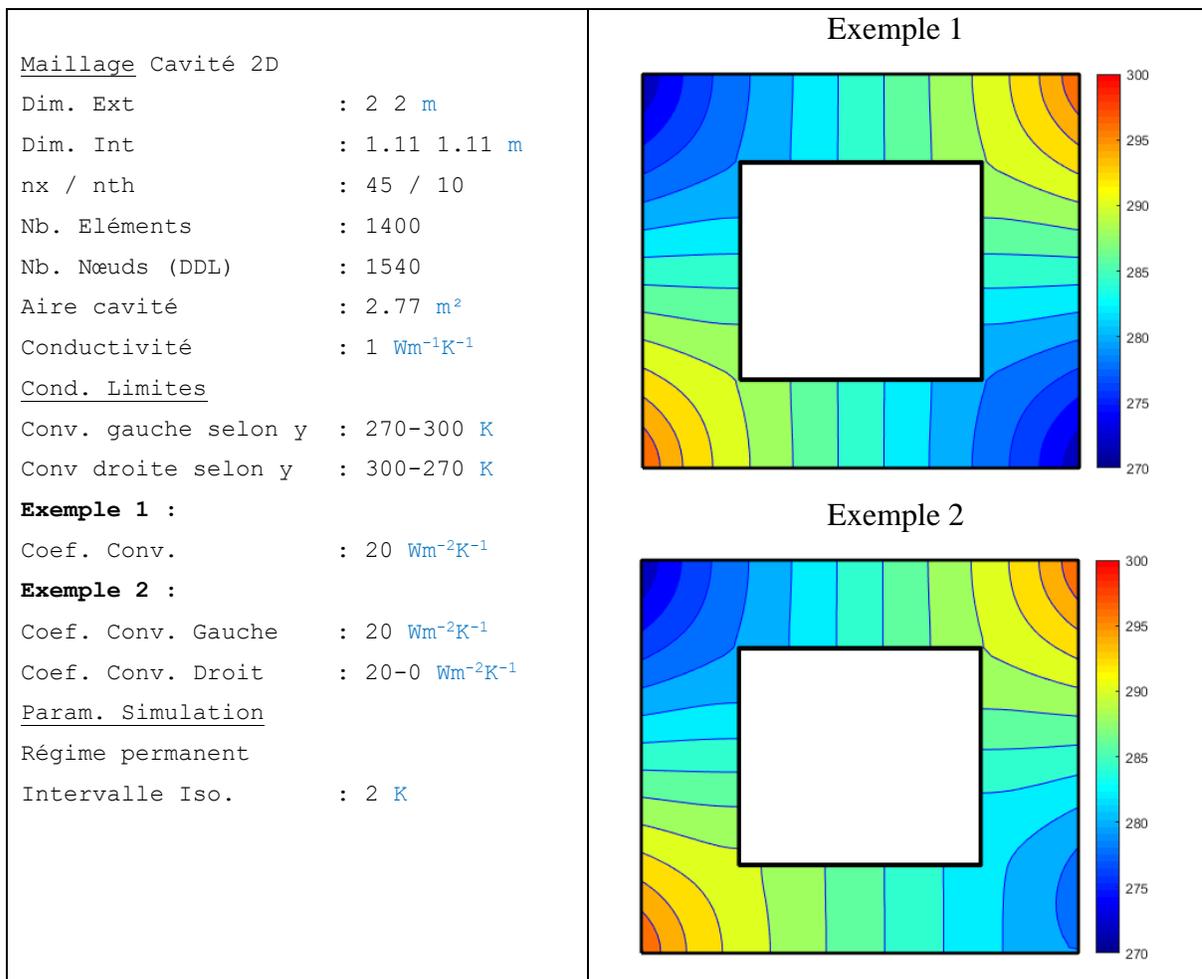


Figure 2.9 échanges convectifs avec température de l'air et coefficient h variables.

2.2.2 Échange convectif intérieur

Dans ce travail, nous utilisons la température de l'air intérieur des bâtiments comme paramètre d'évaluation et nous présentons la méthode utilisée pour la calculer.

La température de l'air est supposée uniforme dans chaque intérieur de bâtiment. Les surfaces intérieures échangent entre elles par rayonnement infrarouge et avec l'air intérieur par convection. Pour connaître cette dernière, il faut modéliser des échanges convectifs sans fixer la température du fluide (Éq 2-5). Ce type d'échange n'est pas implanté dans Cast3M. Nous choisissons donc d'utiliser la méthode décrite dans [Beckers 2019a].

La température de l'air à l'intérieur d'une cavité est assimilée à celle d'un nœud virtuel. Des éléments incluant ce nœud sont créés. Les numéros de ces éléments sont représentés en rose sur la Figure 2.10. Chaque segment se trouvant sur le bord intérieur de la cavité donne lieu à un élément fini à trois nœuds. Chaque élément possède une matrice de conductivité qui dépend du coefficient d'échange convectif. Avec cette définition, la température du nœud virtuel (représentant l'air contenu dans la cavité) peut être fixée ou laissée libre. Les matrices de conductivité de l'ensemble des éléments sont assemblées et ajoutées à la matrice de conductivité globale du système.

Dans l'exemple de la Figure 2.11, les échanges convectifs sont présents sur toute la frontière du domaine, avec des températures de l'air intérieur et extérieur imposées à 270 K et 300 K respectivement. Le coefficient de convection est égal à $18 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Le maillage comporte 1400 éléments conductifs et 100 éléments convectifs. Le nombre de nœuds est égal à $1540 + 1 = 1541$.

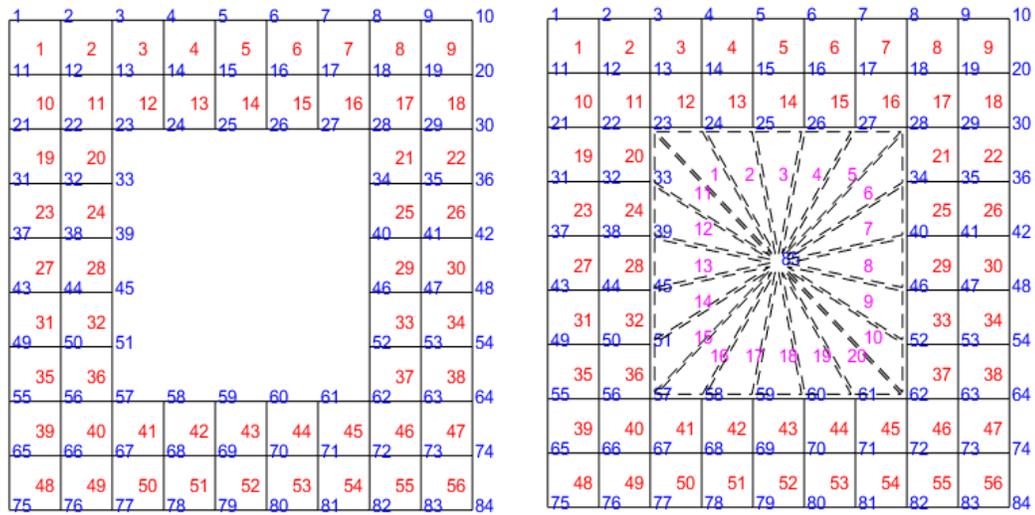


Figure 2.10 Représentation des éléments convectifs intérieurs.

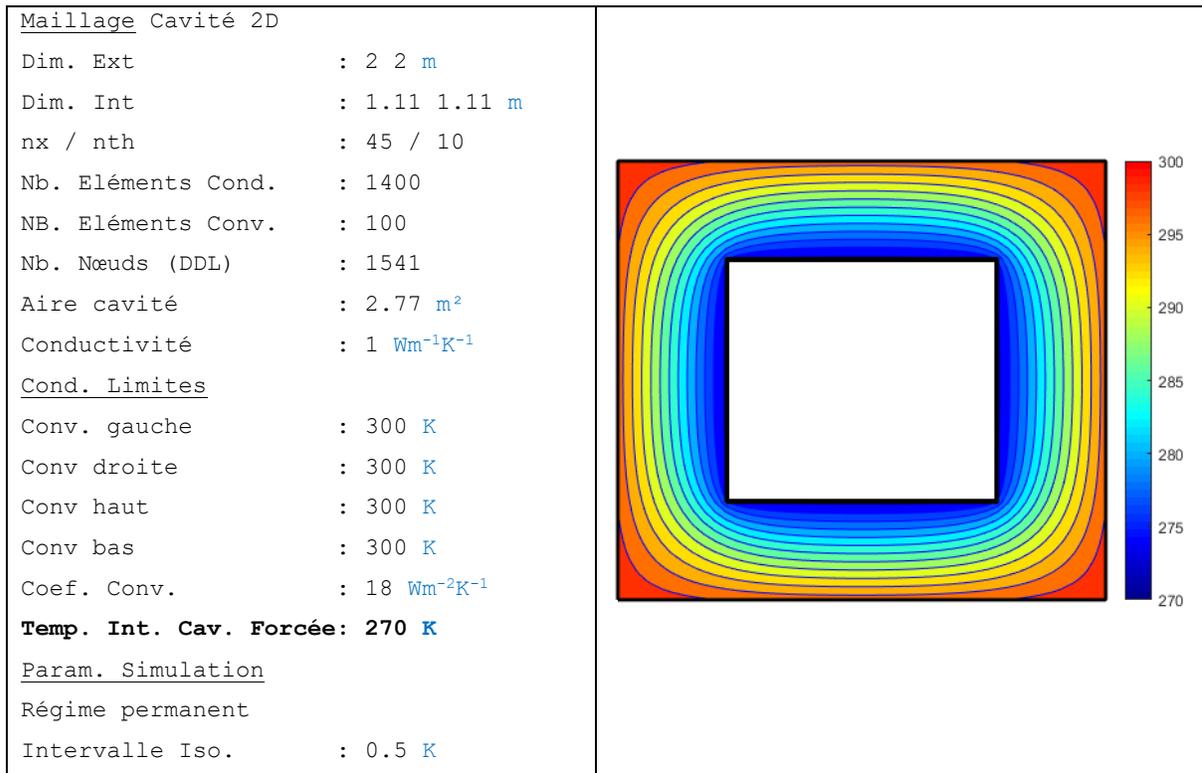


Figure 2.11 échanges convectifs avec température de l'air imposée partout.

Dans l'exemple de la Figure 2.12, la température de l'air intérieur est libre. La température de l'air extérieur est différente pour chaque bord extérieur. La température calculée de l'air intérieur est égale à 292.5 K. On retrouve la moyenne des quatre températures imposées de l'air extérieur $T_{air\ int} = \left(\frac{280+300+295+295}{4}\right) = 292.5\ K$.

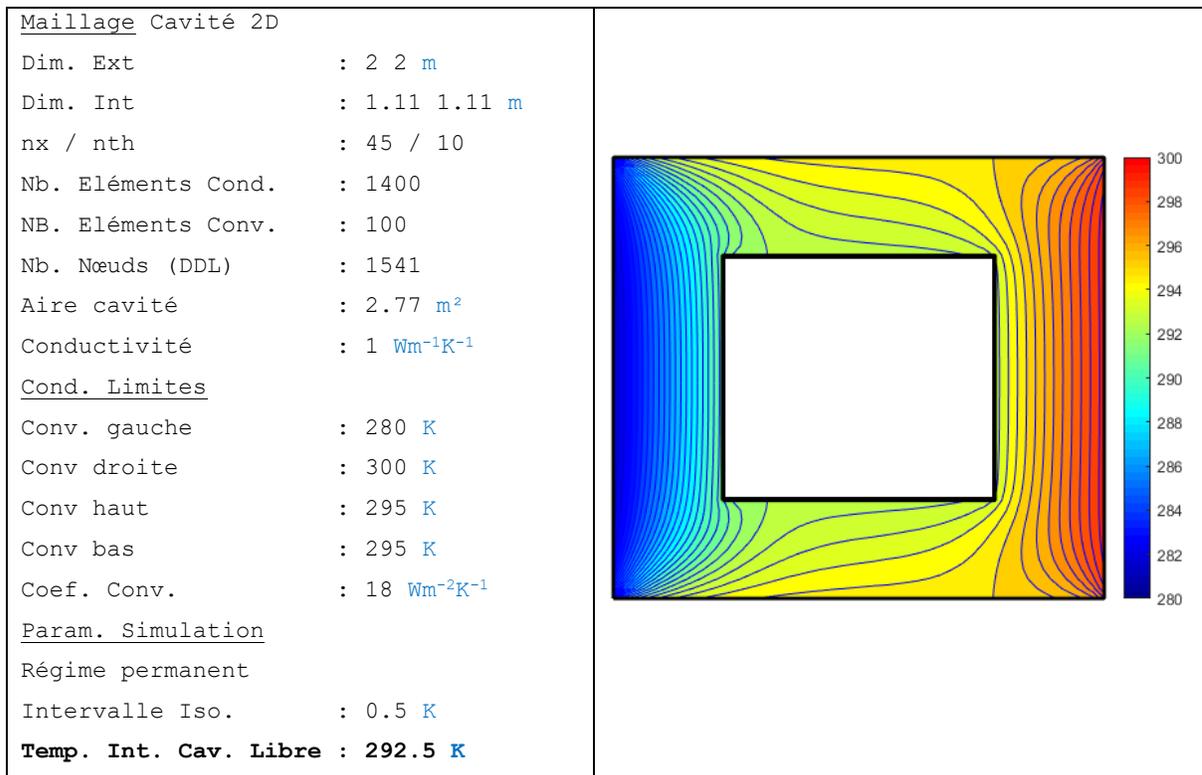


Figure 2.12 échanges convectifs avec température de l'air imposée à l'extérieur et libre à l'intérieur.

2.3 Transfert de chaleur par rayonnement : cavité 3D

Nous introduisons dans cette section les échanges par rayonnement infrarouge ($\lambda > 4 \mu\text{m}$). Nous présentons dans un premier temps la méthode générale pour prendre en compte ces échanges, puis, dans un second temps, les modifications que nous avons apportées pour étudier les applications qui nous intéressent. Nous finirons par montrer, sur une cavité fermée en trois dimensions, l'influence sur les températures de surfaces des échanges par rayonnement en ondes longues.

2.3.1 Méthode générale

On suppose que les faces sont opaques au rayonnement infrarouge. L'émission et la réflexion sont parfaitement diffuses (ou lambertiennes). Les propriétés radiatives sont indépendantes de la longueur d'onde. L'émissivité et l'absorptivité sont égales (loi de Kirchhoff). Les échanges radiatifs sont calculés en utilisant la méthode de radiosité qui effectue un bilan d'énergie radiative sur les faces rayonnantes.

Les paramètres du problème radiatif sont la température de surface T (K), la radiosité B (Wm^{-2}), l'irradiance E (Wm^{-2}), et la densité de flux net rayonné ϕ (Wm^{-2}). La radiosité représente le flux sortant par unité de surface émis, réfléchi et transmis [Sillion 1994]. Pour une face i , elle s'écrit :

$$B_i = \varepsilon_i \sigma T_i^4 + (1 - \varepsilon_i) E_i \quad \text{Éq 2-7}$$

Avec ε_i l'émissivité de la face i et $\sigma = 5.67032 * 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ la constante de Stefan Boltzmann.

L'irradiance représente le flux reçu par unité de surface. Pour une face i , elle s'écrit :

$$E_i = \sum_{j=1}^N F_{ij} B_j \quad \text{Éq 2-8}$$

Avec N le nombre de faces de la cavité et F_{ij} le facteur de vue entre la face i et la face j .
Le flux net pour une face i est la différence entre la radiosité et l'irradiance :

$$\phi_i = (B_i - E_i) \quad \text{Éq 2-9}$$

En écrivant la radiosité pour chaque face élémentaire de la cavité, on obtient un système linéaire d'équations dont les inconnues sont les radiosités. Sous forme matricielle ce système s'écrit :

$$B = \epsilon \sigma T^4 + (I - \epsilon)FB \quad \text{Éq 2-10}$$

B est un vecteur contenant les radiosités de chaque face, ϵ est la matrice diagonale des émissivités $\epsilon_{ij} = \epsilon_i \delta_{ij}$ (la matrice δ_{ij} est carrée, de dimension N et est égale à l'unité sur sa diagonale et nulle partout ailleurs), T est le vecteur température et F est la matrice carrée de dimension N^2 des facteurs de vue. On peut reformuler l'équation 2.10 sous la forme suivante :

$$(I - (I - \epsilon) F) B = \epsilon \sigma T^4 \quad \text{Éq 2-11}$$

Dans Cast3M, la résolution de ce système est réalisée de manière itérative en utilisant la méthode de radiosité [Goral 1984] et l'algorithme de Gauss-Seidel [Bulik 1997]. Cet algorithme consiste à réutiliser dès que possible les nouvelles radiosités fraîchement calculées afin d'accélérer la convergence du calcul. Pour calculer la matrice des facteurs de vue, l'algorithme de l'hémi-cube est utilisé [Cohen 1985].

Une fois les radiosités connues, on utilise un coefficient d'échange par rayonnement, comme dans la convection. Pour cela, une variable $T_{rad,i}$ est introduite [Rupp 1997] [Coulon

2006]. Elle représente la température uniforme d'une enceinte fictive radiative de corps noir qui entraînerait le même échange net d'énergie radiatif avec le patch i que l'environnement radiatif réel. Elle est calculée à partir de l'irradiance des faces. Pour une face i , on a :

$$E_i = \sigma T_{rad,i}^4 \qquad T_{rad,i} = (1/\sigma E_i)^{1/4} \qquad \text{Éq 2-12}$$

En remplaçant dans l'expression du flux net, on obtient :

$$\begin{aligned} \phi_i &= B_i - E_i = \varepsilon_i \sigma T_i^4 + (1 - \varepsilon_i) E_i - E_i = \varepsilon_i (\sigma T_i^4 - E_i) \\ \phi_i &= \varepsilon_i \sigma (T_i^4 - T_{rad,i}^4) \end{aligned} \qquad \text{Éq 2-13}$$

En linéarisant cette expression, on obtient :

$$\phi_i = h_{rad,i} (T_i - T_{rad,i}) \qquad \text{Éq 2-14}$$

Avec :

$$h_{rad,i} = \varepsilon_i \sigma (T_i^2 + T_{rad,i}^2) (T_i + T_{rad,i})$$

$h_{rad,i}$ ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) représente le coefficient d'échange linéarisé entre l'enceinte fictive et la face i .

Ce flux est traité de la même manière qu'un flux convectif. La partie qui dépend de la température de la face est ajoutée à la matrice globale de conductivité et l'autre partie est ajoutée au second membre. À cause de la linéarisation du flux, le coefficient d'échange doit être mis à jour au cours des itérations.

L'équation matricielle à résoudre en présence de convection forcée et de rayonnement thermique dans la cavité, s'écrit :

$$[K_{cond} + K_{conv} + K_{rad}]\{T\} = \{Q\} \quad \text{Éq 2-15}$$

2.3.2 Modification de la méthode générale

Pour nos applications, nous avons apporté deux changements à la méthode générale, l'un portant sur l'algorithme itératif de la méthode de radiosité et l'autre sur le calcul de la matrice des facteurs de vue.

Pour le premier changement, nous avons remplacé l'algorithme de Gauss-Seidel par l'algorithme de Jacobi [Saad 2003]. Ce dernier consiste à calculer une approximation des radiosités itérativement en utilisant l'hypothèse de départ que la radiosité est égale à l'émission. Chaque nouvelle itération correspond à une nouvelle réflexion. Un nombre d'itérations t maximum doit être fixé pour que le calcul s'arrête.

$$B^t = M + RFB^{t-1} \quad \text{Éq 2-16}$$

$$B_i^t = M_i + \rho_{d,i} \sum_{j=1}^N F_{ij} B_j^{t-1}$$

Avec M la matrice d'exitance, R la matrice des réflectances diffuses et $\rho_{d,i}$ le coefficient de réflexion diffus de la face i .

Pour le second changement, le calcul des facteurs de vue est externalisé (en dehors de Cast3M), selon les travaux développés dans [Bugeat 2020]. Cette externalisation a deux avantages : surmonter la principale limitation de la méthode de radiosité, qui est son incapacité

à modéliser des faces qui réfléchissent autrement que de manière parfaitement diffuse, et surmonter la limitation concernant le nombre de faces rayonnantes.

Le premier avantage repose sur le concept des facteurs de vue étendus [Sillion 1989, 1994]. Ces derniers permettent de prendre en compte la transmittance régulière (ou *directe*) et la réflexion régulière (ou *spéculaire*) dans la méthode de radiosité. Dans nos travaux, les faces sont considérées comme opaques au rayonnement infrarouge. Nous ne parlons alors que de réflexion spéculaire dans cette section. En revanche, dans la section 2.6 *Rayonnement en ondes courtes : cavité 3D avec fenêtre*, qui introduit le rayonnement solaire, la transmittance régulière sera prise en compte.

Le facteur de vue étendu F_{ij}^{ext} contenant l'ensemble des réflexions spéculaires est introduit :

$$B_i = M_i + \rho_{d,i} \sum_{j=1}^N F_{ij}^{ext} B_j \quad \text{Éq 2-17}$$

F_{ij}^{ext} est défini comme la fraction de la radiosité produite par réflexion ou par émission par la face j reçue par la face i directement et/ou après une ou plusieurs réflexions spéculaires. Il peut être décomposé en deux parties :

$$F_{ij}^{ext} = F_{ij} + S_{ij} \quad \text{Éq 2-18}$$

F_{ij} est le facteur de vue classique et S_{ij} est définie comme la fraction de la radiosité produite par la face j reçue par la face i seulement après une ou plusieurs réflexions spéculaires. Elle représente la partie du facteur de vue étendu correspondant aux réflexions autres que parfaitement diffuses. Dans le calcul des facteurs de vue, lorsque les rayons sont émis depuis chaque face, si un rayon intersecte une face possédant une réflectance spéculaire, sa trajectoire est prolongée et son poids est diminué en fonction des caractéristiques de la face intersectée.

Dans ce travail, nous nous limitons, pour l'ensemble du spectre, à un seul type de réflexion par face (soit diffus soit spéculaire).

Le second avantage repose sur l'utilisation des algorithmes de lancer de rayons pour calculer les facteurs de vues étendus. Ces derniers utilisent la bibliothèque de programmes performants et *open-source* Embree, développés par Intel en C++ optimisé pour les unités centrales de traitement (*CPU, Central Processing Unit*) [Wald 2014]. Embree permet de lancer une quantité conséquente de rayons dans un temps limité. Dans le programme développé par [Bugeat 2020], la vitesse est de 24 millions de rayons par seconde avec un ordinateur portable équipé d'un processeur Intel i7 de 7^{ème} génération. En utilisant la méthode de l'hémi-cube avec un algorithme du type z-buffer [Bulik 1997], le calcul des facteurs de vue d'une cavité fermée de 43 200 faces prend 3.6 h dans Cast3M. Le même calcul prend 10min avec notre programme en lançant 200 000 rayons par face. Dans cette configuration géométrique, le calcul des facteurs de vue dans Cast3M est limité à 50 000 faces sur un ordinateur portable classique, principalement pour des raisons de stockage des données.

Pour éviter les problèmes de mémoire, la matrice des facteurs de vue est introduite dans Cast3M sous forme creuse (*sparse*) [Aguerre 2017]. Ce format tire avantage du grand nombre de zéros présents dans la matrice. Au lieu de mémoriser l'intégralité des termes de la matrice, on ne garde que les termes non nuls. Cela permet de réduire la taille de la mémoire utilisée et d'accélérer le calcul. Sur l'étude pendant 24 h d'une rue canyon avec 23 000 faces rayonnantes, la taille de la mémoire utilisée est divisée par cinq et le temps de calcul par neuf.

2.3.3 Rayonnement en ondes longues dans une cavité fermée

Dans cette section, on étudie l'influence des échanges par rayonnement en ondes longues dans une cavité 3D fermée. Dans un premier temps, nous montrons comment ces échanges modifient la répartition de l'énergie. Le rayonnement du corps noir est ensuite comparé au rayonnement d'un corps gris et, pour finir, la réflexion diffuse est comparée à la réflexion spéculaire.

La cavité en béton mesure 4 m de largeur, 6 m de profondeur et 3 m de hauteur. Le maillage est composé exclusivement d'hexaèdres à huit nœuds (fonctions de forme tri linéaires). Trois éléments sont modélisés dans l'épaisseur des parois. Comme on le verra dans la dernière section de ce chapitre, ce nombre d'éléments est nécessaire pour représenter le comportement quadratique de la température et ainsi assurer la convergence du calcul. La Figure 2.13 représente deux maillages de finesses différentes.

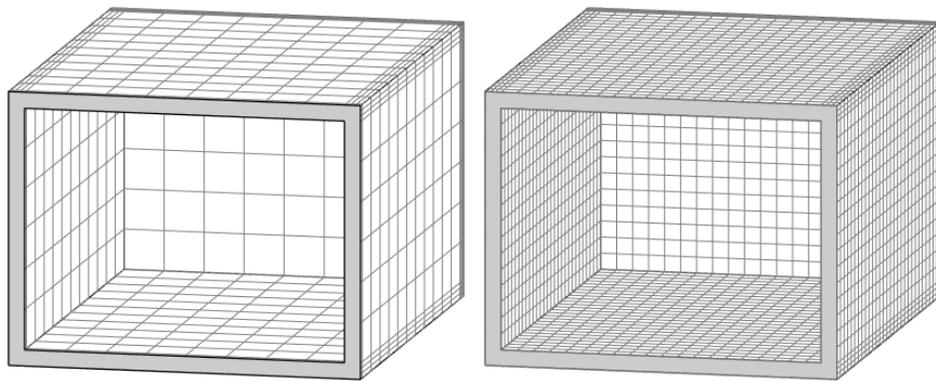


Figure 2.13 Maillage d'une cavité fermée avec des éléments de 0.5 m de côté à gauche et de 0.2 m à droite.

Afin d'illustrer la contribution des échanges radiatifs en ondes longues sur les températures de surface dans la cavité, deux cas sont comparés (Figure 2.14), le premier sans échanges en ondes longues et le second avec. La cavité est modélisée avec des éléments de 20 cm de côté et une épaisseur de 0.2 m. Le maillage comprend 10 656 hexaèdres et 14 264 nœuds. La peau intérieure comprend 2 700 faces. Les températures des faces supérieures et inférieures sont fixées respectivement à 293 K et 273 K. Les surfaces verticales de la peau extérieure sont adiabatiques. Les échanges par rayonnement en ondes longues sont modélisés à l'intérieur de la cavité (peau intérieure) en supposant des corps noirs ($\epsilon = 1$). La matrice des facteurs de vue

est remplie à 81.54 %. Cela provient du fait que les faces se trouvant dans le même plan ne se voient pas.

Les échanges radiatifs intérieurs ont pour effet d'homogénéiser les températures de surface. Les surfaces chaudes, comme le toit, se refroidissent, alors que les surfaces froides, comme le sol, se réchauffent. La température des parois verticales devient plus homogène et tend vers la moyenne des températures imposées.

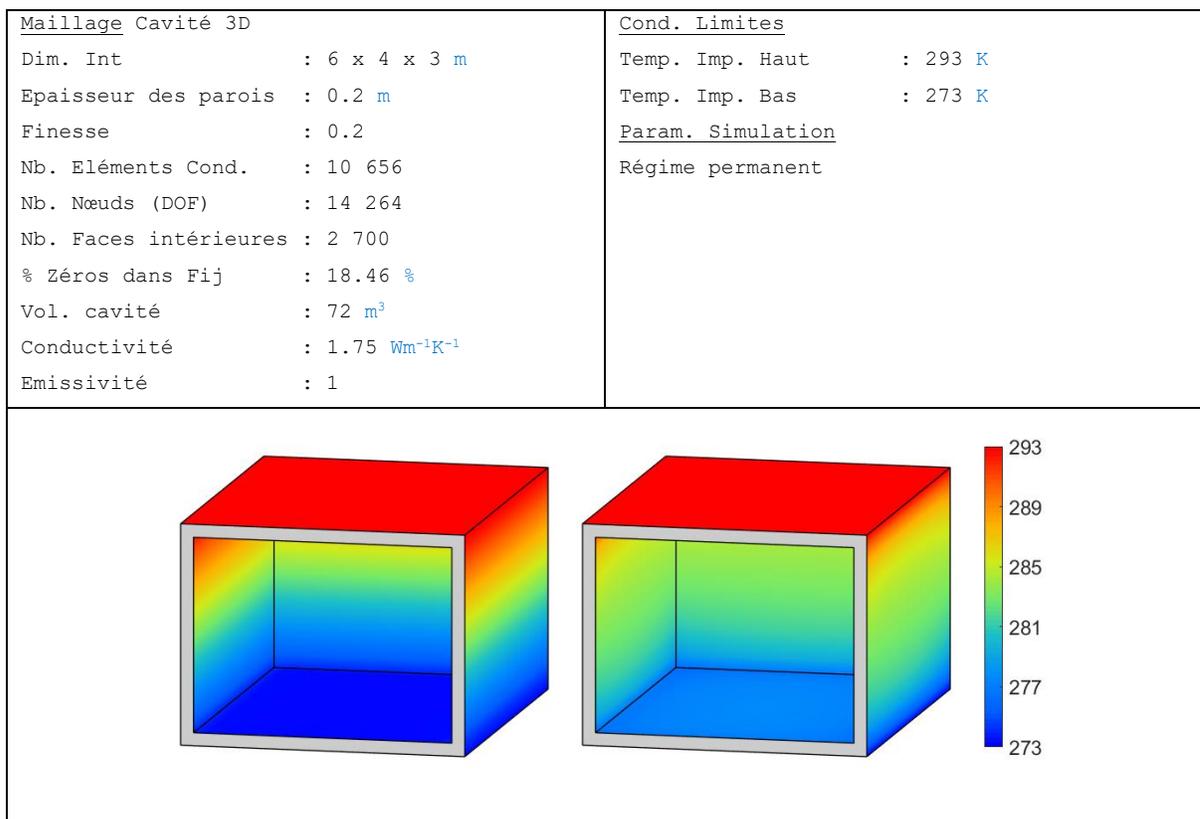


Figure 2.14 échanges radiatifs intérieurs en ondes longues.

*

Dans l'exemple de la Figure 2.15, les échanges de corps noir sont comparés avec des échanges de corps gris. Dans le premier cas, les faces absorbent tout le rayonnement qu'elles reçoivent alors que, dans le second cas, elles réfléchissent dans toutes les directions une partie

du rayonnement reçu et absorbent l'autre partie. Ainsi, les paramètres de l'exemple précédent sont repris, en changeant l'émissivité des faces (0.8) et la réflectance (0.2).

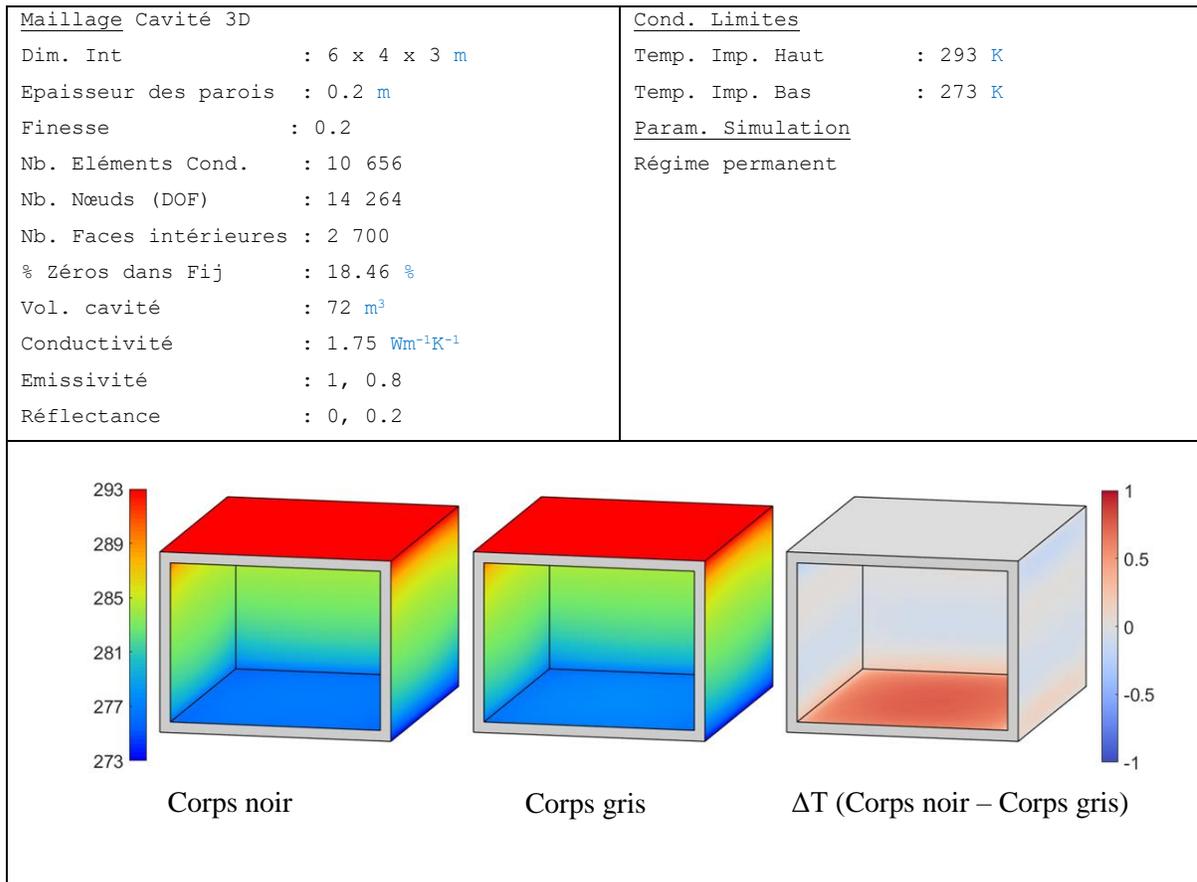


Figure 2.15 échanges radiatifs en ondes longues dans un corps noir et un corps gris.

Les plus grandes différences se situent au niveau du plancher et du plafond. Dans le cas du corps noir, la différence de température entre le plafond et le plancher est de 11.3 K. Dans le cas du corps gris, elle est de 12.7 K. Autrement dit, le plancher et le plafond sont respectivement plus chauds et plus froids dans le cas du corps noir que dans celui du corps gris. Cela s'explique par le fait que le plafond du corps noir émet plus d'énergie et se refroidit donc plus. Pour le plancher, c'est l'inverse, il reçoit moins d'énergie dans le cas du corps gris et se réchauffe donc moins. Dans ce cas, l'influence de la réflexion diffuse est limitée.

*

L'influence de la réflexion spéculaire dans cette configuration est étudiée. Le maillage utilisé est le même que dans les exemples précédents. Le sol est adiabatique, la température du toit est fixée à 323 K et les murs sont soumis à des échanges convectifs avec un coefficient de convection égal à $10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ et une température de l'air fixée à 273 K.

La peau intérieure est divisée en deux parties. La première, appelée S_{vitrage} (1/6^{ème} de la surface intérieure de gauche, Figure 2.16), est modélisée avec les propriétés radiatives d'un vitrage ($\epsilon = 0.8$, $\rho_r = 0.2$). La seconde, appelée $S_{\text{béton}}$, correspond au reste des faces de la peau et est modélisée avec les propriétés radiatives d'un béton rugueux ($\epsilon = 0.95$, $\rho_d = 0.05$).

Trois modèles sont définis et comparés (Figure 2.16) :

- Modèle 1 : réflexion diffuse pour l'ensemble des faces.
- Modèle 2 : réflexion diffuse pour $S_{\text{béton}}$ et réflexion spéculaire pour S_{vitrage} .
- Modèle 3 : Propriétés du vitrage remplacées par celles de l'aluminium ($\epsilon = 0.1$, $\rho_r = 0.9$).

Réflexion diffuse pour $S_{\text{béton}}$, réflexion spéculaire pour S_{vitrage} .

La première comparaison concerne les modèles 1 et 2 et montre l'influence de la réflexion spéculaire. Celle-ci produit deux phénomènes. Tout d'abord, elle concentre l'énergie reçue du plafond sur le sol, ce qui provoque une augmentation de sa température. Ensuite, puisque cette énergie est dirigée vers le sol, les murs verticaux reçoivent moins d'énergie, ce qui entraîne une diminution de leur température.

La deuxième comparaison concerne les modèles 2 et 3. Dans le modèle 3, les propriétés du vitrage sont remplacées par celles de l'aluminium. Les faces de S_{vitrage} réfléchissent donc de manière spéculaire quasiment toute l'énergie qu'elles reçoivent. C'est pourquoi on voit une augmentation de la température du sol par rapport au modèle 2. De plus, puisqu'elles n'absorbent que très peu l'énergie radiante qu'elles reçoivent, elles sont fortement influencées par le flux convectif de l'air extérieur. C'est pourquoi elles ont une température plus basse. L'aluminium agit comme un isolant radiatif et la température des éléments est principalement conditionnée par la convection et la conduction.

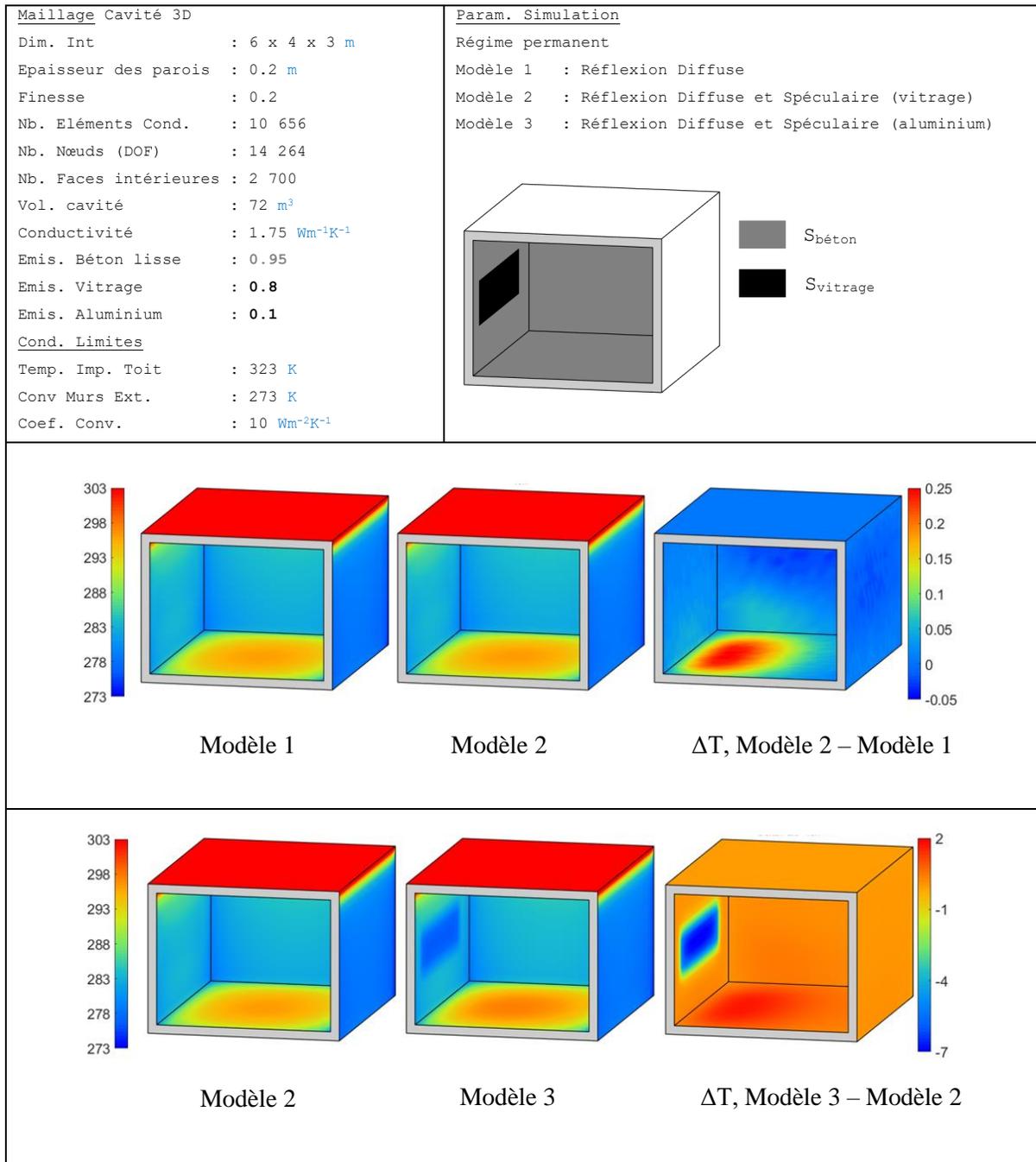


Figure 2.16 Influence de la réflexion spéculaire des faces radiatives en ondes longues.

2.4 Convection intérieure en trois dimensions

Avant de montrer des exemples en régime transitoire et en trois dimensions, nous présentons la modélisation des éléments convectifs avec un nœud virtuel en trois dimensions. En effet, dans [Beckers 2019a], seul le problème en deux dimensions est traité.

Ces éléments ne sont plus des éléments à trois nœuds, mais des éléments pyramidaux à cinq nœuds. Leur matrice de conductivité est liée à une face de la peau intérieure de la cavité (quatre ou trois nœuds), et au nœud virtuel représentant la température de l'air.

En régime permanent, la fonctionnelle s'écrit :

$$\langle I(\tau) = \int_{\Omega} \frac{1}{2} k(\text{grad } \tau)^T \cdot \text{grad } \tau \, d\Omega + \frac{1}{2} \int_S h(\tau - \tau_{air})^2 \, dS + \int_{S_2} \bar{q} \tau \, dS_2 \rangle \text{ minimum} \quad \text{Éq 2-19}$$

Dans sa partie convective $I_{el} = \frac{1}{2} \int_S h(\tau - \tau_{air})^2 \, dS$, la température de l'air τ_{air} est supposée uniforme.

Le champ de températures est discrétisé comme la géométrie (élément isoparamétrique). On utilise les coordonnées paramétriques s et t . Pour passer des coordonnées cartésiennes aux coordonnées paramétriques ou *vice versa*, on utilise le jacobien de la transformation $J = \left\| \frac{\partial P}{\partial s} \times \frac{\partial P}{\partial t} \right\|$.

La température d'une face à quatre nœuds se discrétise comme suit :

$$\tau_{face} = T_1(1-s)(1-t) + T_2s(1-t) + T_3st + T_4(1-s)t = [\beta][T] \quad \text{Éq 2-20}$$

Le champ de températures dépend des fonctions de forme de la face (matrice uni ligne $[\beta]$) et des quatre températures nodales (matrice unicolonne $[T]$).

En remplaçant dans le terme convectif de la fonctionnelle, on obtient :

$$I_{face} = \frac{1}{2} \int_S h \left([\beta_1 \ \beta_2 \ \beta_3 \ \beta_4] \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} - \tau_{air} \right)^2 dS \quad \text{Éq 2-21}$$

Une nouvelle définition de la distribution de la température est introduite du fait de la prise en compte du nœud virtuel avec la notation $\tau_{air} = T_{air}$:

$$\tau_{pyr} = \beta_1 T_1 + \beta_2 T_2 + \beta_3 T_3 + \beta_4 T_4 - T_{air} \quad \text{Éq 2-22}$$

De cette expression, on en déduit pour un élément pyramidal :

$$[\beta_e] = [\beta_1 \ \beta_2 \ \beta_3 \ \beta_4 \ -1] ; [T_e]^T = [T^T \ T_{air}] \quad \text{Éq 2-23}$$

La fonctionnelle discrétisée s'écrit pour un élément :

$$\begin{aligned} I_{pyr} &= \frac{1}{2} h \int_0^1 \int_0^1 ([\beta][T] - T_{air})^2 J(s, t) ds dt \\ &= \frac{1}{2} h \int_0^1 \int_0^1 ([\beta_e][T_e])^2 J(s, t) ds dt \end{aligned} \quad \text{Éq 2-24}$$

Avec $J(s, t)$ le déterminant du jacobien.

Sous forme matricielle, on a :

$$I_{pyr} = \frac{1}{2} h [T_e]^T \left\{ \int_0^1 \int_0^1 [\beta_e]^T [\beta_e] J(s, t) ds dt \right\} [T_e] \quad \text{Éq 2-25}$$

La matrice de convection de l'élément pyramidal (WK^{-1}) s'écrit :

$$K_h = h \int_0^1 \int_0^1 [\beta_e]^T [\beta_e] J(s, t) ds dt \quad \text{Éq 2-26}$$

Pour une face rectangulaire de dimensions ($a \times b$), on obtient :

$$[K_h] = h \frac{ab}{36} \begin{bmatrix} 4 & 2 & 1 & 2 & -9 \\ 2 & 4 & 2 & 1 & -9 \\ 1 & 2 & 4 & 2 & -9 \\ 2 & 1 & 2 & 4 & -9 \\ -9 & -9 & -9 & -9 & 36 \end{bmatrix} \quad \text{Éq 2-27}$$

L'utilisation des carreaux de Coons permet de prendre en compte les faces triangulaires (rectangles dégénérés) ainsi que les faces non planes.

Chaque face de la peau intérieure de la cavité donne lieu à un élément pyramidal convectif et donc à une matrice de convection. Ces matrices sont assemblées et ajoutées à la matrice de conductivité du système global. Cinq éléments convectifs sont schématiquement représentés sur la Figure 2.17.

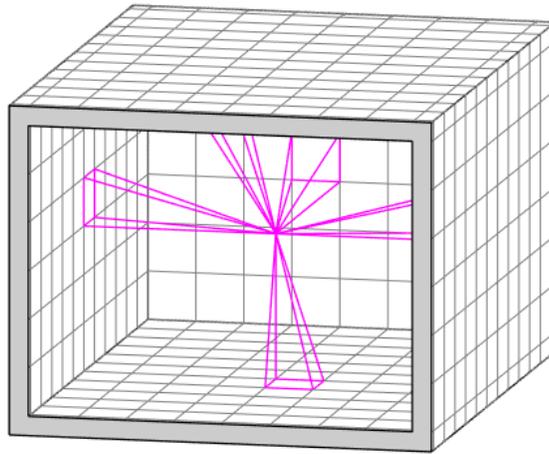


Figure 2.17 Éléments convectifs en trois dimensions.

Pour prendre en compte l'inertie thermique de l'air intérieur, la méthode des capacités concentrées (*Lumped Heat Capacity*) est utilisée [Lewis 2004]. L'inertie thermique de l'air est concentrée sur le nœud virtuel en faisant la somme des matrices de capacité élémentaires des éléments convectifs. Elle est égale à $\rho c_p V$ (J K^{-1}) avec $\rho = 1.413 \text{ kgm}^{-3}$, $c_p = 1005 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ et V (m^3) le volume de la cavité.

2.5 Régime transitoire

Pour réaliser des études en régime transitoire, il faut introduire la variable temporelle et d'autres quantités physiques, telles que la densité du matériau (ρ , kgm^{-3}) et sa capacité thermique massique (c_p , $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$). La capacité thermique massique est la capacité thermique du matériau rapportée à sa masse. Elle représente l'énergie qu'il faut transmettre à un kilogramme de ce matériau pour augmenter sa température d'un degré Kelvin. La diffusivité thermique α d'un matériau, exprimée en m^2s^{-1} , représente sa tendance à faciliter la diffusion de la chaleur (une « bonne » diffusivité thermique correspond à une valeur faible et une « mauvaise » diffusivité thermique correspond à une valeur élevée).

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad \text{Éq 2-28}$$

Pour introduire le temps dans l'équation de la chaleur, on définit la matrice $[C]$ (JK^{-1}). Elle est fonction de la densité, de la capacité thermique massique et du volume du matériau.

Le problème transitoire est résolu pas à pas dans Cast3M en utilisant un schéma aux différences finies (développement en séries de Taylor). L'équation matricielle discrétisée de l'équation de la chaleur s'écrit :

$$\begin{aligned} ([C] + \theta \Delta t [K]) \{T\}^{n+1} \\ = ([C] - (1 - \theta) \Delta t [K]) \{T\}^n + \Delta t (\theta \{Q\}^{n+1} + (1 - \theta) \{Q\}^n) \end{aligned} \quad \text{Éq 2-29}$$

La valeur $\theta = 1$ correspond au schéma implicite, qui est inconditionnellement stable.

$$\frac{1}{\Delta t} [C] (\{T\}^{n+1} - \{T\}^n) + [K] \{T\}^{n+1} = \{Q\}^{n+1} \quad \text{Éq 2-30}$$

Pour résoudre le problème transitoire, il faut définir une condition initiale, c'est-à-dire donner les températures des nœuds du maillage au temps $n = 0$ ($\{T\}^{n=0}$). Dans nos applications, cette condition initiale est déterminée en résolvant le premier pas de temps en régime permanent.

*

En régime transitoire, il convient d'utiliser de nouvelles représentations graphiques pour vérifier et interpréter les résultats. La solution transitoire est intimement liée à l'inertie thermique des matériaux. Pour illustrer ce phénomène, nous comparons le comportement d'un béton de granulats plein avec celui d'un béton cellulaire léger.

Le modèle éléments finis correspond à la cavité utilisée dans les sections précédentes (finesse du maillage égale à 0.2, trois éléments dans l'épaisseur des parois). La peau extérieure de la cavité est soumise à un flux convectif avec une température de l'air qui varie selon une sinusoïde de période de 24 h, d'amplitude 20 K centrée sur 273.15 K. La température de l'air intérieur de la cavité est libre. Les températures initiales sont obtenues en résolvant le premier pas de temps en régime permanent. Le calcul est réalisé toutes les heures pendant 48 h (Figure 2.18).

<u>Maillage Cavité 3D</u>		<u>Béton cellul.</u>		<u>Cond. Limites</u>	
Dim. Int	: 6 x 4 x 3 m	Conductivité	: 0.4 Wm ⁻¹ K ⁻¹	Conv Murs Ext. Sinu.	: 263-283 K
Epaisseur des parois	: 0.2 m	Capacité mass.	: 880 J.kg ⁻¹ K ⁻¹	Coef. Conv. Ext	: 20 Wm ⁻² K ⁻¹
Finesse	: 0.2	Masse vol.	: 400 kg.m ⁻³	Coef. Conv. Int	: 10 Wm ⁻² K ⁻¹
Nb. Eléments Cond.	: 10 656	Diffusivité	: 2.10 ⁻⁶ m ² s ⁻¹	<u>Param. Simulation</u>	
Nb. Nœuds (DOF)	: 14 264 + 1			Régime transitoire	
Nb. Faces intérieures	: 2 700			Durée de simulation : 48 h	
Vol. cavité	: 72 m ³			Nomb. d'itérations : 48	
<u>Béton plein</u>				Temp. Initiales : 283.15 K	
Conductivité	: 1.75 Wm ⁻¹ K ⁻¹				
Capacité mass.	: 940 J.kg ⁻¹ K ⁻¹				
Masse vol.	: 2300 kg.m ⁻³				
Diffusivité	: 8.10 ⁻⁷ m ² s ⁻¹				

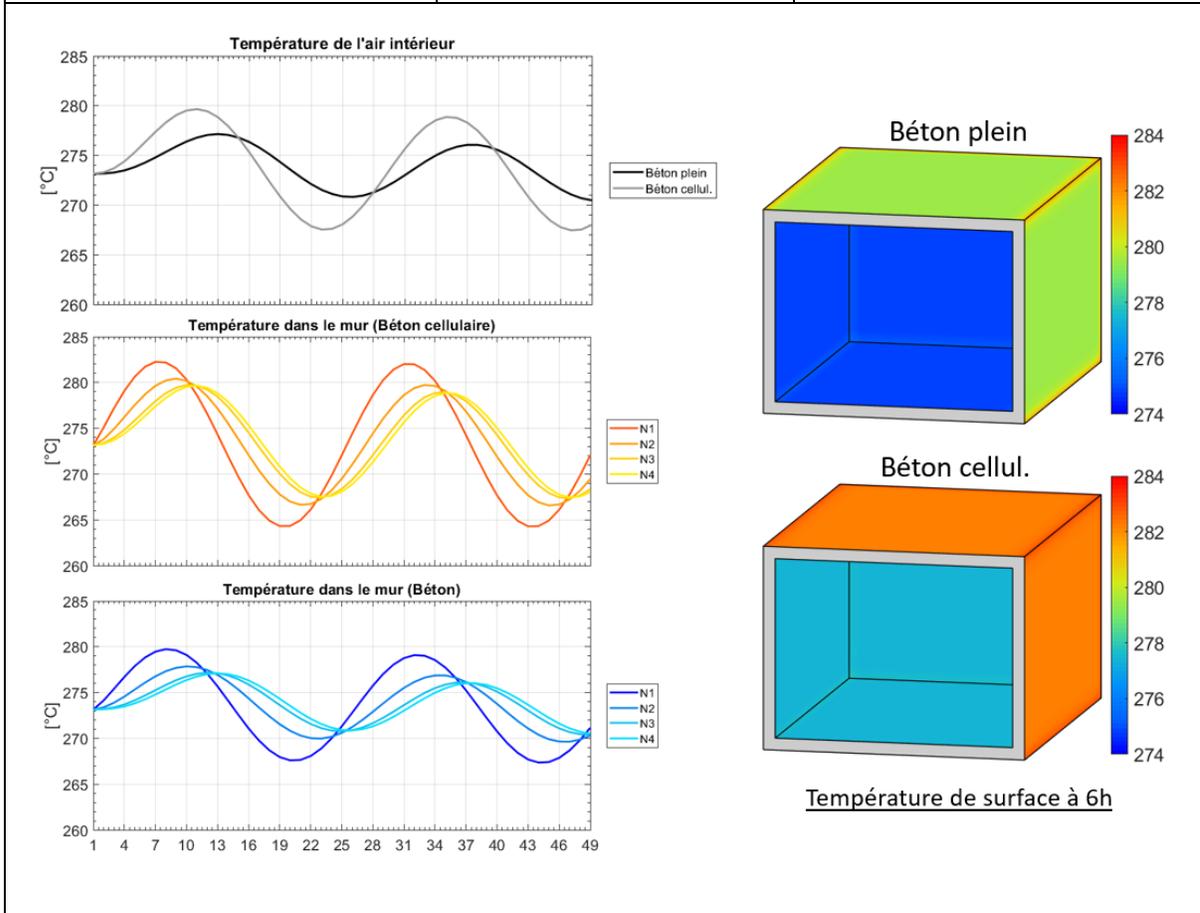


Figure 2.18 Régime transitoire avec flux convectifs sur la peau extérieure.

Le premier graphe montre les températures de l'air intérieur en fonction du matériau. Dans le cas du béton lourd, la courbe de la température de l'air a une amplitude quasiment deux fois plus faible que celle du béton léger et ses extremums sont décalés de trois heures. Cela provient du fait que le béton lourd a une plus faible diffusivité que le béton léger. La température de l'air intérieur est influencée par convection par les températures de surface de la peau intérieure. La convection est influencée par la diffusion de chaleur à travers les parois par conduction. Ainsi, pour mieux comprendre le décalage dans les courbes de température de l'air, les températures des nœuds dans un mur vertical sont représentées pour chaque matériau. Les courbes N1 représentent la température du nœud à l'extérieur du mur et les courbes N4 celle du nœud à l'intérieur du mur. Les courbes de température du béton lourd ont également une amplitude plus faible que celles du béton léger. Dans les deux cas, plus le nœud est situé proche de l'intérieur de la cavité, plus la courbe de température diminue en amplitude et ses extremums sont déphasés dans le temps. On peut noter que pour les nœuds N1, les extremums ont lieu exactement au même moment pour les deux matériaux. En revanche, plus les nœuds se rapprochent de l'intérieur, plus le déphasage entre les deux matériaux est important.

De plus, la température du nœud N1 augmente plus vite dans le cas du béton léger que dans celui du béton lourd. On peut voir une différence de presque trois degrés sur la peau extérieure entre les deux matériaux au bout de six heures de simulation. Cela s'explique par le fait que le béton lourd a une capacité thermique plus grande que le béton léger, ce qui lui permet d'emmagasiner plus d'énergie et de monter en température plus lentement.

2.6 Rayonnement en ondes courtes : cavité 3D avec fenêtre

Dans cette section, nous présentons une partie du prétraitement permettant de déterminer les flux solaires absorbés par les faces de la scène. Nous l'illustrons par la suite avec l'étude d'une cavité 3D possédant une fenêtre.

*

Le soleil, dont la surface peut être traitée comme un corps noir à 5780 K, émet une énergie qui, à la surface de la Terre, est divisée presque également entre le visible et le proche infrarouge ($\lambda < 4 \mu\text{m}$). Une partie du rayonnement est diffusée par le ciel, qui peut être considéré comme une source secondaire d'illumination, avec des caractéristiques spectrales similaires. On peut séparer les spectres d'émission du soleil et du ciel d'une part, et les surfaces de la scène d'autre part (y compris l'atmosphère, modélisée comme une voûte) : 99 % de l'énergie rayonnée est inférieure à $4 \mu\text{m}$ pour la première (ondes courtes), et supérieure pour la dernière (ondes longues) [Beckers 2016].

Une fois cette distinction faite entre les spectres, la première étape de notre environnement consiste à calculer la quantité de rayonnement du ciel et du soleil absorbée par chaque face de la scène en ondes courtes. Pour ce faire, nous partons des travaux développés dans [Bugeat 2020] et de la méthode de radiosité [Goral 1984]. Cette méthode implique que la scène soit discrétisée en un maillage de surface (modèle 3D surfacique). Dans notre cas, la peau du modèle utilisé pour le calcul par éléments finis (modèle volumique 3D) constitue le maillage de l'environnement bâti. Le ciel est également discrétisé en un nombre fini d'éléments. À la différence du bâti, ces éléments ne sont pas des éléments de surface mais des éléments d'angle solide. Le ciel est assimilé à un hémisphère partitionné, selon la méthode proposée par [Beckers 2012], en 5000 carreaux d'angles solides égaux et avec le meilleur rapport d'aspect possible (Figure 2.19). Cette partition est utilisée dans tous les cas (ondes courtes et ondes longues).

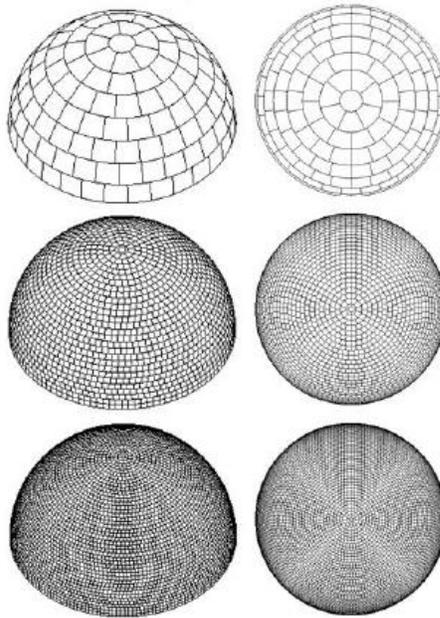


Figure 2.19 Trois partitions de l'hémisphère en 145, 2000 et 5000 carreaux [Beckers 2012].

En ondes courtes, la radiance de chaque carreau de ciel est calculée grâce au modèle proposé par [Perez 1993]. Ce modèle nécessite les irradiances directes normales et diffuses horizontales, disponibles dans les fichiers de données climatiques, ainsi que le calcul de la position du soleil pour chaque pas de temps [Beckers 2010a]. On considère que le soleil est modélisé par le carreau de ciel dans lequel il se situe. L'angle solide pris en compte pour le soleil est alors différent de son angle solide réel. Sa radiance est obtenue en divisant l'irradiance normale directe par l'angle solide du carreau. Ainsi, la même quantité d'irradiance directe normale est conservée quel que soit l'angle solide du carreau considéré. Le passage de la radiance, grandeur directionnelle, à l'exittance, grandeur sans direction, nécessaire dans les équations de la méthode de radiosité, se fait par une simple multiplication par π ; la valeur π correspond à la projection sur sa base d'un hémisphère de rayon unitaire.

Dans la méthode de radiosité originale, chaque carreau est considéré comme un réflecteur et/ou un émetteur parfaitement diffus, aussi appelé lambertien, limitant ainsi les applications possibles de cette méthode. Pour rendre utilisable la méthode de radiosité dans des environnements bâtis composés de vitrages ou de toiles d'ombrage, c'est-à-dire produisant des réflexions et des transmissions régulières, les facteurs de vue classiques sont remplacés par les facteurs de vue étendus [Sillion 1989] [Bugeat 2020]. Pour le calcul de ces derniers, nous utilisons le même programme Embree[®] qu'en ondes longues. La dépendance angulaire de la réflectance spéculaire et de la transmittance directe des matériaux translucides (vitrages, toiles d'ombrage) selon les relations de Fresnel est simplifiée en suivant le modèle proposé par [Schlick 1994].

Pour les ondes courtes, nous devons donc résoudre un système d'équations linéaires sous la forme :

$$E_{oc,i} = \sum_j (F_{ij}^{ext} M_{oc,j} + F_{ij}^{ext} \rho_{d,j} E_{oc,j} + F_{ij}^{ext} \tau_{d,j'} E_{oc,j'}) \quad \text{Éq 2-31}$$

Où $E_{oc,i}$, $E_{oc,j}$ et $E_{oc,j'}$ sont les éclairagements énergétiques en ondes courtes sur le carreau i , j ou j' (Wm^{-2}); $M_{oc,j}$ est l'émission en ondes courtes du patch j (Wm^{-2}); $\rho_{d,j}$ and $\tau_{r,j'}$ sont la réflectance diffuse et la transmission directe du carreau j' en ondes courtes, respectivement ; F_{ij}^{ext} est le facteur de vue étendu entre les carreaux i and j . Les carreaux j et j' représentent une paire de carreaux « jumeaux » d'éléments transparents minces, tels que des vitrages.

Le premier terme de cette expression rend compte du rayonnement provenant du ciel, le second des réflexions provenant de l'environnement bâti, et le troisième du rayonnement atteignant une surface après avoir été transmis à travers une autre surface (fenêtres). Cette équation est résolue de manière itérative selon l'algorithme de Jacobi dont chaque itération correspond à la prise en compte d'une nouvelle réflexion.

Une fois les irradiances E_{oc} obtenues, une absorptivité constante est considérée pour chaque face afin de calculer les apports solaires (ou irradiances absorbées) sur tous les éléments de l'environnement bâti. La partie du rayonnement absorbée correspond au rayonnement incident qui n'est pas réémis par réflexion ou par transmission.

$$E_{abs,oc,i} = \alpha_{oc,i} E_{oc,i} \quad \text{Éq 2-32}$$

$$\text{Avec, } \alpha_{oc,i} = 1 - \rho_{oc,r,i} - \rho_{oc,d,i} - \tau_{oc,r,i} - \tau_{oc,d,i}$$

Dans le cas des matériaux comme les vitrages où la réflectance et la transmittance sont variables selon l'angle d'incidence, l'absorptivité l'est aussi. Cette dépendance angulaire de l'absorptivité est simplifiée en considérant l'absorptivité hémisphérique (ou totale) [Nicodemus 1965]. L'absorptivité hémisphérique consiste à intégrer l'absorptivité sur toutes les directions d'incidence (hémisphère). Elle est alors constante et représentative pour toutes les directions d'incidence.

*

Pour montrer un exemple avec du flux solaire, nous introduisons la modélisation d'une fenêtre dans le modèle géométrique de la boîte fermée. Dans tous nos travaux, nous faisons le choix de modéliser les fenêtres au nu intérieur des murs. Elles sont constituées d'un simple vitrage avec une épaisseur de 6 mm. Elles sont opaques pour les ondes longues et translucides pour les ondes courtes. Dans l'ensemble du spectre, les vitrages réfléchissent de manière spéculaire le rayonnement reçu. Les propriétés thermiques et radiatives de la fenêtre sont :

- Conductivité thermique : $0.9 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
- Masse volumique : 2500 kgm^{-3}
- Capacité thermique massique : $750 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
- Emissivité et absorptivité : 0.82
- Réflexion spéculaire en ondes longues : 0.18

- Réflexion spéculaire en ondes courtes : 0.1
- Transmittance régulière en ondes courtes : 0.8
- Absorptivité en ondes courtes : 0.1

La faible épaisseur des fenêtres par rapport au mur de façade entraîne une non-conformité entre les deux maillages. Pour modéliser la diffusion de chaleur entre la fenêtre et le mur, nous utilisons la méthode de collage de maillage (*mesh gluing*) [Quiroz 1995].

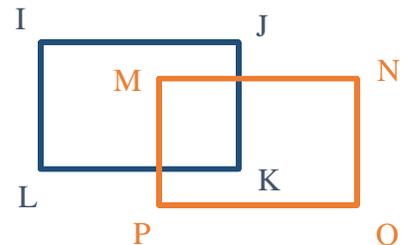
Plus précisément, tout point d'un maillage **S1** est astreint à suivre une combinaison linéaire des températures des nœuds d'un maillage **S2** contre lequel il est collé. Cette combinaison est liée aux fonctions de forme β décrivant l'élément :

$$T(M) = \beta(x_M).T_i + \beta(x_M).T_j + \beta(x_M).T_k + \beta(x_M).T_L$$

où x_M sont les coordonnées du point M dans la base locale de S2.

L'équation ci-dessus peut être écrite comme suit :

$$T(M) - (\beta(x_M).T_i + \beta(x_M).T_j + \beta(x_M).T_k + \beta(x_M).T_L) = 0$$



Cette relation est imposée par l'utilisation des multiplicateurs de Lagrange et représente l'interaction entre les deux surfaces **S1** et **S2**.

Du fait de la faible épaisseur des vitrages, une attention particulière est portée sur la taille des mailles utilisées pour les modéliser. Nous considérons une finesse de maillage constante pour l'ensemble du vitrage. Les mailles utilisées sont des carrés dont la longueur des côtés est étudiée. Pour cela, nous procédons avec une cavité en trois dimensions avec trois éléments dans l'épaisseur des parois et des mailles carrées de 20 cm de côté. Une fenêtre est modélisée sur une paroi et représente un quart de sa surface intérieure. Des échanges convectifs extérieurs et intérieurs sont modélisés avec des températures de l'air respectivement égales à 283 K et 273

K. Le coefficient d'échange par convection est le même à l'intérieur et à l'extérieur de la cavité ($h = 10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$). Le problème est résolu en régime permanent.

Dans ces conditions, le flux de chaleur peut être considéré comme unidirectionnel au centre du vitrage (Figure 2.20). À cet endroit, les conditions du bord n'ont pas d'influence. Il est alors possible de résoudre le problème analytiquement et de connaître la température de surface au milieu du vitrage en écrivant l'équation du flux de chaleur à travers le vitrage avec la méthode des résistances équivalentes :

$$\Phi_{\text{vitrage}} = \frac{\Delta T}{R_{\text{tot}}} = \frac{(T_{\text{ext}} - T_{\text{int}})}{\frac{1}{h_{\text{ext}}A} + \frac{e}{kA} + \frac{1}{h_{\text{int}}A}} = 48.38 \text{ Wm}^{-2}$$

On obtient la température du vitrage sur les surfaces extérieures et intérieures :

$$T_{\text{vit,ext}} = 277.99 \text{ K} \quad \text{et} \quad T_{\text{vit,int}} = 278.31 \text{ K}$$

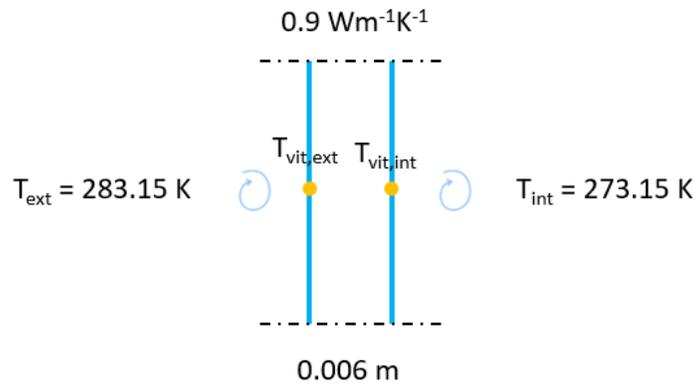


Figure 2.20 Flux unidirectionnel à travers le vitrage.

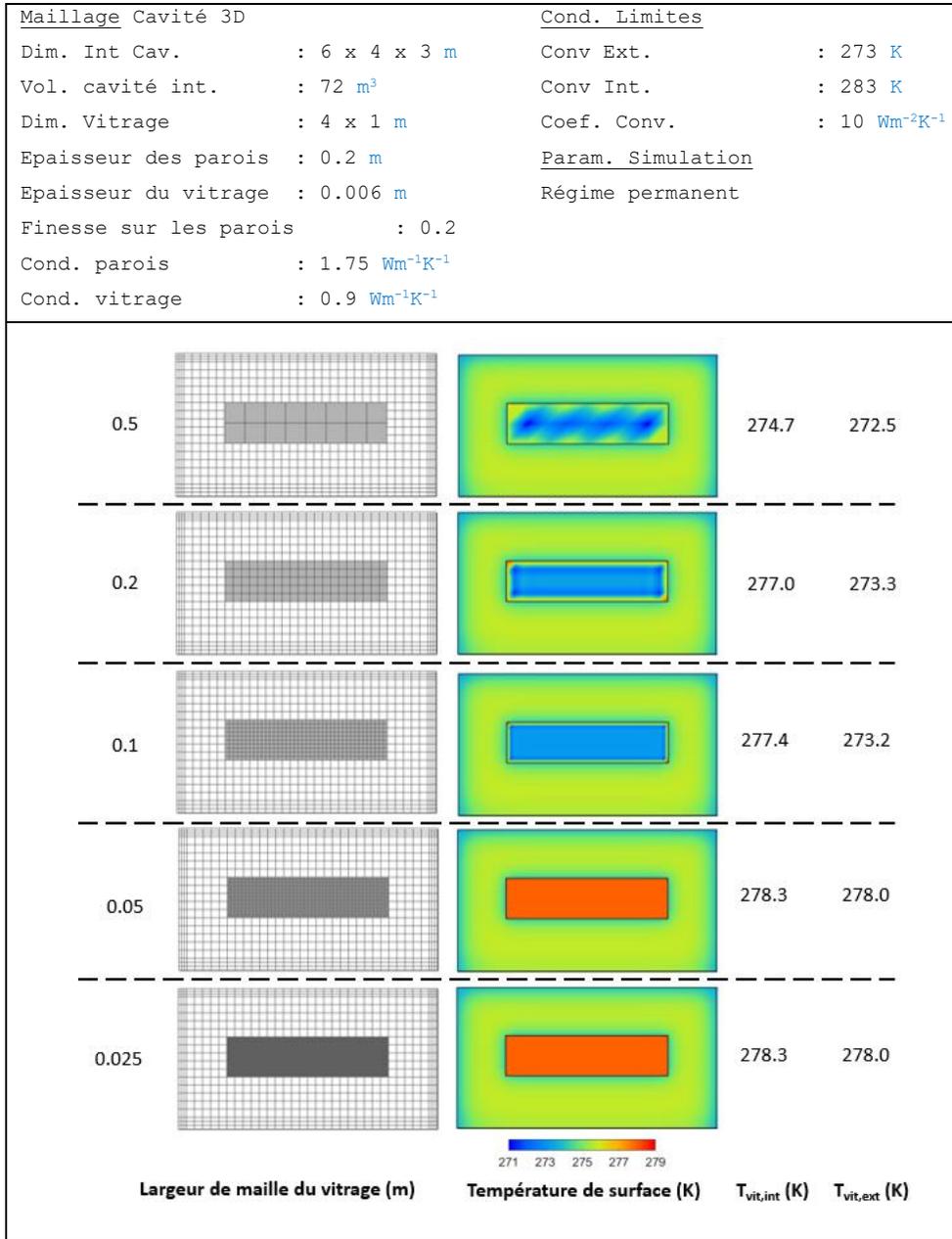


Figure 2.21 étude de la taille du maillage du vitrage.

Sur la Figure 2.21, on peut voir des artefacts apparaître sur les maillages les plus grossiers du vitrage (0.5 m, 0.2 m et 0.1 m). De plus, les températures de surface obtenues sont en dehors des limites définies par les températures de l'air fixées (conservation de l'énergie). On obtient le même résultat que celui obtenu analytiquement avec un maillage contenant des mailles de 0.05 m de côté. Des mailles plus petites ne montrent aucune différence. De plus, les artefacts sont réduits et n'entraînent pas de problème de conservation de l'énergie.

*

Pour illustrer le calcul du rayonnement en ondes courtes, nous étudions l'influence d'une protection solaire passive (casquette) sur la cavité. L'étude est menée sous le climat méditerranéen de la ville de Cordoue (Espagne) aux solstices d'été et d'hiver ainsi qu'à l'équinoxe de septembre.

Trois modèles géométriques sont comparés. Le premier n'a pas de protection solaire. Le second comporte une casquette protégeant toute la fenêtre (appelé petite casquette) et le troisième contient une casquette protégeant l'ensemble de la façade (appelé grande casquette).

Pour définir la longueur des casquettes, nous représentons les trajets solaires et les modèles géométriques en projection stéréographique (Figure 2.22), grâce au logiciel Heliodon2TM [Beckers 2009]. Les capteurs (en vert) sont placés au bas de la fenêtre pour la petite casquette et au bas du mur de façade pour la grande casquette. Pour la petite et la grande casquette, des longueurs de 0.85 m et de 2.50 m sont suffisantes pour que la fenêtre et la façade soient protégées entre le 21 juin et le 21 septembre.

Le modèle éléments finis est la cavité utilisée dans la section précédente (cavité en béton, largeur de maille de 20 cm, trois éléments dans l'épaisseur des parois, fenêtre de 4 m x 1 m et largeur de maille de 5 cm). Le modèle sans protection solaire contient 11 956 hexaèdres et 17

313 degrés de liberté. La petite et la grande casquette comportent 240 et 1 404 hexaèdres ainsi que 398 et 1 923 degrés de liberté. Elles ont une épaisseur de 20 cm.

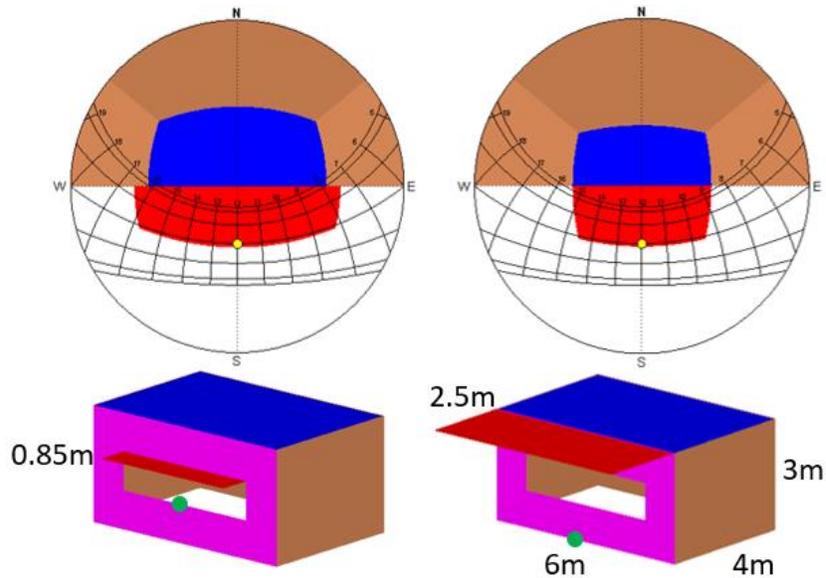


Figure 2.22 Projections stéréographiques des modèles géométriques et des trajets solaires à Cordoue.

La façade sud contenant la fenêtre et le toit échangent avec l'environnement extérieur. Les autres parois (murs verticaux et sol) sont considérées comme adiabatiques (contexte d'une rue canyon). Les données d'entrée pour modéliser les flux convectifs et les flux en ondes courtes représentant une année standard sont extraites du fichier de données climatiques de Cordoue sur le site de l'application EnergyPlus (<https://energyplus.net>) [Crawley 1999].

Pour les flux convectifs, la température de l'air est extraite du fichier de données climatiques et le coefficient de convection est fixé à $10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. À l'intérieur de la cavité, la température de l'air est laissée libre et le coefficient de convection est le même qu'à l'extérieur.

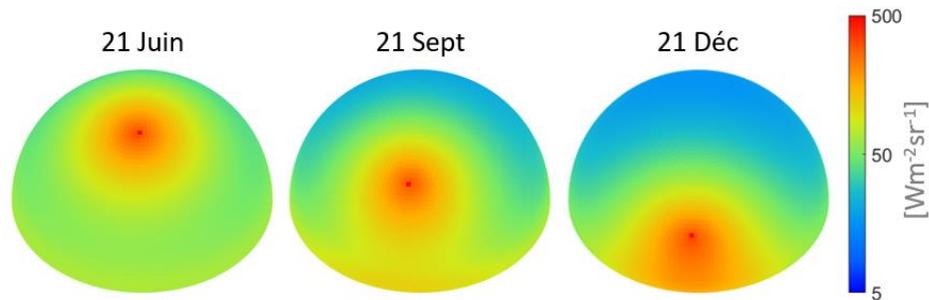


Figure 2.23 Distribution des radiances du ciel au midi solaire pour les trois jours étudiés à Cordoue.

Pour les flux en ondes courtes, les irradiances directes normales et diffuses horizontales sont extraites du fichier de données climatiques et introduites dans le modèle de Pérez pour calculer les radiances de la partition de ciel selon Beckers (Figure 2.23). La méthode de radiativité est ensuite utilisée pour déterminer les irradiances absorbées par la peau de la cavité (Figure 2.24). Les faces opaques ont une réflectance diffuse de 0.5.

Les échanges par rayonnement en ondes longues entre les faces de la peau intérieure sont également pris en compte (4 200 faces). Les faces de la fenêtre ont une émissivité de 0.8 et réfléchissent de manière spéculaire. Les autres faces de la peau ont une émissivité de 0.95 et réfléchissent de manière diffuse.

Le problème est résolu en régime transitoire. La durée d'une simulation est de 24 h avec un pas de temps d'une heure. Les températures initiales sont obtenues en résolvant le premier pas de temps en régime permanent.

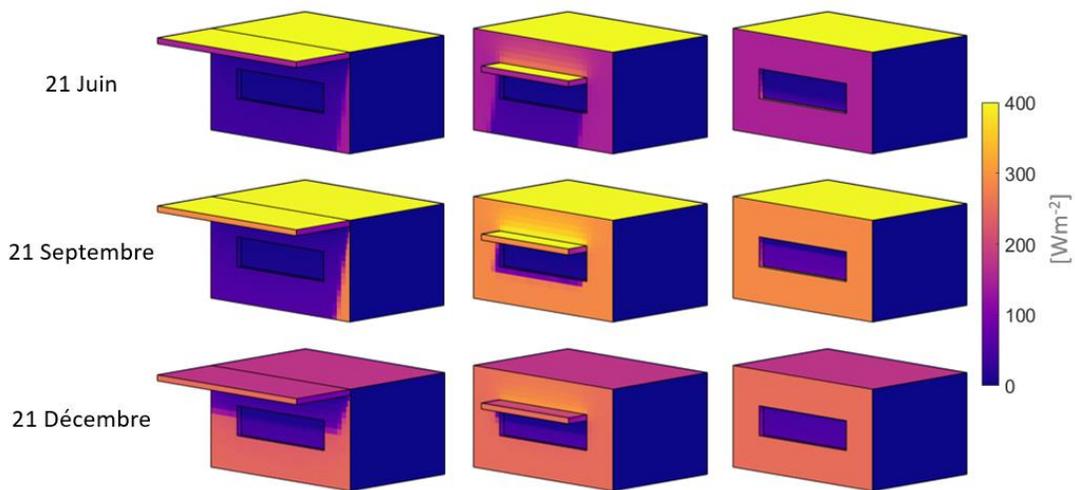


Figure 2.24 Irradiances absorbées au midi solaire pour les trois jours étudiés.

La Figure 2.25 montre les températures de surface des peaux extérieures et intérieures de la cavité au midi solaire, le 21 juin, le 21 septembre et le 21 décembre. Les casquettes jouent leurs rôles de protection en empêchant le soleil de pénétrer à l'intérieur de la cavité (absence de tache chaude sur le sol) en juin et en septembre. La petite casquette a un effet bénéfique sur la fenêtre et sur l'allège, alors que la grande casquette a un effet positif sur l'ensemble de la façade en juin. L'effet bénéfique de la grande casquette reste inchangé en septembre, alors que la petite casquette a un effet négatif sur le haut de la façade extérieure provoqué par la réflexion diffuse du rayonnement solaire. En décembre, les casquettes réduisent les apports solaires à l'intérieur de la cavité. On peut voir que la tache chaude sur le sol en décembre est plus grande dans le modèle sans protection solaire que dans les autres modèles.

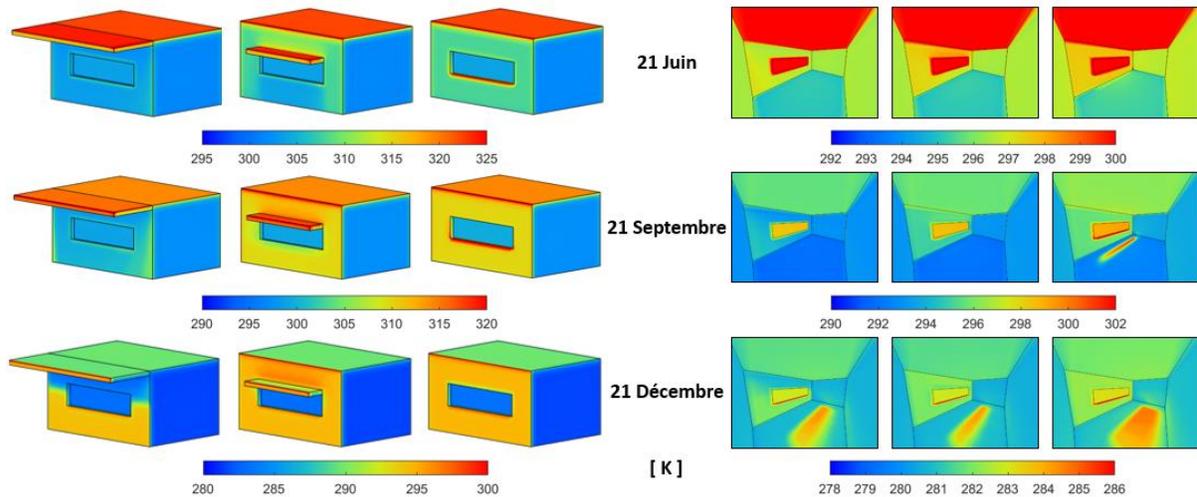


Figure 2.25 Températures de surface au midi solaire pour les trois jours étudiés.

Dans cette étude, les casquettes ont une influence majeure à l'équinoxe de septembre. En effet, sur les 24 h de l'étude, la petite et la grande casquette permettent de réduire de 0.94 K et de 1.55 K au maximum la température de l'air par rapport au modèle sans protection. La Figure 2.26 montre les températures de surface extérieures et intérieures des trois modèles pour différentes heures le 21 septembre. Tout au long de la journée, on peut voir que les casquettes empêchent le rayonnement en ondes courtes de pénétrer dans la cavité. Dans le modèle sans protection, on peut voir la tache solaire se déplacer sur le sol pendant l'après-midi. Cette énergie absorbée provoque une augmentation de température du sol, laquelle entraîne un réchauffement de l'ensemble des surfaces intérieures induit par les échanges radiatifs en ondes longues. L'ombrage bénéfique de la grande casquette se voit clairement sur les températures de la paroi contenant la fenêtre pendant toute l'après-midi.

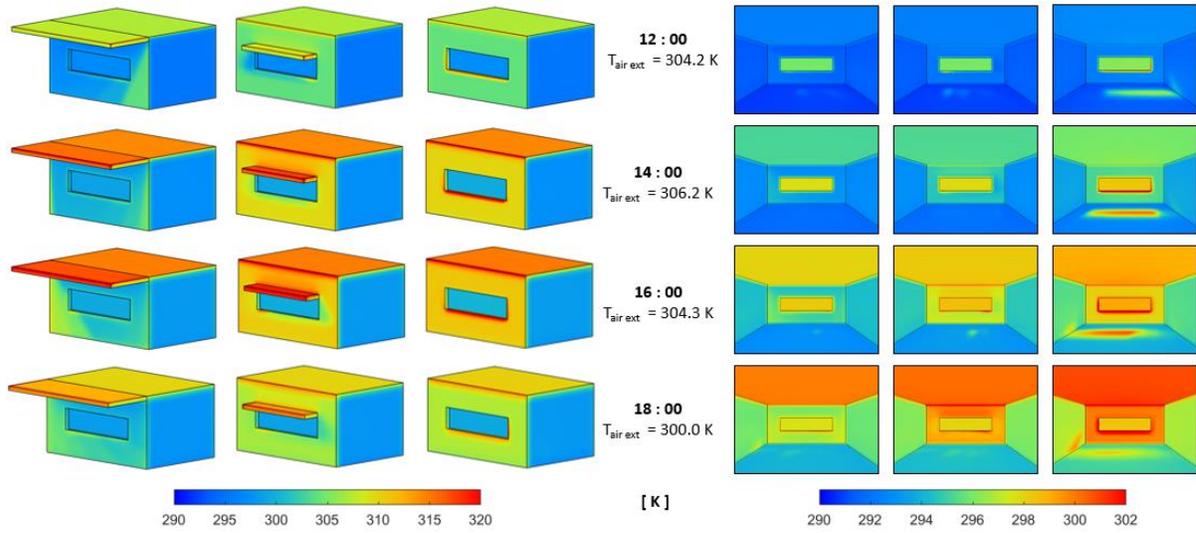


Figure 2.26 Températures de surface à différentes heures le 21 septembre.

2.7 Rayonnement du ciel en ondes longues : chambre avec fenêtre de toit

Dans cette section, nous présentons la prise en compte du rayonnement infrarouge du ciel dans le prétraitement. Nous expliquons dans un premier temps la méthode générale, ensuite, nous l'illustrons au travers de l'étude d'une chambre possédant une fenêtre sud et une fenêtre de toit.

*

Le rayonnement en ondes longues en zone urbaine concerne les éléments de l'environnement bâti et le ciel. Ces éléments forment une enceinte radiative fermée dont l'énergie rayonnante doit être calculée à chaque pas de temps. Pour caractériser ces échanges radiatifs, il faut résoudre l'équation des radiosités (Éq 2-10).

Comme pour le rayonnement en ondes courtes, l'environnement bâti et le ciel sont discrétisés. Pour l'environnement bâti, la peau du modèle utilisé pour le calcul par éléments finis constitue le maillage. Pour le ciel, la partition de Beckers en 5000 éléments est utilisée.

Nous distinguons le rayonnement en ondes longues du ciel de celui de l'environnement bâti. Cela permet de déterminer la quantité d'énergie rayonnante du ciel indépendamment de celle de l'environnement bâti. Le rayonnement en ondes longues du ciel est donc calculé dans le prétraitement, comme le rayonnement en ondes courtes du ciel et du soleil.

*

Le rayonnement en ondes longues du ciel est anisotrope. Il augmente avec l'angle zénithal, en particulier pour un ciel clair et froid [Bliss 1961]. [Martin 1984a] propose un

modèle qui prend en compte une distribution angulaire de l'émissivité du ciel pour n'importe quelles conditions météorologiques. Cette émissivité directionnelle est estimée à partir de l'émissivité globale du ciel [Martin 1984b]. Le calcul se déroule en cinq étapes :

- Calcul de l'émissivité globale du ciel clair.
- Correction pour la couverture nuageuse.
- Distribution zénithale de l'émissivité du ciel.
- Calcul de la température effective du ciel.
- Calcul des radiances du ciel.

Ces cinq étapes nécessitent les données suivantes, disponibles dans les fichiers de données climatiques : pression de vapeur d'eau, humidité relative, température de l'air et couverture nuageuse. Ce modèle est appliqué sur la partition du ciel pour calculer les radiances en ondes longues du ciel.

Pour pouvoir utiliser la méthode de radiativité, les facteurs de vue classiques sont remplacés par les facteurs de vue étendus. Pour le calcul de ces derniers, le programme en ondes courtes est utilisé. Cela permet de prendre en compte la réflexion spéculaire en ondes longues des vitrages. Contrairement au rayonnement en ondes courtes, la transmission régulière et la dépendance angulaire de la réflexion spéculaire ne sont pas prises en compte dans le rayonnement en ondes longues.

Finalement, pour obtenir l'énergie absorbée par les faces de l'environnement bâti provenant de la radiance du ciel en ondes longues, il faut résoudre le système d'équations linéaires suivant :

$$E_{ol,i} = \sum_j (F_{ij}^{ext} M_{ol,j} + F_{ij}^{ext} \rho_{d,j} E_{ol,j}) \quad \text{Éq 2-33}$$

Où $E_{ol,i}$ et $E_{ol,j}$ sont les éclairagements énergétiques en ondes longues sur la face i et j (Wm^{-2}); $M_{ol,j}$ est l'émission en ondes longues de la face j (Wm^{-2}); $\rho_{d,j}$ est la réflectance diffuse en ondes longues de la face j ; F_{ij}^{ext} est le facteur de vue étendu entre les faces i and j .

Le premier terme de cette expression rend compte du rayonnement provenant directement du ciel et le second des réflexions provenant de l'environnement bâti. Cette équation est résolue de manière itérative selon l'algorithme de Jacobi dont chaque itération correspond à la prise en compte d'une nouvelle réflexion.

Une fois les irradiances E_{ol} obtenues, une absorptivité égale à l'émissivité est considérée pour chaque face selon la loi de Kirchhoff.

$$E_{abs,ol,i} = \alpha_{ol,i} E_{ol,i} \quad \text{Éq 2-34}$$

$$\text{Avec, } \alpha_{ol,i} = \varepsilon_i$$

Les irradiances absorbées provenant du rayonnement en ondes longues du ciel sont imposées et considérées comme des charges au même titre que les irradiances absorbées provenant du rayonnement en ondes courtes du ciel et du soleil.

*

Le rayonnement du ciel étant calculé au prétraitement, il doit être retiré du bilan d'énergie de l'enceinte radiative fermée constituée de l'environnement bâti et du ciel. Pour cela, nous modifions la matrice des facteurs de vue introduite dans Cast3M (voir 2.6 *Rayonnement en ondes courtes : cavité 3D avec fenêtre*). Cette matrice peut être décomposée en deux parties. La première concerne les facteurs de vue entre les éléments de l'environnement bâti et la seconde concerne les facteurs de vue entre les éléments de l'environnement bâti et le ciel. Nous supprimons cette seconde partie de la matrice des facteurs de vue de manière à ne pas

considérer le ciel dans le bilan des radiosités du calcul par éléments finis. Ainsi, à chaque pas de temps, seuls les échanges entre les faces de l'environnement bâti sont recalculés.

*

Pour illustrer le calcul du rayonnement en ondes longues du ciel, nous montrons un exemple simple pour étudier l'influence de l'émissivité directionnelle du ciel sur le modèle de la cavité. L'étude est menée sous le climat de la ville de Bordeaux le 3 janvier, qui correspond dans le fichier de données climatiques à un jour dégagé et froid.

Dans le modèle de la cavité avec une fenêtre sur la façade sud, une fenêtre de toit est ajoutée. Elle garde les mêmes dimensions et les mêmes propriétés thermiques et radiatives que la fenêtre. Elle est modélisée au nu extérieur du toit contrairement à la fenêtre qui est modélisée au nu intérieur du mur de façade.

Le modèle éléments finis possède les mêmes caractéristiques que celui de l'exemple précédent (cavité en béton, largeur de maille de 20 cm, trois éléments dans l'épaisseur des parois, fenêtre et fenêtre de toit de 4 m x 1 m, largeur de maille de 5 cm). Le modèle contient 13 652 hexaèdres et 20 921 degrés de liberté.

La peau extérieure échange avec l'environnement extérieur, sauf le sol qui est considéré comme adiabatique. Elle est soumise aux échanges par convection, au rayonnement en ondes courtes du ciel et du soleil ainsi qu'au rayonnement en ondes longues du ciel.

Pour les flux convectifs, la température de l'air est extraite du fichier de données climatiques et le coefficient de convection est fixé à $10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. La température de l'air de la cavité est laissée libre et le coefficient de convection est le même qu'à l'extérieur.

Pour les flux en ondes courtes, les irradiances directes normales et diffuses horizontales sont extraites du fichier de données climatiques. Elles sont introduites dans le modèle de Pérez

pour calculer les radiances de la partition de ciel selon Beckers (5 000 éléments). La méthode de radiosité est ensuite utilisée pour déterminer les irradiances absorbées par la peau de la cavité. Les faces ont une réflectance diffuse de 0.5.

Pour les flux en ondes longues du ciel, les données d'entrée du modèle de Martin et Berdhal [Martin 1984b] (la pression de vapeur d'eau, l'humidité relative, la température de l'air et la couverture nuageuse) sont extraites du fichier de données climatiques. À partir de ces données, l'émissivité globale et l'émissivité directionnelle du ciel sont calculées. Elles permettent d'obtenir les températures et les exitanes du ciel. Pour les parois et les vitrages, l'émissivité est égale respectivement à 0.95 et 0.80.

La Figure 2.27 montre les données d'entrée pour le calcul du rayonnement du ciel. Les irradiances directes normales et horizontales diffuses ainsi que la température du ciel à l'horizon et au zénith sont montrées pour toute la durée de la simulation (48 h). Ces dernières sont calculées à partir du modèle de Martin et Berdhal [Martin 1984b]. Nous choisissons de montrer ces températures comme données d'entrée de l'étude, car elles permettent de mieux représenter le comportement du ciel. Notons que la température du ciel à l'horizon est égale à la température de l'air extérieur, c'est pourquoi nous ne représentons cette dernière qu'une seule fois. Les radiances en ondes courtes, les exitanes en ondes longues et la température du ciel sont montrées pour le moment le plus chaud de la journée (13 h). Les irradiances absorbées par la cavité en ondes courtes et en ondes longues sont également montrées.

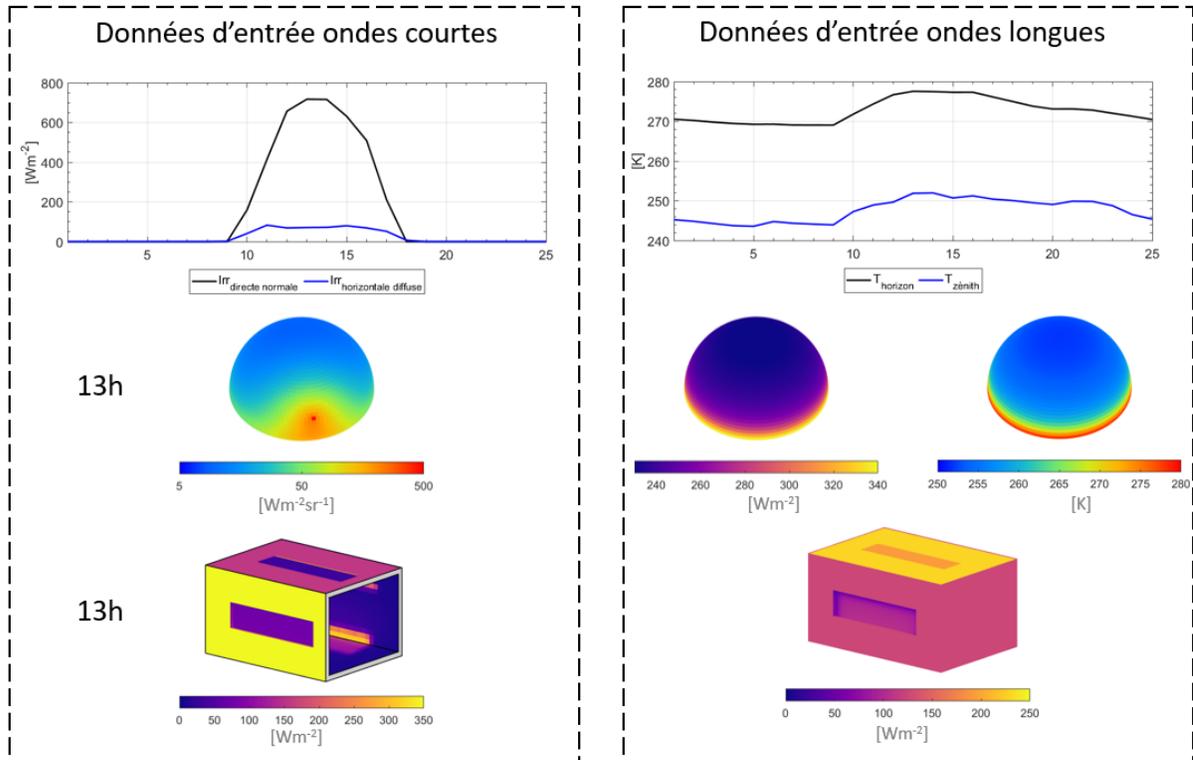


Figure 2.27 Données d'entrée du rayonnement en ondes courtes et en ondes longues.

Le problème est résolu en régime transitoire. La durée de la simulation est de 24 h avec un pas de temps d'une heure. Les températures initiales sont obtenues en résolvant le premier pas de temps en régime permanent.

La Figure 2.28 montre les températures de surface de la peau extérieure à trois moments de la journée. En début de journée, le toit et la fenêtre de toit sont plus froids que le reste de la cavité. Cela provient des échanges par rayonnement en ondes longues avec le ciel. Le ciel étant plus froid au zénith qu'à l'horizon, le toit reçoit moins d'énergie que les autres façades et se refroidit. En milieu de journée, la façade sud est exposée au rayonnement direct du soleil, c'est pourquoi elle est plus chaude que les autres façades. En particulier, la fenêtre sud est plus

chaude que la fenêtre de toit à cause de l'énergie solaire absorbée. En fin de journée, la façade sud est toujours plus chaude que les autres façades à cause des effets d'inertie. Le toit est plus froid que le reste des façades pour les mêmes raisons qu'en début de journée, avec des échanges par rayonnement en ondes longues plus faibles.

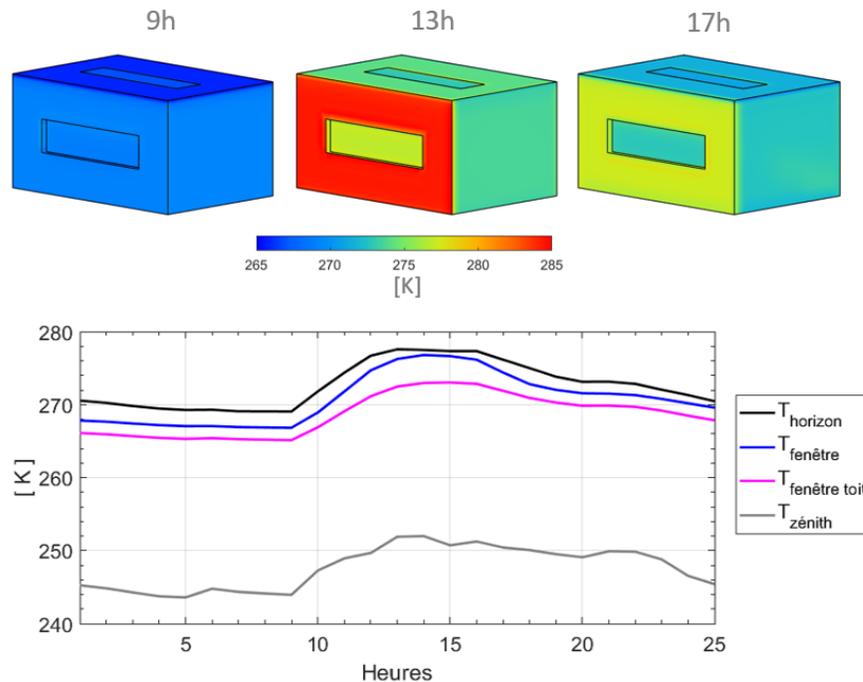


Figure 2.28 Températures de surface à trois heures différentes de la journée et températures des vitrages et du ciel (horizon et zénith) pour toute la journée.

Dans le même exemple (Figure 2.28), les températures du ciel à l'horizon et au zénith ainsi que les températures extérieures de la fenêtre et de la fenêtre de toit sont représentées tout au long de la journée. La température de la fenêtre de toit est toujours plus froide que celle de la fenêtre. En début de simulation, l'écart entre les deux est de 1.7 K, l'écart maximal est de 3.85 K à 13 h et en fin de simulation l'écart de température revient à 1.7 K. On retrouve le même écart de température en début et en fin de simulation car les températures du ciel sont

quasiment les mêmes. Pendant la journée, l'écart de température entre les deux fenêtres augmente à cause du rayonnement solaire direct absorbé par la fenêtre.

Le bilan des flux (conductifs, convectifs et radiatifs) des vitrages est présenté sur la Figure 2.29. Il est calculé à partir d'un nœud situé sur la face extérieure des vitrages et montre l'équilibre entre les flux qui « rentrent » et les flux qui « sortent » du nœud. Les flux en ondes courtes sont toujours positifs puisqu'ils apportent de l'énergie au nœud. Les flux convectifs et radiatifs en ondes longues dépendent de la différence de température entre le nœud et l'environnement extérieur. Un flux conductif positif signifie que de la chaleur est apportée au nœud par l'intérieur du vitrage (le vitrage est en train de se refroidir), alors qu'un flux conductif négatif signifie que le nœud transmet de la chaleur vers l'intérieur du vitrage (le vitrage est en train de se réchauffer).

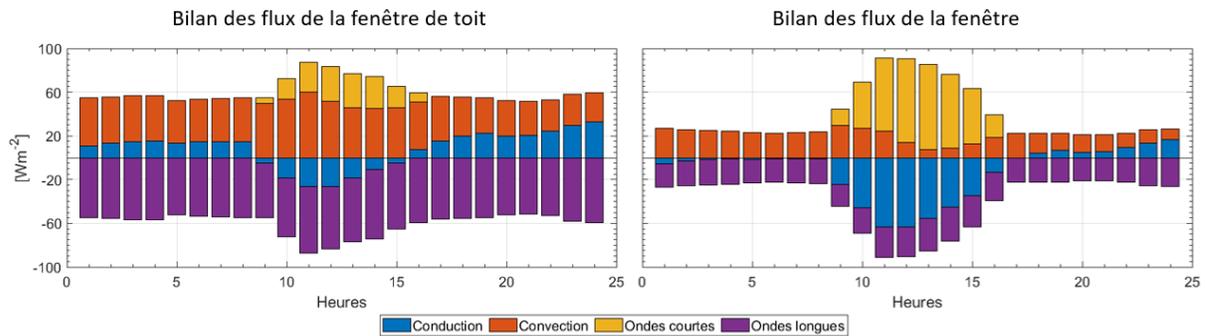


Figure 2.29 Bilan des flux pour la fenêtre de toit et la fenêtre sud tout au long de la journée.

Les vitrages se réchauffent entre 9 h et 16 h et se refroidissent le reste du temps. Les flux convectifs sont positifs tout au long de la journée pour les deux vitrages. Cela signifie que la température de l'air extérieur est toujours supérieure à celles des fenêtres et que l'air extérieur transmet de l'énergie aux vitrages. La valeur du flux caractérise l'écart entre la température de l'air et la température des vitrages. On voit que pour la fenêtre de toit cette valeur de flux est plus grande que pour la fenêtre sud. Cela signifie que la fenêtre de toit a une température de

surface plus éloignée de la température de l'air que celle de la fenêtre sud (ce qu'on retrouve sur la Figure 2.28). Les flux radiatifs en ondes longues sont toujours négatifs avec des valeurs plus grandes pour la fenêtre de toit. Un flux radiatif en ondes longues négatif signifie que le nœud émet plus d'énergie qu'il n'en reçoit. Le bilan négatif en ondes longues de la fenêtre de toit est toujours plus grand que celui de la fenêtre sud. Cela vient du fait que la fenêtre de toit échange principalement avec la partie zénithale du ciel qui a une température bien plus faible que l'horizon, lequel échange davantage avec la fenêtre sud.

Finalement, l'influence de l'anisotropie du ciel et plus largement du rayonnement en ondes longues du ciel devient de plus en plus importante à mesure que le facteur de vue du ciel des faces augmente. Pendant la journée, elle est limitée, le rayonnement en ondes courtes étant prédominant pour les faces exposées. Pendant la nuit, en revanche, son rôle devient majeur sur les bilans d'énergie.

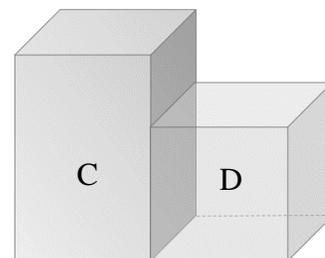
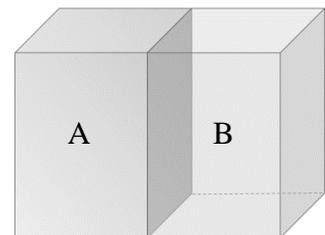
2.8 Assemblage de deux bâtiments : maillage non conforme

Avant d'étudier le problème complet d'une rue théorique, nous souhaitons introduire notre méthode pour construire son modèle géométrique et son maillage. Nous présentons dans un premier temps l'idée générale, puis, dans un second temps, nous montrons sur un exemple simple de trois bâtiments qui ont des maillages différents, l'influence de la connexion des maillages non conformes.

*

Nous supposons que les modèles géométriques sont les maillages. Nous utilisons des maillages conformes, mais pas nécessairement d'un seul tenant. Un maillage est conforme si deux de ses éléments partagent l'ensemble vide, un nœud, une arête ou une face [Ho-Le 1988]. Le maillage de chaque bâtiment composant une scène urbaine constitue un bloc conforme. Les différents blocs sont assemblés un à un mais ne sont pas nécessairement conformes. La méthode de *collage de maillage* permet de faire la connexion entre les éléments disjoints [Quiroz 1995]. Nous avons introduit cette méthode pour connecter le maillage de la fenêtre à celui du reste de la cavité (2.6 *Rayonnement en ondes courtes : cavité 3D avec fenêtre*). L'assemblage des différents blocs peut entraîner différents cas :

- Soit les bâtiments de la rue sont de même hauteur et la peau extérieure du modèle est alors constituée des peaux extérieures de chaque bâtiment (A et B), auxquelles on a retiré les faces à la jonction entre ces derniers.
- Soit les bâtiments de la rue sont de différentes hauteurs et la peau extérieure du modèle comprend alors seulement la partie supérieure de la jonction des bâtiments. Du fait que les maillages des bâtiments sont non conformes, il y a une ambiguïté sur les éléments de la peau du bâtiment de plus grande hauteur (C). Une partie de leurs surfaces est à l'extérieur du contour du bâtiment D et l'autre partie à



l'intérieur. Nous gardons seulement les faces dont le barycentre est à l'extérieur du contour du bâtiment D.

Nous utilisons des maillages structurés composés d'un maximum d'hexaèdres [Lo 2014]. Des prismes peuvent être utilisés pour représenter des géométries particulières (inclinaison des toits).

*

Pour montrer la connexion entre des bâtiments disjoints, nous comparons un modèle de trois bâtiments entièrement conformes avec un modèle de trois bâtiments non conformes (recours à la méthode de *collage de maillage*). Pour cela, nous réalisons une simulation dont la principale composante est la conduction de chaleur à travers les parois mitoyennes des bâtiments.

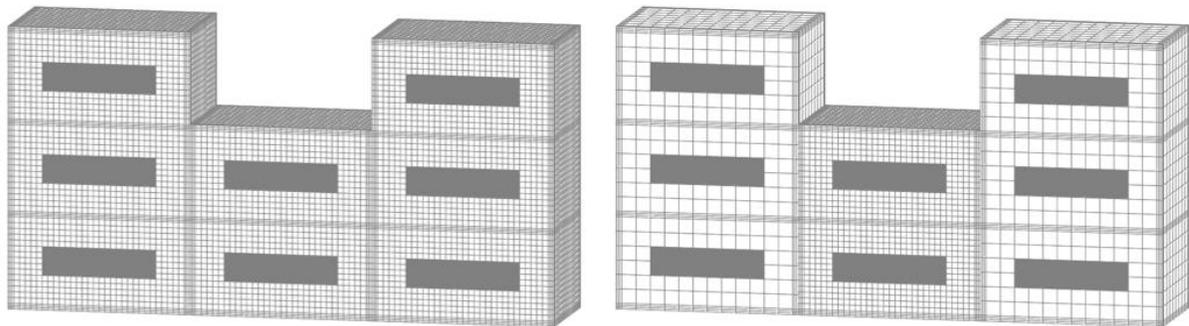


Figure 2.30 Maillage conforme à gauche (20 cm de largeur) et non conforme à droite (50 cm et 20 cm de largeur).

Pour définir un bâtiment, la cavité utilisée dans les sections précédentes est reproduite plusieurs fois pour modéliser les étages du bâtiment. La Figure 2.30 montre deux modèles de deux bâtiments de trois étages et un bâtiment de deux étages. Dans le modèle de gauche, l'ensemble du maillage est conforme. Les trois bâtiments sont modélisés avec des éléments de 20 cm de largeur. Dans le modèle de droite, le maillage est non conforme avec des éléments de

50 cm de largeur pour les grands bâtiments et de 20 cm de largeur pour le bâtiment du milieu. Les deux modèles contiennent soit 81 608 hexaèdres et 118 256 degrés de liberté, soit 42 080 hexaèdres et 66 012 degrés de liberté.

La peau extérieure échange avec l'environnement seulement par convection. Le sol et l'arrière des bâtiments sont considérés comme adiabatiques. La température de l'air extérieur est fixée à 268.15 K (-5 °C) et le coefficient de convection est égal à $10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Du chauffage est modélisé dans les deux étages du petit bâtiment avec une température de l'air fixée à 293.15 K (20 °C). Pour les deux grands bâtiments, la température de l'air est laissée libre. Dans toutes les cavités, le coefficient de convection intérieur est le même que l'extérieur.

Le problème est résolu en régime permanent. Les températures d'air intérieur et de surface des deux modèles sont comparées pour montrer l'influence de la connexion entre les bâtiments.

La Figure 2.31 montre les températures d'air intérieur et de surface des deux modèles sur une coupe longitudinale. Les différences de températures de surface sont quasi nulles. Les températures de l'air intérieur des derniers étages des grands bâtiments sont égales dans les deux modèles, la connexion des bâtiments n'ayant pas d'influence. En revanche, pour le rez-de-chaussée et le premier étage des grands bâtiments, on peut voir une différence de 0.03 K entre les deux modèles. Le flux de chaleur total à travers un mur de chaque étage est montré. La différence entre le modèle conforme et non conforme est d'environ 2 W.

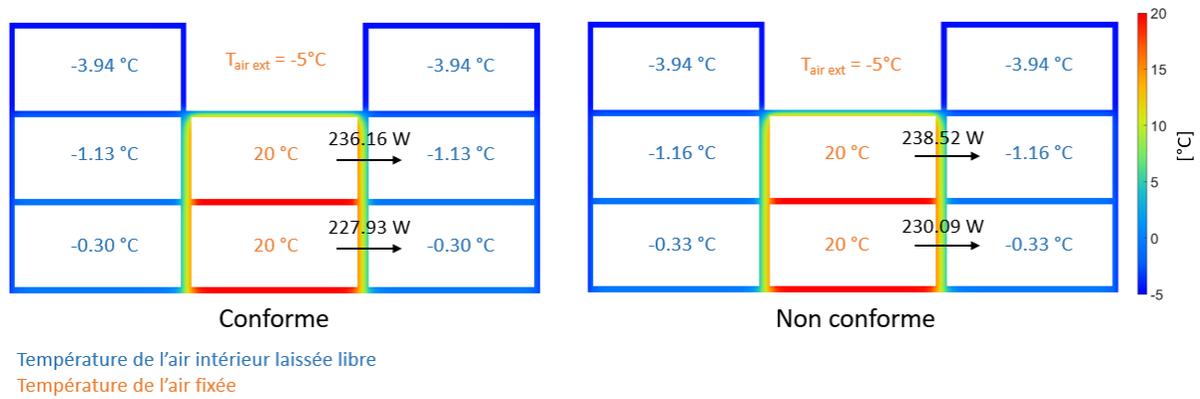


Figure 2.31 À gauche : maillage conforme et à droite : maillage non conforme.

Finalement, les différences obtenues entre les deux modèles sont très faibles et le recours à la méthode de *collage de maillage* n'a pas d'influence notable sur les résultats des simulations. Nous utiliserons cette méthode pour connecter des maillages non conformes dans tous les travaux de cette thèse.

2.9 Problème complet : cas d'une rue idéalisée

Dans cette section, nous appliquons le système créé autour de Cast3M à l'étude d'une rue théorique. Dans un premier temps, nous présentons la construction du modèle géométrique de la rue et son maillage. Dans un second temps, nous définissons les paramètres du maillage qui permettent d'assurer une convergence des résultats : nombre d'éléments dans l'épaisseur des parois et taille des mailles. Ensuite, nous introduisons le calcul de la température moyenne radiante (T_{mrt}) permettant d'apprécier le confort thermique dans la rue (confort du piéton). Pour finir, nous montrons grâce à notre calcul multi-échelle (intérieur/extérieur), l'impact de la couleur des façades des bâtiments sur le confort thermique de l'habitant et du piéton.

*

Le modèle géométrique s'est complexifié au cours de ce chapitre en commençant par un rectangle en deux dimensions jusqu'à la modélisation d'un bâtiment. Pour construire ce

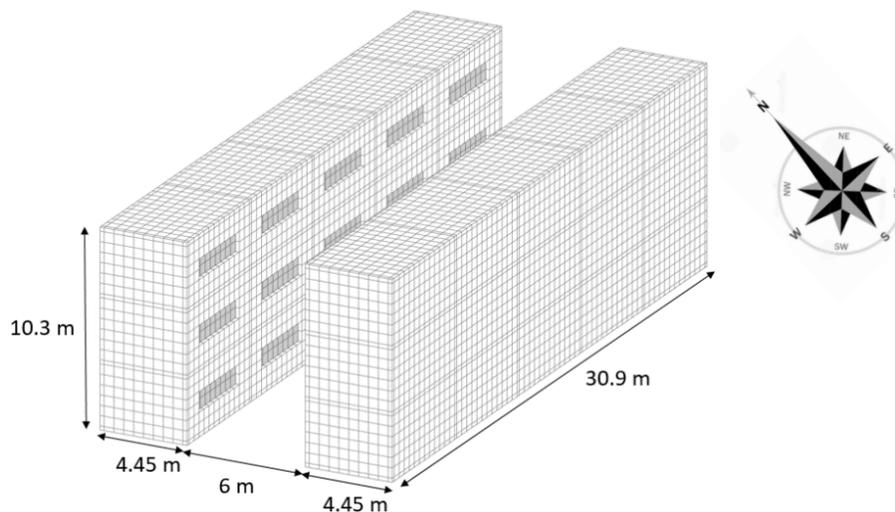


Figure 2.32 Modèle géométrique des bâtiments et dimensions de la rue.

bâtiment, la cavité tridimensionnelle a été répétée et empilée plusieurs fois pour construire les étages.

Pour former la rue canyon, le bâtiment est répété plusieurs fois de sorte qu'il y ait deux bandes de cinq bâtiments qui se font face. La rue est orientée selon l'axe est-ouest (Figure 2.32). Elle mesure trente et un mètres de long et six mètres de large. Elle a un rapport d'aspect de $\frac{Hauteur}{Largeur} = 1.6$. Chaque bâtiment est composé de trois étages pour une hauteur totale de dix mètres.

Le sol de la rue est maillé de manière conforme avec les bâtiments. Son maillage est construit à partir du contour des bâtiments.

Pour traiter l'ensemble des conditions climatiques, il faut prendre en compte la température du sous-sol. Nous supposons qu'elle est indépendante des caractéristiques des bâtiments de la rue. À partir d'une certaine profondeur, elle n'est pas sensible à la variation journalière de la température de l'air et du rayonnement solaire [Givoni 1985]. Elle est disponible dans les fichiers de données climatiques pour différentes profondeurs. Pour chacune d'entre elles, une température est spécifiée pour chaque mois de l'année.

Nous modélisons le sous-sol avec des éléments de volume créés à partir des faces inférieures du sol de la rue et du sol des bâtiments (Figure 2.33). Trois éléments sont modélisés selon la hauteur du sous-sol. Ses propriétés thermiques sont choisies en fonction de la composition du sol de la ville étudiée.

Les principaux composants de la rue sont le sous-sol, le sol, les vitrages et les parois des bâtiments. Ces dernières peuvent être décomposées selon les toits, les planchers, les murs de façade et les murs intérieurs. Le maillage de la rue est uniquement composé d'hexaèdres à huit nœuds. De cette manière, le maillage de la rue est entièrement conforme. Des prismes à six nœuds peuvent également être utilisés dans d'autres configurations géométriques pour tenir compte du caractère pentu des toits.

*

Avant d'optimiser les paramètres de simulation, nous devons introduire les pertes de chaleur par renouvellement d'air. Elles proviennent des entrées d'air neuf des fenêtres. Le flux de déperdition par renouvellement d'air est proportionnel à la différence entre la température de l'air intérieur et la température de l'air extérieur :

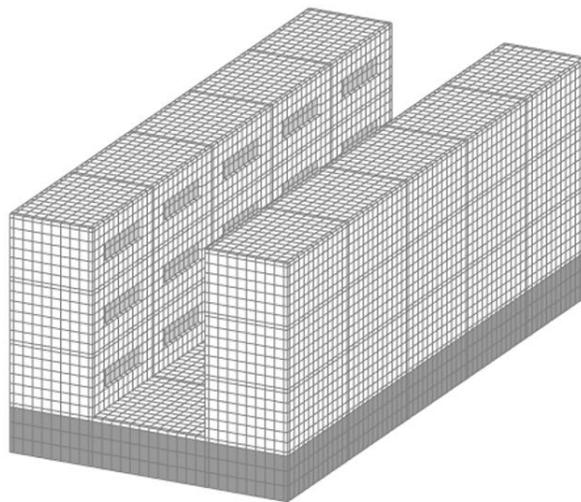


Figure 2.33 Modèle géométrique et maillage de la rue canyon.

$$\Phi V = R_a \cdot (T_{ext} - T_{int}) \quad \text{Éq 2-35}$$

Avec :

ΦV : Flux de déperditions thermiques par renouvellement d'air (W)

R_a : Coefficient de déperdition par renouvellement d'air (WK⁻¹)

$$R_a = Vi \cdot \rho_{air} \cdot c_{p,air}$$

Vi : Débit volumique de l'air (m³.h⁻¹)

Le débit volumique de l'air Vi s'obtient en multipliant le volume de la pièce (m³) par le taux de renouvellement d'air η (vol.h⁻¹). En remplaçant dans l'équation Éq 2-36, on obtient :

$$\Phi V = \eta \cdot V \cdot \frac{\rho_{air} \cdot c_p}{3600} \cdot (T_{ext} - T_{int})$$

Ce flux peut être décomposé en deux parties. La première partie ($R_a \cdot T_{int}$) porte sur l'une des inconnues du problème : la température du nœud intérieur. La seconde partie ($R_a \cdot T_{ext}$), varie en fonction de la température extérieure. Elle s'ajoute au terme de la matrice du second membre correspondant au nœud intérieur. La première partie s'ajoute au terme de la matrice de conductivité correspondant au nœud intérieur. En définitive, cette méthode peut être assimilée au traitement de la convection thermique.

Les données d'entrée des pertes par renouvellement d'air sont : le taux de renouvellement d'air, la densité massique (1.413 kgm⁻³) et la capacité thermique massique (1 005 Jkg⁻¹K⁻¹) de l'air ainsi que le volume de la pièce. Le taux de renouvellement d'air dépend de l'usage des bâtiments [CSTB 2012].

2.9.1 Paramètres de simulation

Dans cette section, on définit les paramètres du maillage qui permettent d'assurer une convergence des résultats. Ces paramètres concernent la taille des mailles et le nombre d'éléments dans l'épaisseur des parois. Pour le premier paramètre, nous comparons des largeurs de mailles de 1 m, de 50 cm et de 25 cm. Pour le deuxième, nous comparons des modèles avec un, deux, trois et quatre éléments selon l'épaisseur des parois.

Pour cette étude, un pas de temps d'une heure est suffisant. En effet, les conditions environnementales ne varient pas suffisamment pour que le pas de temps ait une quelconque influence sur les résultats. De plus, le calcul des conditions initiales en régime permanent permet d'obtenir une homogénéisation des températures. Cette homogénéisation réduit les gradients de température et donc l'influence du pas de temps.

*

Le modèle de référence (intermédiaire) est défini avec des mailles de 50 cm de largeur et 3 éléments selon l'épaisseur des parois. Il comprend 55 632 hexaèdres et 81 426 degrés de liberté (nœuds). La peau extérieure échange avec l'environnement extérieur sauf le sol et l'arrière des bâtiments qui sont considérés adiabatiques. La peau (intérieure et extérieure) du modèle contient 46 704 faces (Figure 2.34). La matrice des facteurs de vue a un taux de remplissage de 7.15 %. Pour le calcul thermique, les faces adiabatiques (en noir) sont supprimées de la peau et l'enceinte radiative fermée contient finalement 40 392 faces. Pour limiter les temps de calcul, seuls les vitrages des bâtiments au centre de la rue sont maillés

finement (maille de 5 cm de côté). Pour obtenir une enceinte radiative fermée, nous supposons que la rue est entourée d'un sol infini à la température de l'air.

Les propriétés thermiques des matériaux correspondent à des systèmes constructifs représentatifs de la ville de Cordoue [García-Nevado 2021] : structure en béton poteau poutre, planchers hourdis en béton, façades non isolées à double peau en brique, fenêtres en simple vitrage et chaussée en asphalte (Figure 2.35).

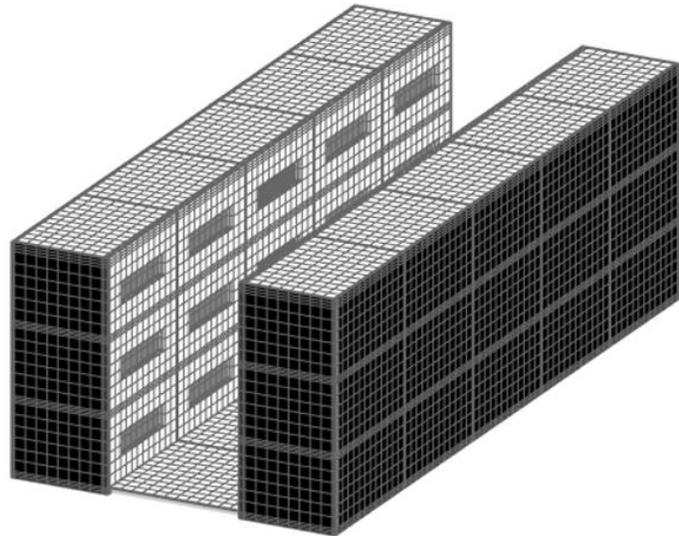


Figure 2.34 Maillage surfacique de la peau du modèle.

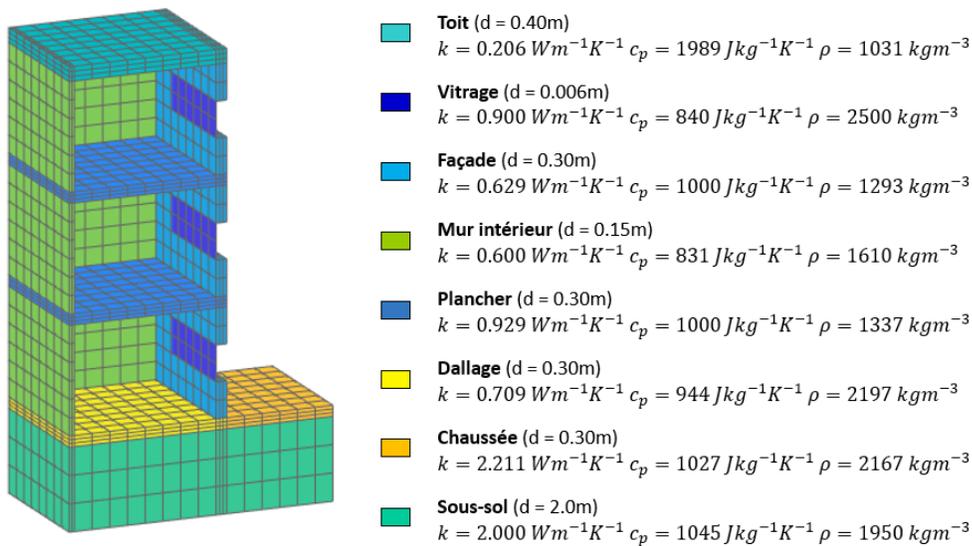


Figure 2.35 Propriétés thermiques des matériaux.

L'étude est menée sur la journée du 26 septembre de minuit à minuit (jour dégagé et chaud).

Pour les flux convectifs, la température de l'air est extraite du fichier de données climatiques de la ville de Cordoue et le coefficient de convection est fixé à $10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ [Mirsadeghi 2013]. À l'intérieur de chaque étage des bâtiments, la température de l'air est laissée libre et le coefficient de convection est fixé à $2.5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ pour les murs, $5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ pour les plafonds et $0.7 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ pour les planchers [CSTB 2012].

Propriétés optiques et radiatives des surfaces

Surfaces		Ondes courtes					Ondes longues		
		τ_r	τ_d	ρ_r	ρ_d	α	ε	$\rho_{r,ol}$	$\rho_{d,ol}$
Façade	Sombre	0	0	0	0.30	0.70	0.90	0	0.10
	Claire	0	0	0	0.70	0.30	0.90	0	0.10
Chaussée		0	0	0	0.10	0.90	0.90	0	0.10
Toit		0	0	0	0.85	0.15	0.90	0	0.10
Plafond		0	0	0	0.85	0.15	0.90	0	0.10
Plancher		0	0	0	0.40	0.60	0.90	0	0.10
Mur intérieur		0	0	0	0.85	0.15	0.90	0	0.10
Vitrage		0.80	0	0.10	0	0.10	0.80	0.2	0

Figure 2.36 Propriétés radiatives des faces de la peau du modèle.

Pour le rayonnement en ondes courtes, les irradiances directes normales et diffuses horizontales sont extraites du fichier de données climatiques. Elles sont introduites dans le modèle de Pérez pour calculer les exitances du ciel en utilisant la partition de Beckers (5 000 éléments). La même partition de ciel est utilisée pour calculer les températures et les exitances du ciel en ondes longues à partir du modèle de Martin et Berdhal [Martin 1984a] (pression de vapeur d'eau, humidité relative, température de l'air et couverture nuageuse). Les propriétés

radiatives en ondes courtes et en ondes longues des faces de la peau du modèle sont montrées sur la Figure 2.36. La Figure 2.37 résume les données d'entrée radiatives du calcul. Pour rappel, la température de l'air extérieur est égale à la température du ciel à l'horizon. C'est pourquoi, elle n'est pas montrée explicitement.

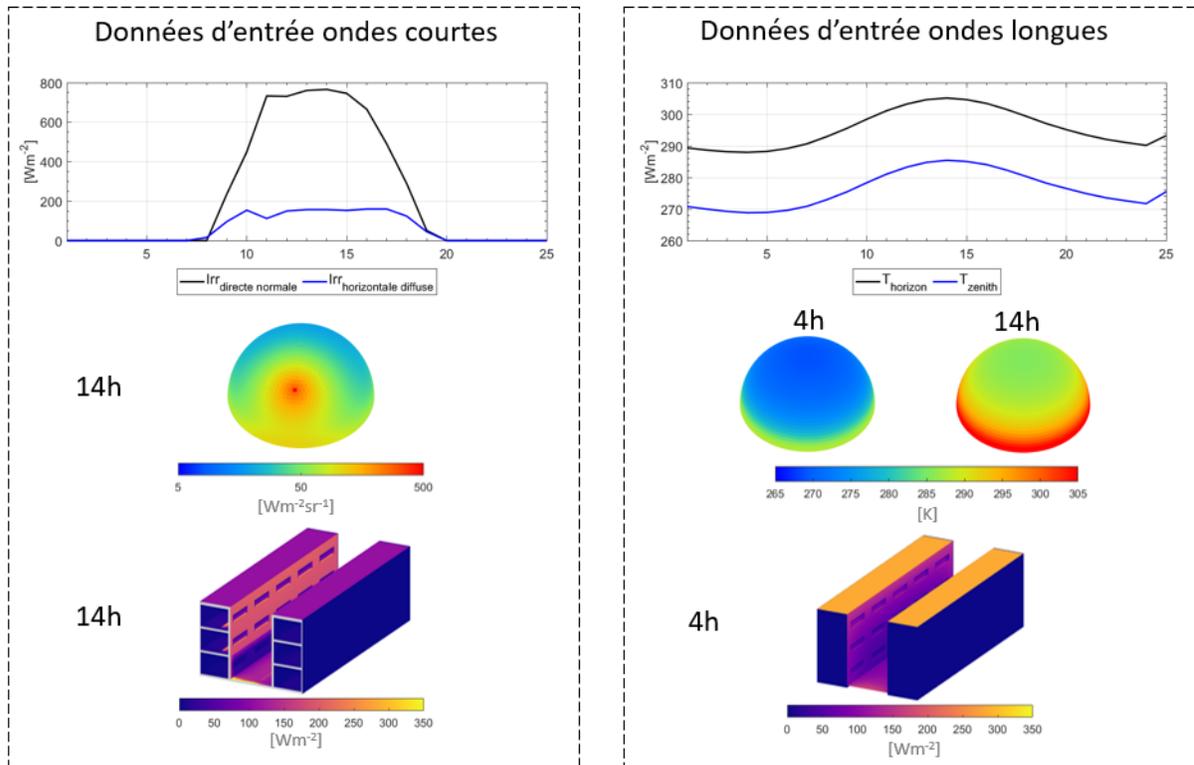


Figure 2.37 Données d'entrée radiatives.

Le problème est résolu en régime transitoire. Le taux de renouvellement d'air est constant et égal à 1 vol h^{-1} . La durée de la simulation est de 24 h. Les températures initiales sont obtenues en résolvant le premier pas de temps en régime permanent.

*

Tout d’abord, nous analysons la finesse du maillage de la rue. Pour cela, nous comparons les résultats obtenus avec des mailles de 1 m, de 50 cm (modèle de référence) et de 25 cm de côté.

Le premier élément de comparaison concerne les températures de surface (Figure 2.38). On obtient les mêmes ordres de grandeur pour les trois modèles étudiés. Dans le modèle grossier, des artefacts brouillent les isothermes alors que dans le modèle intermédiaire, elles sont mieux dessinées et les artefacts proviennent principalement des éléments entre les fenêtres et les planchers. Dans le modèle le plus fin, les isothermes sont parfaitement dessinées et les seuls artefacts présents proviennent des vitrages maillés grossièrement. De plus, on peut voir des taches chaudes sur le sol de la rue du modèle intermédiaire et du modèle le plus fin. Elles proviennent de la réflexion spéculaire du rayonnement solaire sur les vitrages de la façade exposée au sud.

Le second élément de comparaison concerne la température de l’air intérieur (Tableau 2.1). On compare celle de l’appartement du deuxième étage du bâtiment au centre de la rue exposée au sud. On peut voir que la finesse du maillage a une influence sur cette dernière, mais les écarts entre les trois modèles restent faibles.

Taille des mailles	Qualité de la thermographie simulée	Temp. Moy. de l’air intérieur	Temps de calcul	Nombre de faces radiatives	Taille mémoire de la matrice des facteurs de vue
1 x 1 m	Insuffisante	295.40	6 min	28 884	1.6 Gb
0.5 x 0.5 m	Bonne	295.33	10.7 min	40 392	2.5 Gb
0.25 x 0.25 m	Très bonne	295.29	26.2 min	72 768	6.7 Gb

Tableau 2.1 Paramètres d’évaluation des trois modèles.

Le dernier élément de comparaison concerne les temps de calcul (Tableau 2.1). Par rapport au modèle intermédiaire, le maillage grossier diminue de 56 % les temps de calcul alors

que le maillage fin l'augmente de 144 %. Cette modification des temps de calcul provient principalement de la taille de la matrice des facteurs de vue. Le modèle fin multiplie par 2.68 la taille de cette matrice par rapport au modèle de référence.

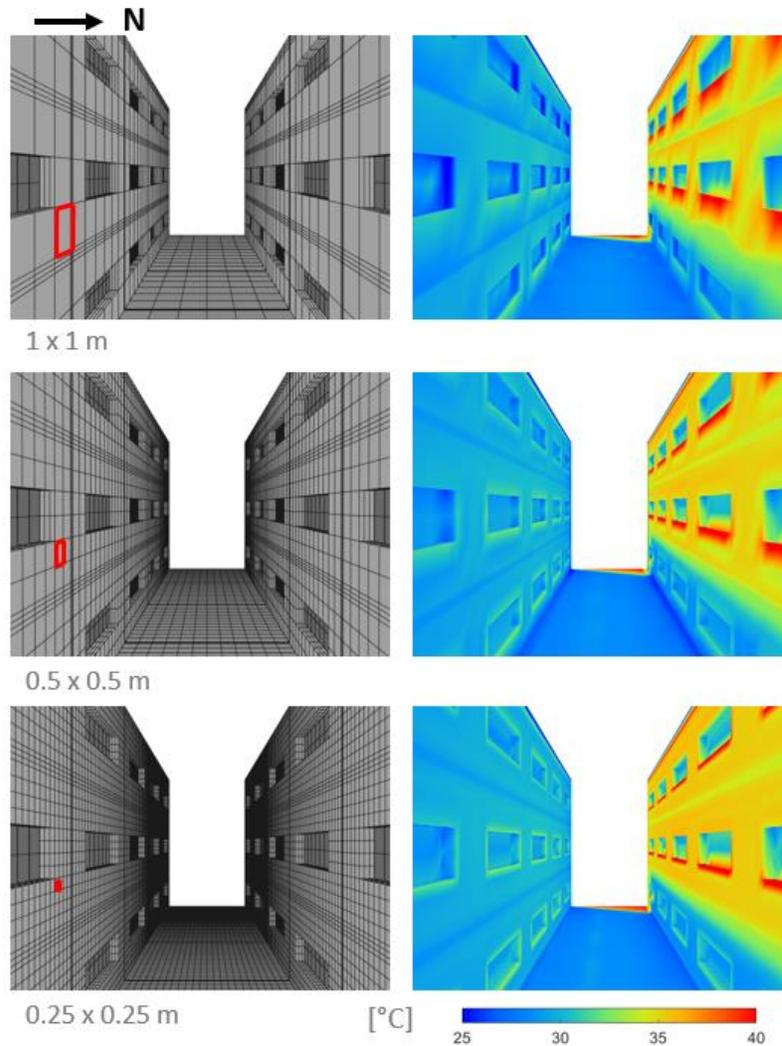


Figure 2.38 Température de surface pour les trois tailles de mailles à 14 h.

Finalement, le modèle le plus fin avec des mailles de 25 cm de côté donne de meilleurs résultats. En revanche, il augmente significativement les temps de calcul ainsi que la mémoire

utilisée. L'influence sur la température de l'air intérieur est limitée. L'utilisation du modèle intermédiaire semble donner le meilleur compromis entre qualité des résultats et temps de calcul. En effet, le nombre d'éléments du modèle le plus fin peut être rédhibitoire (calcul radiatif) pour l'étude d'un gros modèle à l'échelle du quartier.

*

Ensuite, nous étudions l'influence du nombre d'éléments dans l'épaisseur des parois. Pour cela, nous comparons les résultats avec un, deux, trois et quatre éléments selon l'épaisseur des parois.

Le maillage de la rue est construit à partir d'hexaèdres à huit nœuds. Cela implique une interpolation linéaire entre la température des huit nœuds (réalisée grâce aux fonctions de forme). Or, la nature du champ de température étant d'ordre supérieur (quadratique), la précision et la convergence des résultats augmentent avec le nombre d'éléments modélisés selon la direction du gradient de température.

Les modèles avec un, deux, trois et quatre éléments dans l'épaisseur des parois des bâtiments sont appelés respectivement **M1**, **M2**, **M3** et **M4**. La Figure 2.39 montre le nombre d'éléments de volumes et de degrés de liberté en fonction du modèle. Entre le modèle **M1** et le modèle **M4**, le nombre d'hexaèdres est multiplié par 2.46 et le nombre de degrés de liberté par 1.88.

Pour comparer les modèles, nous analysons la température des nœuds extérieurs (**NE** sur la Figure 2.39) et intérieurs (**NI**) du mur de façade du bâtiment au centre de la rue (exposée au sud). Elles sont montrées sur la Figure 2.40 pour toute la durée de la simulation en fonction de chaque modèle. La température de l'air intérieur de l'appartement du mur de façade est également montrée.

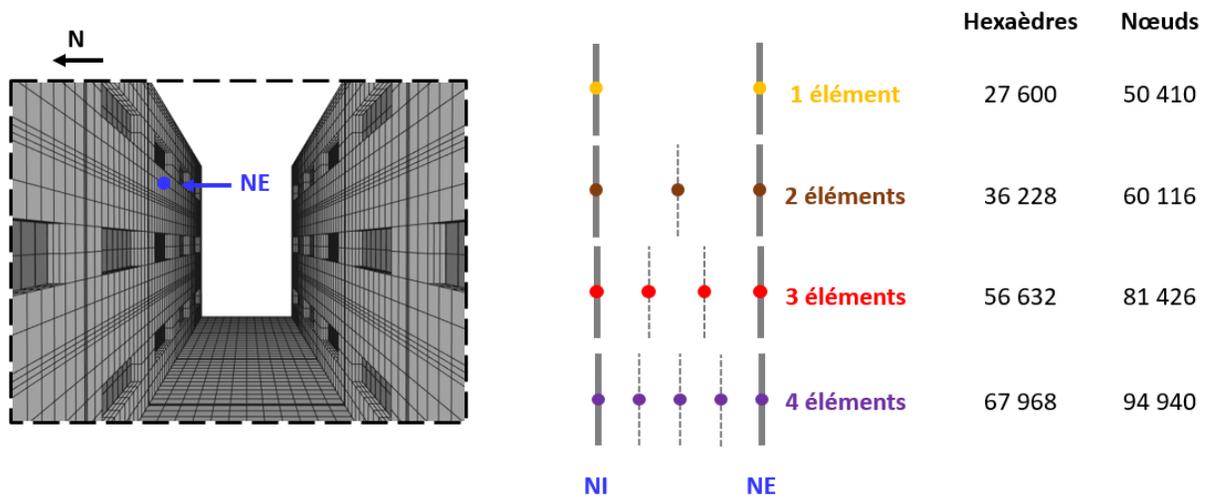


Figure 2.39 Position du point **NE** à gauche et nombre d'éléments et de nœuds selon le modèle à droite.

Pour les trois températures de comparaison (**NE**, **NI** et **air intérieur**), le modèle **M1** donne des résultats très éloignés des autres modèles. Cela est particulièrement vrai pour **NI** avec une température qui diminue à la mi-journée alors que celles des autres modèles augmentent. Pour les trois autres modèles, les températures ont le même comportement mais il semble que le calcul du modèle **M2** n'ait pas totalement convergé. Entre les deux derniers modèles (**M3** et **M4**), les différences sont négligeables (critère de précision égal à 0.1 K).

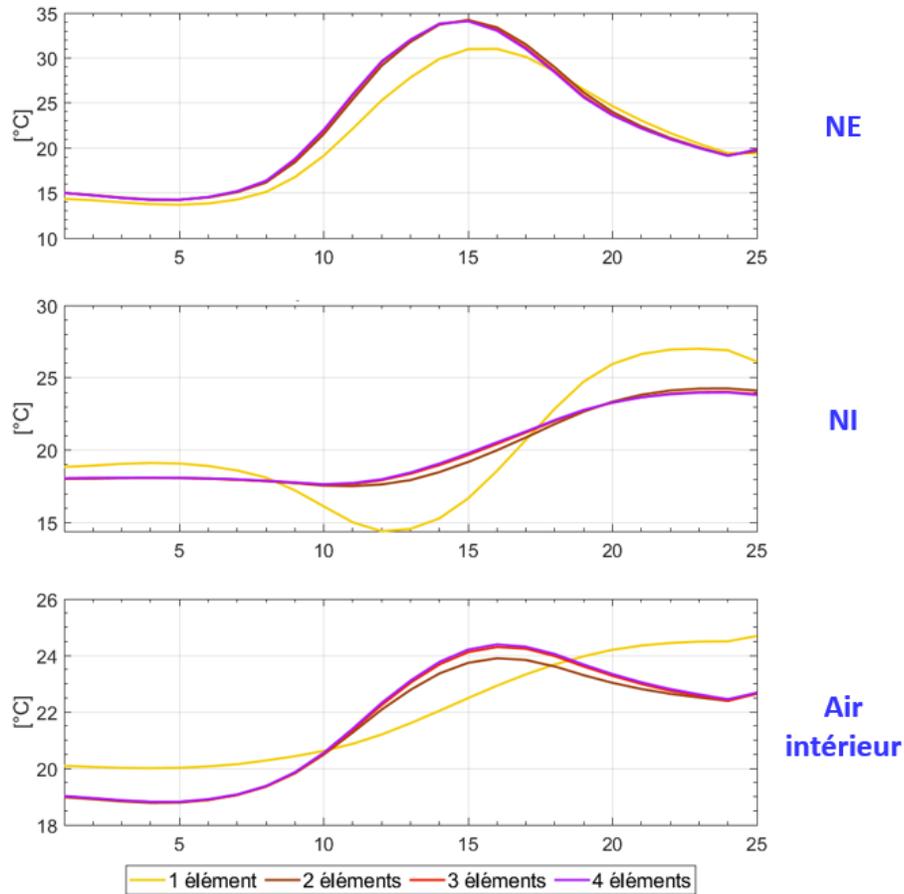


Figure 2.40 Température des nœuds NE, NI et de l'air intérieur.

La Figure 2.41 montre la température des nœuds à l'intérieur du mur pour quatre moments de la journée. L'axe des abscisses représente la largeur du mur avec à gauche le nœud extérieur du mur NE et à droite le nœud intérieur du mur NI. Chaque nœud est représenté par un point sur les courbes de température (2 points pour M1, 3 points pour M2, 4 points pour M3 et 5 points pour M4).

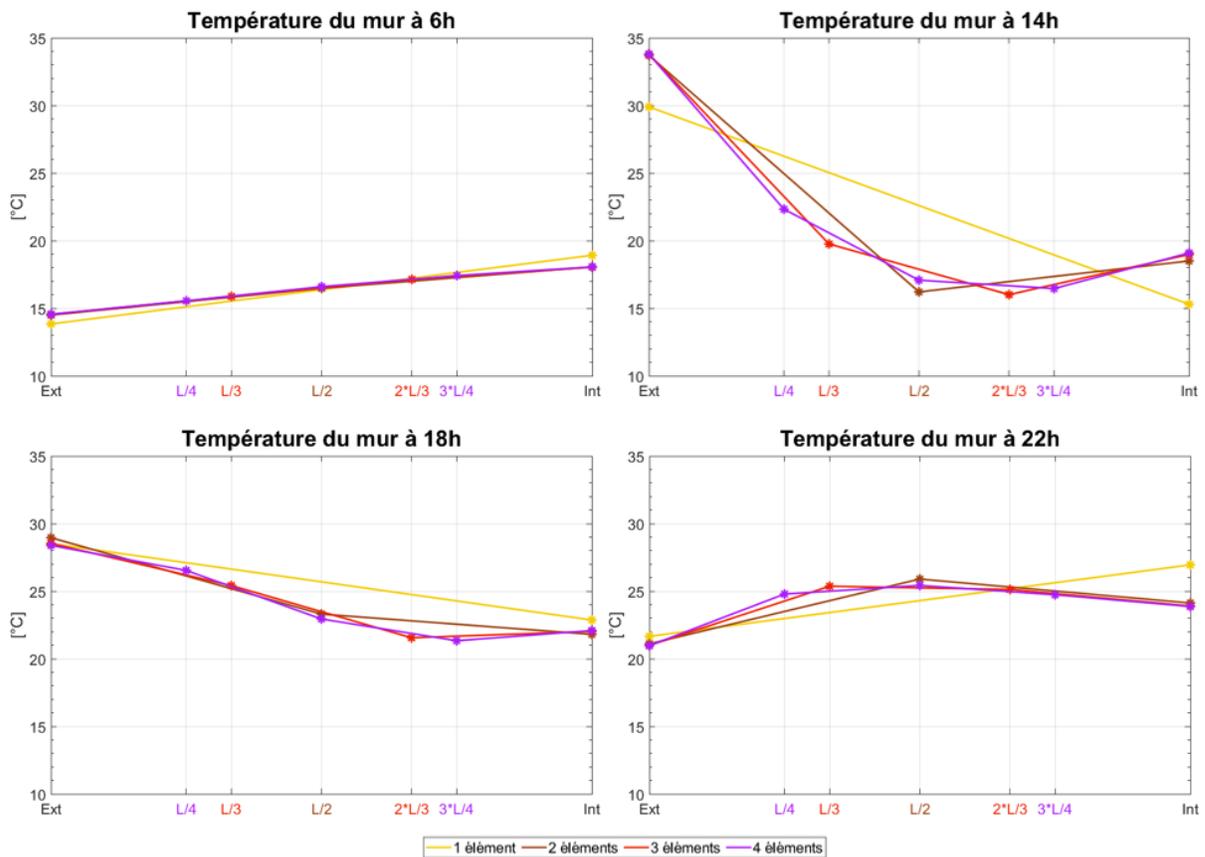


Figure 2.41 Température sur le mur de façade pour quatre moments de la journée en fonction du nombre d'éléments.

Le modèle **M1** donne des résultats très éloignés des autres modèles. À 14 h, les différences avec les autres modèles atteignent 5 K pour les nœuds de surface. Pour les trois autres modèles, les températures sont plus cohérentes, mais des différences persistent.

Pendant la nuit, la température du mur est plutôt homogène et les quatre modèles donnent quasiment les mêmes températures avec une légère déviation (-0.15 K) pour le modèle **M1**. En début d'après-midi, la température du mur varie de presque 15 K entre l'extérieur et l'intérieur du mur. Cela provient du fait que le nœud extérieur est exposé au rayonnement solaire direct. Le modèle **M1** donne des températures incohérentes à ce moment-là avec une température du

nœud intérieur qui a diminué par rapport aux températures de 6 h. Par ailleurs, on peut voir une différence non négligeable de la température de ce nœud (-0.5 K) entre le modèle M2 et les modèles M3 et M4. En fin d'après-midi, la température du mur devient plus homogène et les températures des nœuds NE et NI tendent à s'équilibrer. À la fin de la journée, la température du nœud extérieur NE a baissé de 8 K en trois heures et on peut voir que, du fait de l'inertie thermique du mur, de la chaleur est encore présente à l'intérieur du mur. À la tombée de la nuit, comme en début de simulation (conditions environnementales homogènes), les trois modèles M2, M3 et M4 donnent des températures similaires.

Les temps de calcul ne constituent pas un élément de comparaison déterminant dans ce cas car ils varient de 7.3 min pour le modèle M1 à 11.5 min pour le modèle M4.

Finalement, les résultats montrent que pour cette configuration de rue, trois éléments au minimum sont nécessaires pour assurer la convergence des résultats. Avec un élément, les résultats divergent et avec deux éléments ils n'ont pas totalement convergé. Les modèles avec trois et quatre éléments donnent des résultats similaires avec des différences inférieures au critère de précision (0.1 K).

*

Pour conclure sur l'étude des paramètres liés au maillage, des mailles de 50 cm et trois éléments dans l'épaisseur des parois sont suffisants pour obtenir la convergence des résultats ainsi qu'une qualité de représentation acceptable.

2.9.2 Température moyenne radiante

Dans cette section, nous introduisons le second paramètre d'évaluation du confort thermique (le premier étant la température de l'air intérieur des bâtiments). Ce paramètre est la température moyenne radiante (T_{mrt}). Elle caractérise le confort thermique dans la rue (piétons).

*

La T_{mrt} décrit l'effet d'un environnement radiant et se mesure à l'aide d'un globe noir. Le principe est de déterminer la quantité d'énergie radiante arrivant sur ce globe et provenant de l'environnement autour de celui-ci. Cet environnement est constitué du ciel, du soleil et de l'environnement bâti. La quantité d'énergie radiante se compose des irradiances en ondes courtes et en ondes longues reçues par le globe directement et par réflexion.

Une méthode permettant de calculer la T_{mrt} consiste à intégrer un globe noir dans les simulations (méthode du globe noir simulé). Ce globe noir est assimilé à une sphère de 2.5 cm de rayon. Les irradiances en ondes courtes et en ondes longues sur cette dernière sont déterminées avec la méthode de radiativité. Cela implique de discrétiser la sphère en un maillage surfacique conforme. Cette condition de conformité permet d'éviter des trous lorsque la sphère est facettée. Cette sphère est appelée globe noir simulé.

Le globe noir simulé est discrétisé selon la partition de la sphère de Beckers. Pour obtenir la conformité du maillage, chaque anneau contient le même nombre de carreaux et le nombre d'anneaux est deux fois plus petit que le nombre de carreaux d'un anneau. L'angle solide des carreaux varie en fonction de l'angle zénithal. Le maillage du globe noir simulé est composé de quadrilatères et de triangles (premier et dernier anneau) (Figure 2.42).

Ce maillage est ajouté au maillage surfacique de l'environnement bâti et du ciel et les facteurs de vue de l'ensemble du modèle sont calculés. Ensuite, l'équation de radiativité est

résolue de manière itérative en ondes courtes, dont les sources sont le ciel et le soleil, puis en ondes longues, dont les sources sont le ciel et les faces de l'environnement bâti. Les faces du globe noir simulé absorbent la totalité du rayonnement qu'elles reçoivent pour l'ensemble du spectre ($\varepsilon_{g,ol} = 1$ et $\alpha_{g,oc} = 1$).

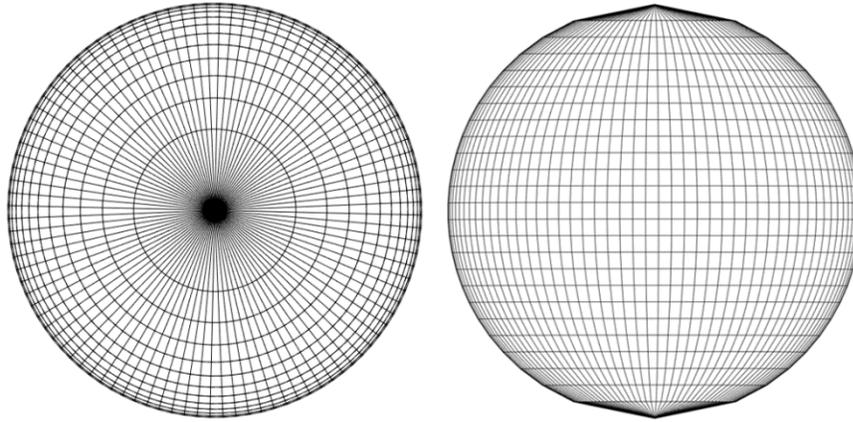


Figure 2.42 Maillage conforme de la sphère avec 50 carreaux par anneau, soit 1 250 carreaux au total.

La résolution de l'équation de radiativité donne une irradiance en ondes courtes $E_{g,oc,i}$ et une en ondes longues $E_{g,ol,i}$ pour chaque carreau du globe noir simulé. Pour chacun d'eux, les irradiances sont additionnées et intégrées selon l'aire de chaque carreau. Le flux radiant total du globe noir simulé ϕ_r (Wm^{-2}) est obtenu en additionnant l'ensemble des irradiances :

$$\phi_r = \frac{(\alpha_{g,oc} \sum_{i=1}^n E_{g,oc,i} * A_i + \varepsilon_{g,ol} \sum_{i=1}^n E_{g,ol,i} * A_i)}{A_{sphere}} \quad \text{Éq 2-37}$$

Avec $E_{g,oc,i}$ et $E_{g,ol,i}$ (Wm^{-2}) l'irradiance sur le carreau i en ondes courtes et en ondes longues respectivement, n le nombre de carreaux du globe noir simulé, A_i l'aire du carreau i et A_{sphere} l'aire totale du globe noir simulé (m^2).

Enfin, la T_{mrt} (K) est calculée par application de la loi de Stefan-Boltzmann en supposant le globe noir simulé comme un corps noir :

$$T_{mrt} = \sqrt[4]{\frac{\phi_r}{\sigma * \epsilon_{g,ol}}} \quad \text{Éq 2-38}$$

*

Nous calculons la T_{mrt} sur le modèle de simulation de la rue canyon (section précédente) avec trois éléments dans l'épaisseur des parois et des mailles de 50 cm de côté. La T_{mrt} est calculée à trois hauteurs différentes au centre de la rue (1 m, 5 m et 10 m). Trois globes noirs sont modélisés et ajoutés au modèle surfacique de l'environnement bâti. Après un test de sensibilité, il apparaît qu'une cinquantaine de carreaux par globe est suffisant pour obtenir la convergence du calcul de la T_{mrt} .

La Figure 2.43-a) montre les températures de surface et la T_{mrt} des trois points étudiés à trois moments de la journée. La Figure 2.43-b) montre la T_{mrt} des trois points étudiés pour toute la journée du 26 septembre à Cordoue.

La T_{mrt} varie selon la hauteur de la rue. Cette variation est intimement liée au facteur de vue du ciel. Les trois globes simulés possèdent un facteur de vue du ciel de 12%, 19% et 50% respectivement (du plus bas au plus haut). Pendant la nuit, le rayonnement en ondes longues de l'environnement bâti est plus important que celui du ciel, c'est pourquoi le globe le plus bas a une T_{mrt} plus élevée que les deux autres. Pendant la journée, le rayonnement en ondes courtes du ciel est prédominant par rapport au rayonnement en ondes longues, c'est pourquoi le globe le plus haut a une T_{mrt} bien plus élevée que les deux autres.

Le Tableau 2.2 donne le pourcentage des contributions de chaque type de rayonnement pour les trois globes simulés à 14 h. Le globe le plus bas est plus impacté par le rayonnement en ondes longues de l'environnement bâti alors que le troisième globe est plus impacté par le rayonnement en ondes courtes.

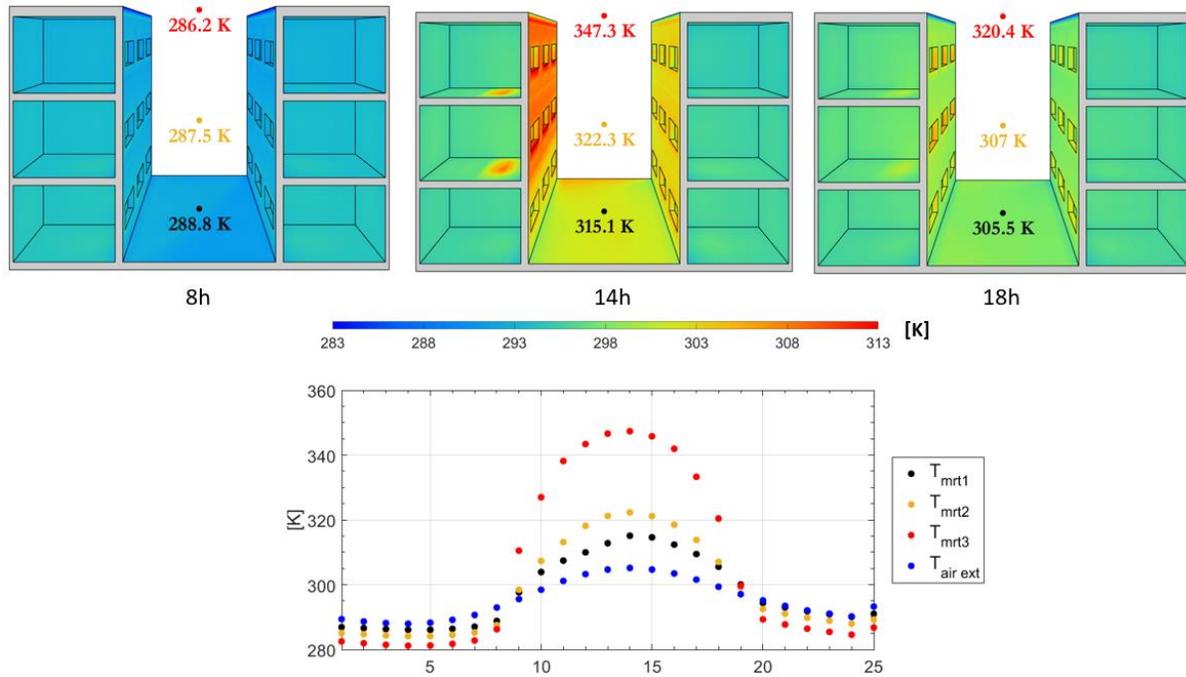


Figure 2.43 a) Température de surface et T_{mrt} pour trois moments de la journée. b) T_{mrt} des trois points étudiés pendant toute la journée.

Globe	Ray OL env. bâti	Ray OL ciel	Ray OC	Facteur de vue du ciel
1	72.3 %	10.25 %	17.45 %	12 %
2	61.49 %	13.37 %	25.14 %	19 %
3	27.89 %	26.21 %	45.9 %	50 %

Tableau 2.2 Contribution de chaque type de rayonnement à 14 h sur les trois globes simulés.

Sur la Figure 2.43-b), on voit clairement cette variation de T_{mrt} tout au long de la journée. Pendant la nuit, plus le globe est haut, plus sa T_{mrt} diminue, et inversement pendant la journée. De plus, la T_{mrt} du globe le plus haut est bien plus élevée que les deux autres à mesure que le soleil atteint son angle zénithal maximal. Cela s'explique par le fait que ce globe reçoit du rayonnement direct du soleil alors que les deux autres reçoivent uniquement du rayonnement diffus provenant du ciel et par réflexion sur l'environnement bâti (diffuse et spéculaire).

*

Une des limitations de cette méthode réside dans le fait que le maillage des globes noirs est ajouté au modèle surfacique de l'environnement bâti, ce qui augmente le nombre de faces de l'ensemble du modèle. Cela implique une augmentation de la taille de la matrice des facteurs de vue et donc des temps de calcul. Cette augmentation du nombre de faces peut être préjudiciable pour l'élaboration d'une carte de température moyenne radiante (multiplication du nombre de globes noirs). De plus, cette méthode ne permet pas de visualiser la provenance des irradiances en ondes courtes et en ondes longues reçues par le globe. Ces deux raisons principales limitent son utilisation.

La méthode des images 4π est une autre méthode permettant de calculer la T_{mrt} . Elle est basée sur le principe du rendu réaliste (lancer de rayons) et permet d'obtenir des images planes du rayonnement reçu par le globe noir simulé.

*

Méthode des images 4π

Le principe de cette méthode est de représenter l'environnement radiant sur une sphère autour d'un point [Acuña Paz y Miño 2020b]. Cette sphère est discrétisée selon la partition de Beckers dont chaque carreau représente le même angle solide. Pour chaque carreau, on détermine la quantité d'énergie rayonnante en ondes courtes et en ondes longues qui lui arrive (irradiance élémentaire) par un tir de rayons. Ensuite, on intègre l'ensemble de ces irradiances sur la sphère pour obtenir le flux total radiant. Ce dernier permet de calculer la température moyenne radiante au centre de la sphère.

Le lancer de rayons est utilisé pour déterminer la contribution de l'environnement dans chaque angle solide de la sphère. Le problème est alors d'être capable de lancer les rayons de manière uniforme dans tout l'espace entourant le point étudié. Nous utilisons une méthode efficace pour réaliser le tir [Beckers 2014]. Le tir est réalisé non pas sur l'ensemble du domaine, mais à l'intérieur de cellules dont l'union recouvre le domaine. Cela consiste donc à construire un maillage sur la sphère supportant le tir. Le fait de créer un maillage fournit automatiquement un moyen d'organiser un tir déterministe ou aléatoire à l'intérieur des mailles. Nous utilisons la partition équivalente de la sphère de Beckers qui possède l'avantage que tous les carreaux ont le même angle solide et que le nombre de carreaux n'est pas imposé. Concernant le type de tir, nous procédons avec des tirs stratifiés qui définissent la position des rayons à l'intérieur de chaque carreau de manière aléatoire. La Figure 2.44 montre la partition de la sphère de Beckers pour 490 carreaux ainsi que la position des rayons d'un tir aléatoire. Pour réaliser le lancer de rayons, nous utilisons Embree, le même logiciel utilisé pour le calcul des facteurs de vue.

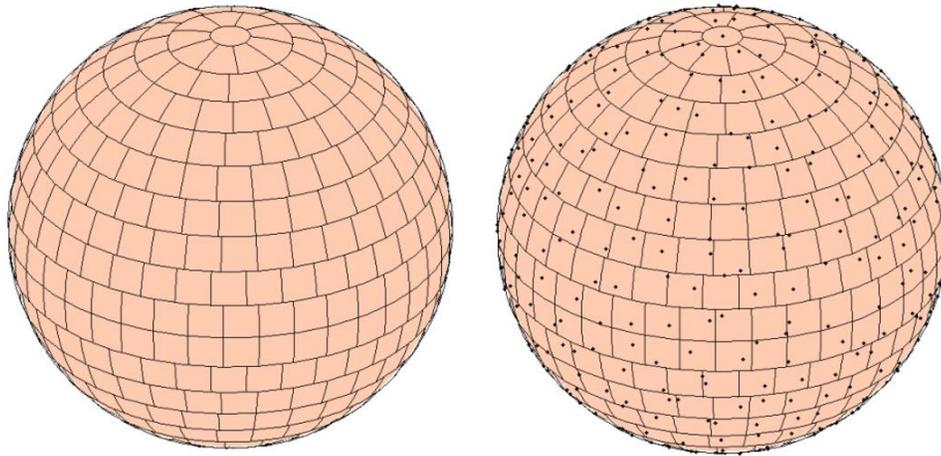


Figure 2.44 Sphère composée de 490 éléments (gauche) et leurs 490 rayons aléatoires (droites).

Les irradiances en ondes courtes et en ondes longues reçues par chaque carreau sont déterminées selon le principe de la Figure 2.45. L'irradiance reçue par le globe dans chaque angle solide est égale à la radiosité de la face (ou du carreau de ciel) rencontrée par le rayon représentant cet angle solide. Dans la suite de cette section, on appelle *face diffuse* une face qui réfléchit le rayonnement incident indépendamment de la direction et *réflexion diffuse* la quantité d'énergie rayonnante réfléchie par une *face diffuse*.

Soit le rayon rencontre directement une face diffuse j de l'environnement bâti, la radiosité en ondes courtes est alors égale à la réflexion diffuse de cette face ($\rho_{a,j}E_{oc,j}$) et la radiosité en ondes longues est égale à la réflexion diffuse de cette face plus son émission en ondes longues ($\epsilon_j\sigma T_j^4 + (1 - \epsilon_j)E_{ol,j}$).

Soit le rayon rencontre un carreau de ciel c , les radiosités en ondes courtes et en ondes longues sont alors égales à l'émission de ce carreau dans les bandes correspondantes ($M_{ol,ciel,c}$ et $M_{oc,ciel,c}$).

Soit le rayon rencontre une face spéculaire j (vitrage), dans ce cas il faut continuer le chemin du rayon avec un angle de réfraction égal à l'angle d'incidence. Le chemin du rayon est prolongé tant que ce dernier ne touche pas de face diffuse ou un carreau de ciel p . Si le rayon rencontre finalement une face diffuse de l'environnement bâti, la radiosité en ondes courtes dans la direction du rayon est égale à la réflexion diffuse de cette face pondérée par la somme des coefficients de Fresnel de chaque vitrage rencontré sur le chemin du rayon ($B_{oc,p} * pond$) ; la radiosité en ondes longues est égale à la réflexion diffuse de cette face pondérée par le coefficient d'absorption de chaque vitrage rencontré par le rayon ($(1 - \epsilon_{vit})^n E_{ol,p}$), plus l'émission propre du premier vitrage rencontré ($\epsilon_j \sigma T_j^4$). Si le rayon rencontre finalement un carreau de ciel, le calcul de l'irradiance reçu par le globe est le même que précédemment en remplaçant la radiosité de la face diffuse par l'émission du carreau de ciel touché.

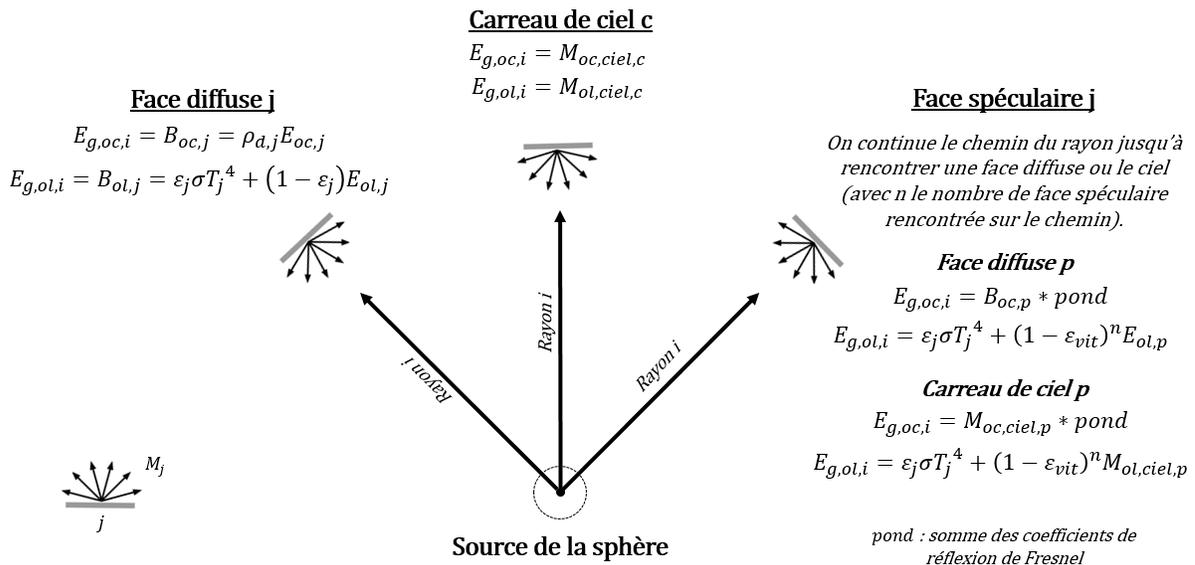


Figure 2.45 Calcul des irradiances en fonction du type de face rencontrée par le rayon.

Finalement, les irradiances en ondes courtes et en ondes longues de chaque carreau du globe simulé sont additionnées pour constituer l'irradiance totale élémentaire de chaque carreau. On obtient donc autant de valeurs d'irradiances que de carreaux sur la sphère.

Puisque la partition équivalente (angles solides égaux) de la sphère a été utilisée, le flux total radiant est calculé comme la moyenne des irradiances totales élémentaires (Éq 2-39) et la T_{mrt} est calculée selon la loi de Stefan-Boltzmann (Éq 2-38).

$$\phi_r = \frac{(\alpha_{g,oc} \sum_{i=1}^n E_{g,oc,i} + \varepsilon_{g,ol} \sum_{i=1}^n E_{g,ol,i})}{N_{sphere}} \quad \text{Éq 2-39}$$

Pour observer et quantifier précisément la contribution de chaque surface de la scène à la T_{mrt} , la sphère est projetée dans le plan en utilisant la projection de Mollweide [Lapaine 2011] [Beckers 2014]. Il s'agit d'une projection équivalente (les aires relatives de la sphère sont conservées). Pour assurer la cohérence des graphiques et faciliter les comparaisons, les scènes sont toujours orientées vers le sud, de sorte que les centres des projections indiquent toujours le sud dans le plan de référence horizontal (Figure 2.46, à droite). Les deux extrémités de l'axe horizontal indiquent le nord, elles représentent la même direction. À mi-distance du centre et de l'extrémité gauche (droite), on trouve la direction est (ouest). Pour comparaison, la projection orientée vers l'est est montrée (Figure 2.46, à gauche). Sur ces images, chaque carreau de la sphère représente un pixel. Ainsi, pour construire ces images, la sphère a été partitionnée en 600 000 carreaux (égal au nombre de rayons lancés). Autrement dit, le nombre de rayons lancés est égal au nombre de pixels de l'image 4π .

La précision du calcul de la T_{mrt} ainsi que la qualité de l'image 4π dépendent du nombre de rayons lancés. Dans le cas de la rue canyon des sections précédentes, 50 000 rayons sont suffisants pour obtenir une convergence et retrouver les résultats obtenus avec la première méthode (méthode du globe noir simulé). En revanche pour obtenir une image de qualité

satisfaisante, 100 000 rayons sont nécessaires. Ce nombre de rayons varie en fonction de la complexité de la géométrie de l'environnement bâti ainsi que du nombre de carreaux de la partition du ciel.

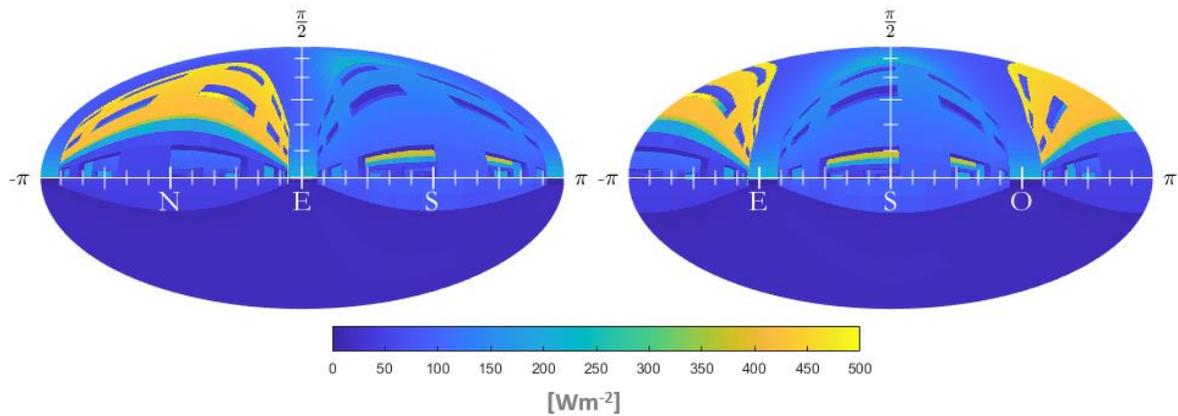


Figure 2.46 Projection de Mollweide (600 000 pixels) de la rue selon deux orientations.
Irradiances en ondes courtes à 14 h.

La Figure 2.47 montre les irradiances en ondes courtes, en ondes longues et totales pour trois moments de la journée. La moyenne des irradiances totales donne la température moyenne radiante au centre de la sphère.

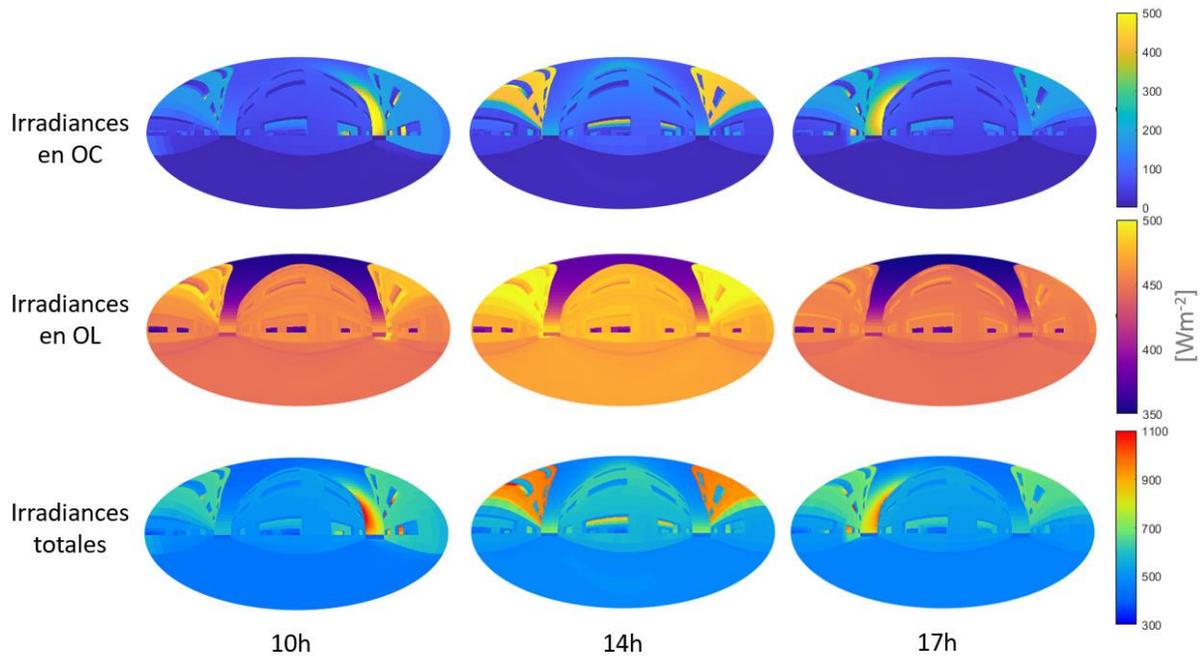


Figure 2.47 Irradiances pour trois moments de la journée.

2.9.3 Discussion sur la couleur des façades

Pour compléter l'étude de la rue idéalisée de Cordoue, nous nous intéressons à une pratique courante de la rénovation thermique qui consiste à modifier la couleur des façades. Nous comparons des façades claires et sombres avec un coefficient de réflexion diffus égal à $\rho_{d,claire} = 0.7$ et $\rho_{d,sombre} = 0.3$ respectivement.

La Figure 2.48 montre les résultats pour le modèle clair à gauche et le modèle sombre à droite. Les températures de surface sont montrées à 14 h. Dans le cas des façades sombres, la façade exposée au sud est plus chaude du fait qu'elle absorbe plus de rayonnement en ondes courtes. En revanche, la façade exposée au nord et le sol de la rue sont plus froids car ils reçoivent moins de rayonnement en ondes courtes provenant de la réflexion de la façade exposée au sud.

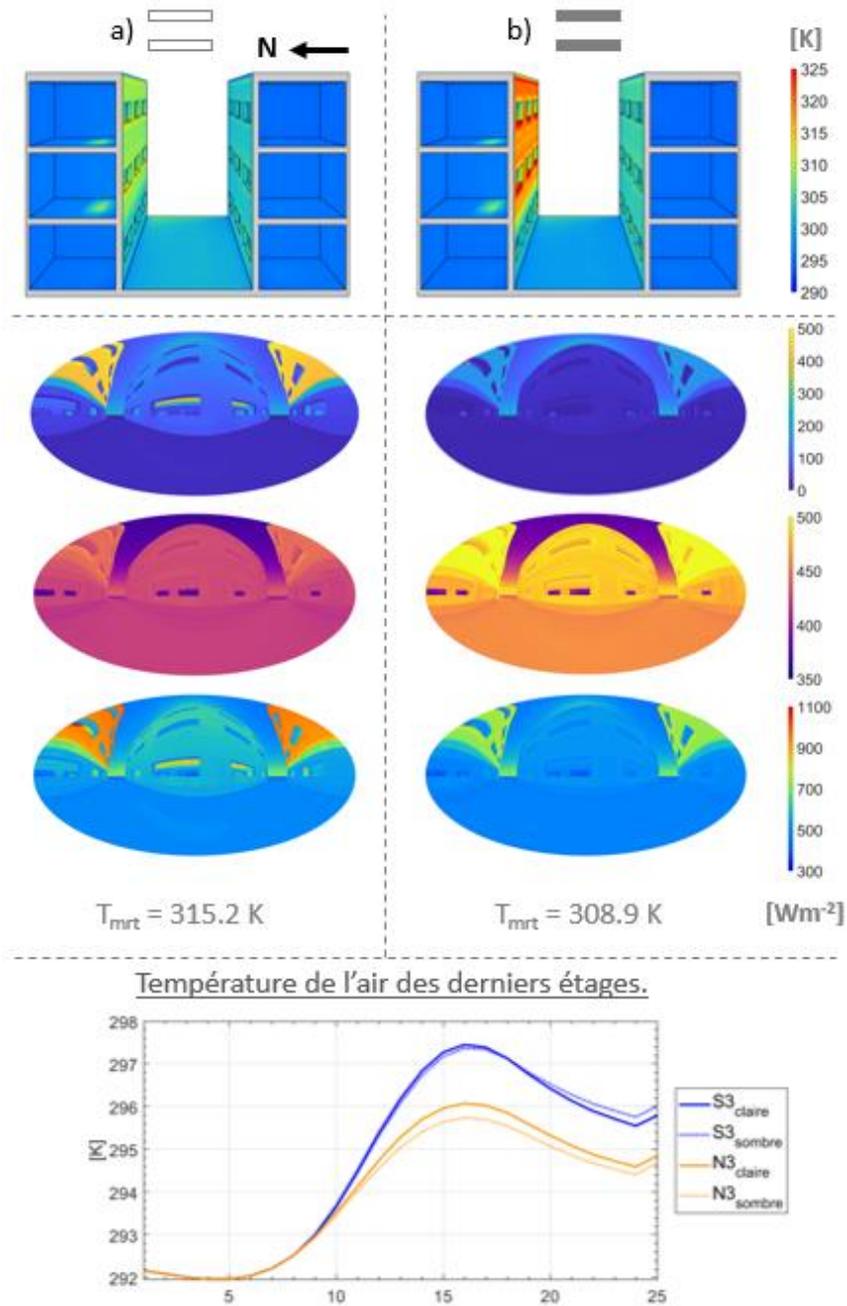


Figure 2.48 Résultats des simulations : Température de surfaces à 14 h, Irradiances en ondes courtes, ondes longues et totales à 14 h, Température de l'air des derniers étages des bâtiments au centre de la rue.

La T_{mrt} est calculée au centre de la rue à un mètre cinquante du sol. Elle est plus élevée pour le modèle clair que pour le modèle sombre à ce moment de la journée. Les façades sombres ont pour effet de diminuer le rayonnement reçu en ondes courtes et d'augmenter celui reçu en ondes longues par la sphère. L'augmentation du rayonnement en ondes longues ne compense pas la diminution du rayonnement en ondes courtes, toutes deux provoquées par les façades sombres. C'est pourquoi la T_{mrt} est plus faible lorsque les façades sont claires.

Les températures de l'air des deux derniers étages des deux bâtiments au centre de la rue sont montrées. On désigne par S3 et N3 les appartements orientés respectivement au sud et au nord. Tout d'abord, la température de S3 est toujours supérieure à celle de N3 à cause du rayonnement en ondes courtes reçu directement. Pour N3, la température de l'air lorsque les façades sont claires est toujours supérieure à celle du modèle avec des façades sombres. Cela provient des réflexions de la façade sud qui pénètrent à l'intérieur de l'appartement par la fenêtre. Pour S3, la température de l'air est supérieure lorsque les façades sont claires jusqu'en fin d'après-midi. Après, la température de l'air est plus élevée lorsque les façades sont sombres. Ce changement provient de l'énergie stockée par les murs de façades et qui parvient à l'intérieur de l'appartement.

*

Pour analyser spatialement la T_{mrt} de la rue, nous réalisons des cartes de T_{mrt} . L'idée est de définir une grille de points et d'appliquer la méthode des images 4π sur chacun de ces points. Les valeurs obtenues sont ensuite interpolées linéairement entre chaque point de la grille.

Pour faciliter les comparaisons, les cartes sont toujours montrées en vue de dessus, de sorte que le nord soit toujours vers le haut. La Figure 2.49 montre la T_{mrt} de la rue à 14 h ainsi que le maillage des bâtiments. Il apparaît un gradient de T_{mrt} important entre le côté est (310 K) et ouest (345 K). Cela s'explique par le fait que les points du côté ouest reçoivent du rayonnement solaire directement alors que les points du côté est sont à l'ombre, à ce moment

de la journée. Les points du côté sud ont une T_{mrt} plus élevée que les points du côté nord parce qu'ils reçoivent le rayonnement solaire réfléchi par la façade des bâtiments d'en face.

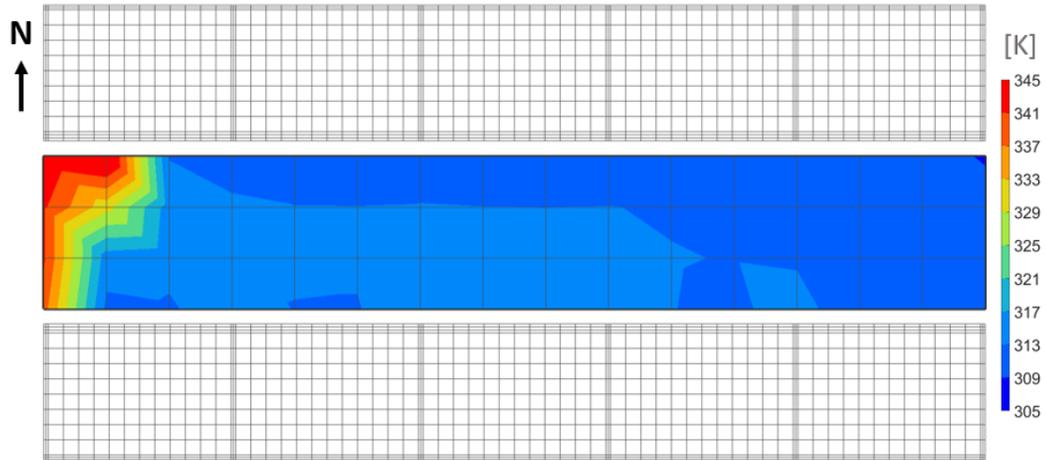


Figure 2.49 T_{mrt} de la rue à 14 h.

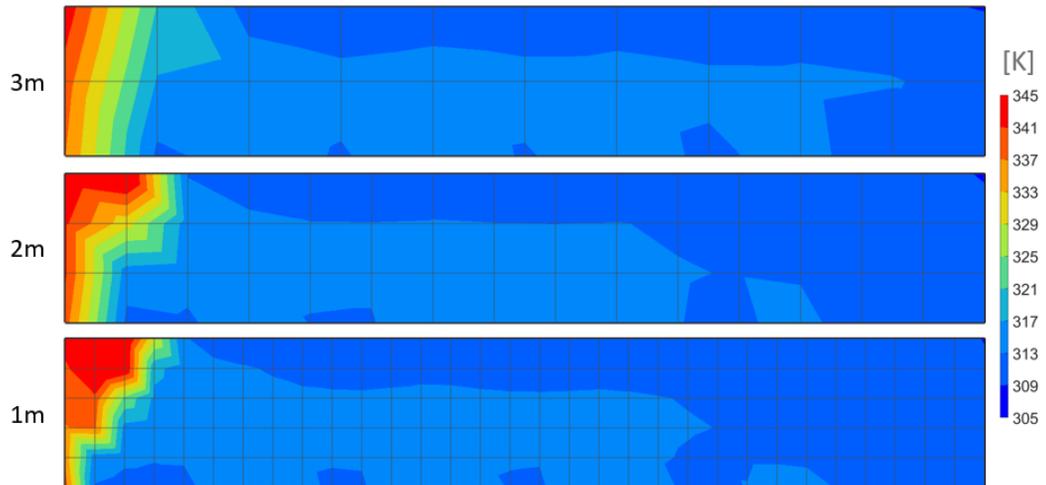


Figure 2.50 T_{mrt} de la rue à 14 h pour différentes tailles de grilles.

La qualité de l'interprétation des cartes de T_{mrt} dépend du nombre de points de la grille. La Figure 2.50 montre la T_{mrt} de la rue à 14 h avec des largeurs de mailles de la grille de trois mètres, deux mètres et un mètre. Ces grilles comportent 33, 64 et 192 points. La grille la plus fine est de meilleure qualité que les deux autres mais demande un temps de calcul plus long. Notons que les valeurs de T_{mrt} ne dépendent pas du nombre de points de la grille, mais du nombre de rayons lancés. La grille intermédiaire est le meilleur compromis entre qualité graphique et temps de calcul.

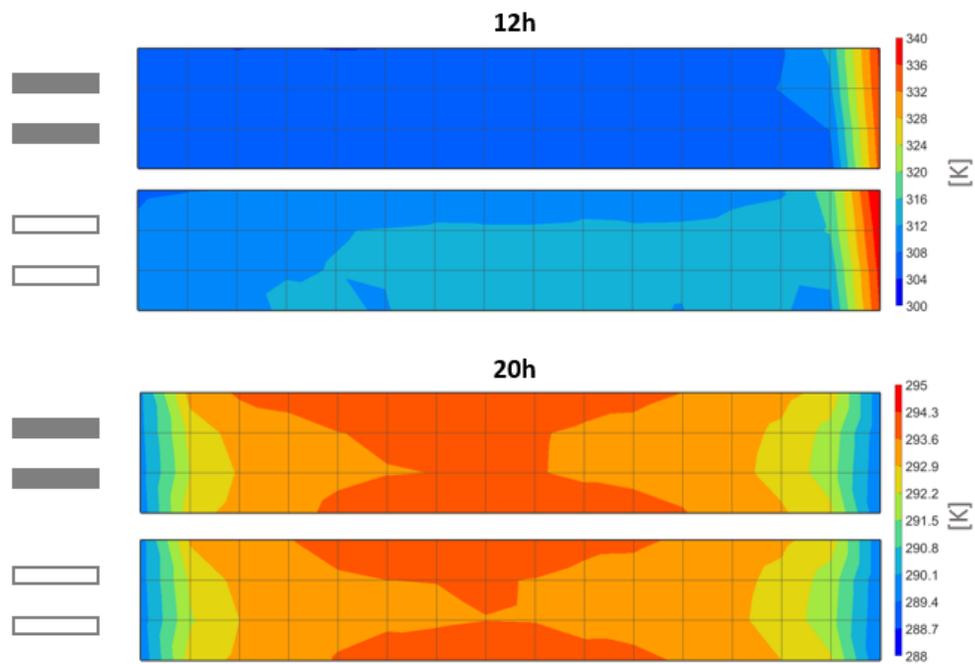


Figure 2.51 T_{mrt} pour les modèles avec des façades claires et sombres à 12 h et 20 h.

La Figure 2.51 montre la T_{mrt} de la rue à 12 h et à 20 h pour les modèles avec les façades claires et sombres. Au milieu de la journée, les façades claires engendrent une T_{mrt} plus élevée que les façades sombres pour l'ensemble de la rue. Cela provient de la réflexion diffuse des façades exposées au sud. En revanche, à 20 h lorsque le soleil n'atteint plus les façades des

bâtiments et que ces dernières ont emmagasiné de la chaleur pendant toute l'après-midi, la T_{mrt} de la rue est plus élevée lorsque les façades sont sombres. En effet, à ce moment de la journée, le rayonnement en ondes longues est prédominant sur les échanges radiatifs. Néanmoins, ce phénomène s'estompe d'autant plus vite que l'inertie thermique des façades est faible.

*

Pour conclure sur l'influence de la couleur des façades sur le confort thermique de la rue canyon, les façades sombres donnent de meilleurs résultats autant pour les piétons que pour les habitants. Le rayonnement solaire étant prédominant dans ce type de configuration à Cordoue, il impacte non seulement la T_{mrt} de la rue mais aussi la température de l'air des appartements.

2.10 Synthèse de la méthode

Ce chapitre propose un environnement de logiciels autour d'un solveur éléments finis pour l'étude thermique d'un site urbain. Cet ensemble permet de considérer le problème thermique complet (conductif, convectif et radiatif) en faisant de la géométrie un élément essentiel à sa résolution. Il comporte trois parties : le prétraitement (maillage et conditions aux limites), le calcul thermique et l'exploitation des résultats.

Le maillage volumique est un maillage structuré avec un maximum d'hexaèdres ; des prismes peuvent être présents pour correspondre au caractère pentu des toits. Ce maillage peut être créé soit directement dans le solveur éléments finis soit importé depuis un modèle CAO (Conception assistée par Ordinateur) qui est son propre maillage. La peau de ce maillage volumique (maillage surfacique) permet de modéliser les conditions aux limites convectives et radiatives.

Les conditions aux limites convectives dépendent des coefficients d'échange convectifs et de la température de l'air. Les coefficients d'échange sont pris de manière forfaitaire pour l'extérieur et selon la réglementation thermique française pour l'intérieur. Ils sont constants dans le temps mais peuvent varier selon la géométrie. La température de l'air extérieur varie en fonction du temps et de l'espace et est issue soit des fichiers météorologiques soit d'une campagne de mesures.

Les conditions aux limites du rayonnement en ondes courtes, dont les sources sont le ciel et le soleil, sont déterminées en dehors du solveur éléments finis. Les données d'entrée (issues des fichiers météorologiques ou de mesures) sont les irradiances diffuses horizontales et directes normales. La voûte céleste est discrétisée selon la partition de Beckers (angles solides égaux) sur laquelle le modèle tout temps de Pérez est appliqué pour déterminer les exitanes de chaque carreau de ciel. Les facteurs de vue entre le maillage surfacique de l'environnement bâti et les carreaux de ciel sont remplacés par les facteurs de vue étendus qui permettent de

prendre en compte la transmittance et la réflexion régulières. Ces derniers sont calculés dans Embree, une bibliothèque de programmes qui contient des algorithmes de lancer de rayons optimisés pour les processeurs. Les irradiances en ondes courtes de la peau du modèle sont calculées en résolvant l'équation d'éclairements-radiosités (inversion directe ou méthode itérative).

Les conditions aux limites du rayonnement en ondes longues sont divisées en deux parties. La première concerne le rayonnement en ondes longues du ciel qui ne dépend pas des températures de l'environnement bâti et la deuxième tient compte des échanges en ondes longues entre les éléments de l'environnement bâti. La première est déterminée comme dans le rayonnement en ondes courtes du ciel (en dehors du solveur éléments finis) alors que la deuxième est calculée dans le solveur éléments finis à chaque pas de temps. Les données d'entrée du rayonnement en ondes longues du ciel sont la température de l'air, la pression de vapeur d'eau, l'humidité relative et la couverture nuageuse. La voûte céleste est discrétisée avec la même partition qu'en ondes courtes (Beckers) sur laquelle le modèle de Martin et Berdhal est appliqué pour déterminer les exitances de chaque carreau de ciel. Les irradiances en ondes longues de la peau du modèle urbain sont déterminées de la même manière qu'en ondes courtes (méthode de radiosité).

Le calcul thermique (résolution de l'équation aux dérivées partielles de la chaleur) est réalisé dans Cast3M à partir du maillage volumique et des conditions aux limites et initiales. Ces dernières sont résolues pour le premier pas de temps en régime permanent. Le modèle radiatif de Cast3M est modifié pour introduire sous forme de matrice creuse (*sparse*) les facteurs de vue étendus calculés en amont. Cela permet de dépasser les limitations du nombre de faces et de prendre en compte la réflexion spéculaire dans le spectre ondes longues.

Le résultat du calcul est la température de l'ensemble des nœuds du maillage. À partir de celle-ci, plusieurs représentations sont utilisées pour vérifier et interpréter les résultats :

thermographies simulées, températures dans les parois, bilan des flux nodaux. Ces représentations sont réalisées en dehors de Cast3M, dans Matlab.

Enfin, deux quantités d'intérêt sont utilisées pour apprécier le confort thermique du modèle urbain : la température de l'air à l'intérieur des bâtiments pour les habitants et la température moyenne radiante (méthode des images 4π) pour les piétons.

*

L'environnement proposé peut être utilisé à différentes échelles urbaines (appartements, bâtiments, rues, quartiers). L'accent porté sur les échanges radiatifs permet d'une part d'étendre les études de confort liées au rayonnement solaire (revêtements de façades, toiles d'ombrage) [Bugeat 2020] [García-Nevado 2021] et d'autre part d'établir des comparaisons entre des simulations et des campagnes de mesures urbaines [Acuña Paz y Miño 2021]. Ces dernières sont possibles grâce au fait que la méthode des éléments finis fonctionne directement sur la géométrie mais aussi grâce au post-traitement des résultats qui permet des comparaisons graphiques (thermographies simulées et mesurées).

À ce stade, l'environnement proposé possède quelques limitations et deux améliorations peuvent être envisagées :

- La réflexion des faces est limitée à de la réflexion soit parfaitement diffuse, soit parfaitement spéculaire. Le principe des facteurs de vue étendus donne la possibilité de prendre en compte différentes fonctions de distribution de la réflectivité bidirectionnelle.
- Pour dépasser la limitation de taille due à la mémoire de l'ordinateur, l'utilisation combinée de maillages fins et grossiers peut être envisagée. En ondes courtes, il est possible de suivre l'approche proposée par [Bugeat 2020] et, en ondes longues, le concept de super-éléments proposé par [Beckers 2013].

Chapitre 3

Études thermiques à l'échelle de la rue

3.1 Contexte

Dans ce chapitre, nous nous basons sur des travaux menés sur la rue des Tonneliers (Bayonne, France, 43.48° N) entre 2017 et 2020 par des membres du laboratoire. Une première campagne de mesures a été menée en avril 2017 [García-Nevado 2019a]. Cette campagne consistait en une séquence de photographies et de thermographies. Elle a été utilisée pour réaliser deux études thermiques : la première sur une géométrie simplifiée qui a donné de bonnes corrélations entre simulations et mesures [Aguerre 2019] ; la deuxième basée sur une géométrie plus détaillée s'est centrée sur le concept de rendu réaliste pour modifier les thermographies simulées afin qu'elles correspondent mieux aux thermographies mesurées [Aguerre 2020b].

Une seconde campagne de mesures a été menée dans la rue des Tonneliers le 20 février 2019 [Acuña Paz y Miño 2020a]. Cette campagne a été réalisée dans le but de comparer les résultats des mesures avec les simulations thermiques par éléments finis, qui font l'objet de cette thèse. Plusieurs moyens de mesure ont été utilisés : des thermomètres pour mesurer la température de l'air dans la rue et dans les appartements, des thermocouples pour mesurer la température des surfaces intérieures et extérieures ainsi qu'une caméra thermique pour analyser spatialement les températures de surface de la rue.

La thermographie urbaine en perspective introduit des biais dans l'interprétation des résultats qui sont principalement dus à l'angle d'observation des éléments [García-Nevado 2019b]. Une méthode permettant de corriger les températures de surface apparentes des

thermographies mesurées lors de la campagne de mesures de février 2019 a été développée [Acuña Paz y Miño 2020a]. Les corrections portent sur trois paramètres : l'émissivité des surfaces, le type de réflexion et l'influence de l'atmosphère. Par défaut, la caméra thermique considère une seule émissivité pour l'ensemble des surfaces de la scène. La première correction consiste à corriger les flux émis par les surfaces en utilisant des émissivités différentes pour les vitrages, les métaux et les matériaux urbains couramment utilisés. La deuxième correction porte sur la réflexion du rayonnement par les surfaces : parfaitement spéculaire plutôt que parfaitement diffuse. La troisième correction modifie l'influence de l'atmosphère située entre les surfaces et la caméra. Elle permet de supprimer le flux radiatif émis par l'atmosphère et ajoute l'énergie atténuée par ce dernier provenant des surfaces. La Figure 3.1 montre une thermographie non corrigée et une thermographie corrigée. Sur l'image non corrigée, les vitrages apparaissent plus froids car la caméra voit le ciel par réflexion spéculaire. On obtient une température des vitrages plus cohérente sur l'image corrigée. Globalement, les corrections homogénéisent les températures des surfaces de la scène.

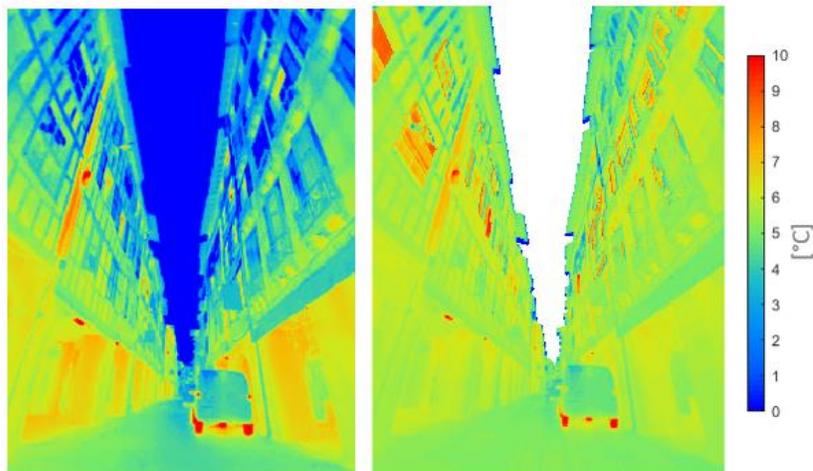


Figure 3.1 Thermographie (à gauche) et thermographie corrigée (à droite) à 8 h le 20 février [Acuña Paz y Miño 2020a].

*

Le chapitre comprend quatre parties. En premier lieu, une description détaillée des maillages d'un bâtiment et de la rue est présentée. Ensuite, les résultats de la seconde campagne de mesures du 20 février 2019 (thermographies corrigées et températures intérieures) sont comparés à ceux de notre simulation. Puis, une comparaison entre réflexion diffuse et réflexion spéculaire en fonction de la longueur d'onde est menée. Enfin, l'influence d'une isolation par l'extérieur sur le comportement thermique de la rue est étudiée.

3.2 Description du modèle géométrique de la rue

Les bâtiments de la rue datent principalement des XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècles. Ils comportent des murs à colombages. Ce système constructif multi-matériaux permet le chevauchement des planchers en encorbellement afin de laisser un passage suffisamment large sur la voie publique et ainsi agrandir les espaces des étages supérieurs. L'architecture de Bayonne est essentiellement caractérisée par l'étroitesse des rues (Largeur / Hauteur = 0.45). Les avant-toits et les fenêtres à meneaux sont également très courants.



Figure 3.2 Vue aérienne et vue en perspective de la rue des Tonneliers (Bayonne, France).

Le modèle géométrique de la rue suit la même philosophie que celle présentée dans le chapitre 2. Construit dans le logiciel ArchiCAD, il correspond à un maillage composé d'hexaèdres et de prismes [Acuña Paz y Miño 2018]. Le maillage est conforme, mais pas d'un seul tenant. Le maillage de chaque bâtiment composant la rue constitue un bloc conforme. Les différents blocs sont étudiés séparément et sont ensuite assemblés pour former le modèle de la rue (*collage de maillage*). À partir du format CAO, le modèle est analysé et transformé en jeu de données compatible avec un solveur éléments finis.

Une étude thermique menée sur une journée d'hiver a montré que le niveau de détail du modèle était satisfaisant pour appréhender les différentes aspérités des façades des bâtiments [Duport 2019]. Cette étude, limitée aux phénomènes conductifs et convectifs, a montré l'intérêt de réaliser une étude en période de chauffe pour visualiser les relations entre l'intérieur des appartements et l'intérieur de la rue.

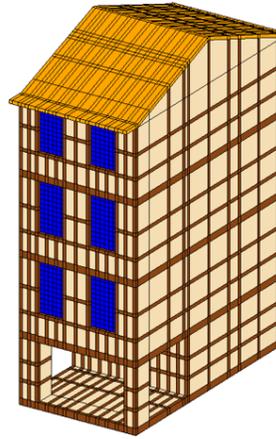
3.2.1 Maillage d'un bâtiment

La Figure 3.3 montre le maillage d'un bâtiment représentatif de la rue et sa description géométrique. Il est constitué de 4 597 éléments de volume et de 9 228 nœuds. Les matériaux sont identifiés grâce au code couleur provenant du modèle CAO : orange pour le toit, marron pour le bois, beige pour le torchis et bleu pour les fenêtres. Les éléments constituant le toit, les murs et les planchers ont tous une épaisseur de 30 cm. Les fenêtres sont des petits éléments de volume d'une épaisseur de 6 mm (simple vitrage).

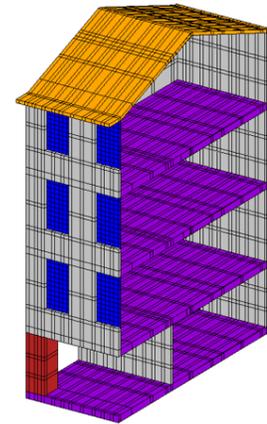
La peau du maillage volumique permet de modéliser les conditions aux limites convectives et radiatives. Les faces présentes deux fois dans le modèle sont des faces intérieures liant deux éléments. Les faces qui n'apparaissent qu'une seule fois constituent la peau du modèle. Cette peau est composée d'une peau intérieure et d'une extérieure. Pour les distinguer, il faut identifier les parties connectées du maillage. Une composante connexe regroupe l'ensemble des éléments joignables, c'est-à-dire entre lesquels il est possible de trouver une chaîne d'éléments partageant au moins un nœud. Les deux peaux sont montrées sur la Figure 3.4. Chaque cavité est discrétisée selon les surfaces verticales et horizontales (planchers, plafonds, murs). Pour les identifier, on utilise les vecteurs normaux des faces. Les arêtes vives jouent le rôle de séparateurs. Deux faces voisines appartiennent à la même surface si leurs vecteurs normaux forment un angle aigu.

Description géométrique			
Dimensions (m)	Volume boîte englobante (m³)	Nombre d'étages	Nombre de nœuds
8.24 x 12.30 x 15.6	1578	4	9228
Matériaux	VOLUME	Nombre	
	Toit	9.38	525
	Bois	47.59	2676
	Torchis	81.94	1000
	Fenêtre	0.014	396
	Total	138.92	4597
Type d'éléments	Hexaèdres	138.88	4593
	Pentaèdres	0.04	4
Éléments structuraux	Murs	59.75	1854
	Planchers	66.13	1742
	Piliers	3.65	80

A

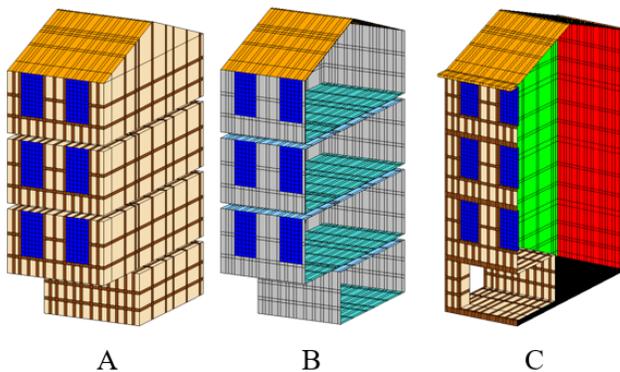


B



C

Figure 3.3 Maillage et description géométrique d'un bâtiment, A) Description géométrique B) Maillage C) Identification des éléments structuraux.



A

B

C

Description géométrique				
		Dimensions (m)	VOLUME cavité (m³)	Nombre
Peau intérieure	RdC	5.24 x 6.75 x 2.60	89.30	846
	1 ^{er}	5.24 x 10.51 x 3.2	172.52	1340
	2 nd	5.24 x 10.51 x 3.2	172.52	1340
	3 ^{ème}	5.24 x 10.51 x 4.95	217.71	1376
Peau extérieure	-	-	VOLUME (m³)	Nombre
	-	-	793.35	4108

D

Figure 3.4 A) et B) peau intérieure, C) peau extérieure et D) description géométrique des deux peaux.

*

Cas d'une isolation

Nous faisons l'hypothèse que seuls les murs de façade sont isolés. Pour créer une isolation par l'intérieur, un volume de 10 cm d'épaisseur est créé par translation à partir de la surface de la peau intérieure qui contient les fenêtres. La méthode du collage de maillage est utilisée pour connecter les maillages de l'isolant, à ceux du plafond et du plancher de la cavité. Pour créer une isolation thermique par l'extérieur, un volume de 10 cm est créé à partir de la façade des bâtiments (peau extérieure) par translation de la même manière que pour l'isolation intérieure. La Figure 3.5 montre le maillage des deux isolations.

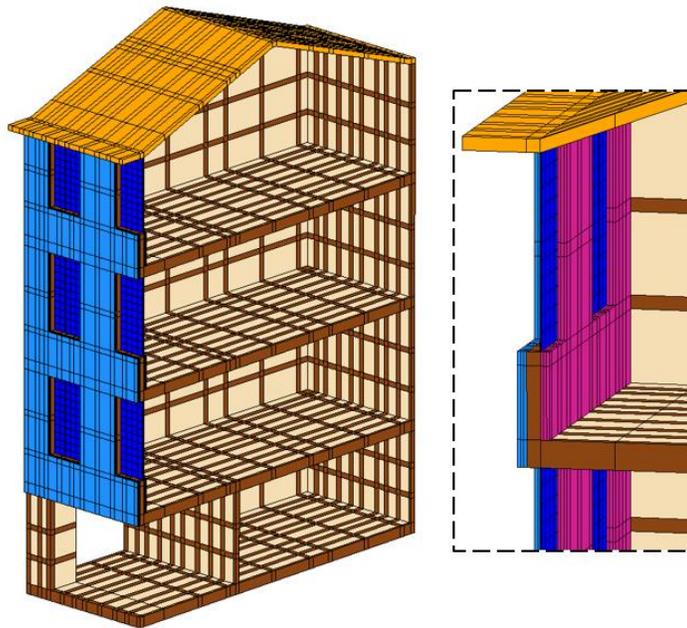


Figure 3.5 Maillages de l'isolation intérieure (rose) et extérieure (bleu).

3.2.2 Maillage de la rue

La rue des Tonneliers est orientée d'est en ouest. Treize bâtiments sont exposés au sud et onze au nord. Le maillage volumique de chaque bâtiment ainsi que les peaux intérieures et extérieures sont assemblés pour former le maillage de la rue (Figure 3.6). Le modèle contient 124 871 éléments de volume (44 % pour les bâtiments sud et 56 % pour les bâtiments nord) et 237 567 nœuds. Il mesure 97.80 m de long et 6.20 m de large selon l'axe est-ouest et 54.25 m de long et 11.35 m de large selon l'axe nord-sud. Les bâtiments sud ont une hauteur moyenne de 15.4 m et les bâtiments nord 16.2 m. Les vitrages des bâtiments proches des points de mesure sont maillés finement et le reste des vitrages est maillé plus grossièrement.

Description du maillage des bâtiments de la rue				
	Nombre de bâtiments	Nombre de volumes	Nombre de nœuds	Nombre de faces (peau)
Modèle	24	124 871	237 567	239 552
-	-	Nombre de volume	Pourcentage	-
Matériaux	Toit	13 799	11.1 %	-
	Bois	74 479	59.6 %	-
	Torchis	29 991	24 %	-
	Fenêtre	6 602	5.3 %	-
Type d'éléments	Hexaèdres	124 723	99.9%	-
	Pentaèdres	148	0.01%	-

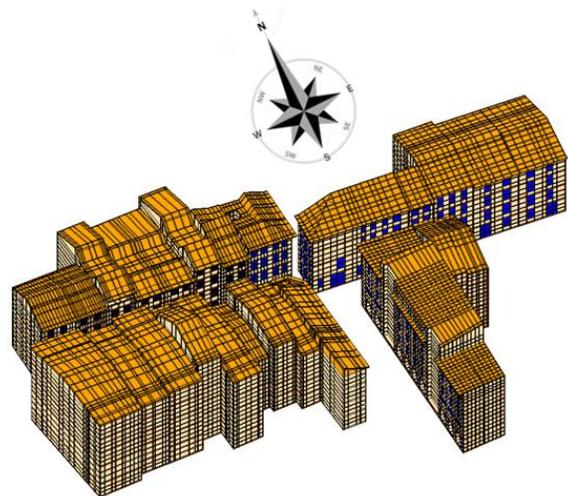


Figure 3.6 Maillage de la rue.

Le maillage du sol de la rue est construit à partir du contour des bâtiments (il est nécessaire de garder un maillage cohérent entre les bâtiments et la rue pour éviter des trous ou des superpositions d'éléments). Ce contour est irrégulier et de densité variable. Il entraîne un maillage surfacique du sol composé de quadrilatères et de triangles. Le maillage volumique du sol est obtenu par translation de ce maillage surfacique (Figure 3.7). Il est composé de 22 944

éléments de volume (88 % d'hexaèdres et 12 % de prismes) d'une épaisseur constante de 15 cm, comme les planchers du bas des bâtiments.

Le sous-sol de la rue est créé à partir du sol de la rue et des bâtiments par translation sur une profondeur de deux mètres (en bordeaux sur la Figure 3.7). Des éléments servant de masque sont créés pour représenter les bâtiments de la rue qui n'ont pas été construits dans le modèle original (en vert sur la Figure 3.7).

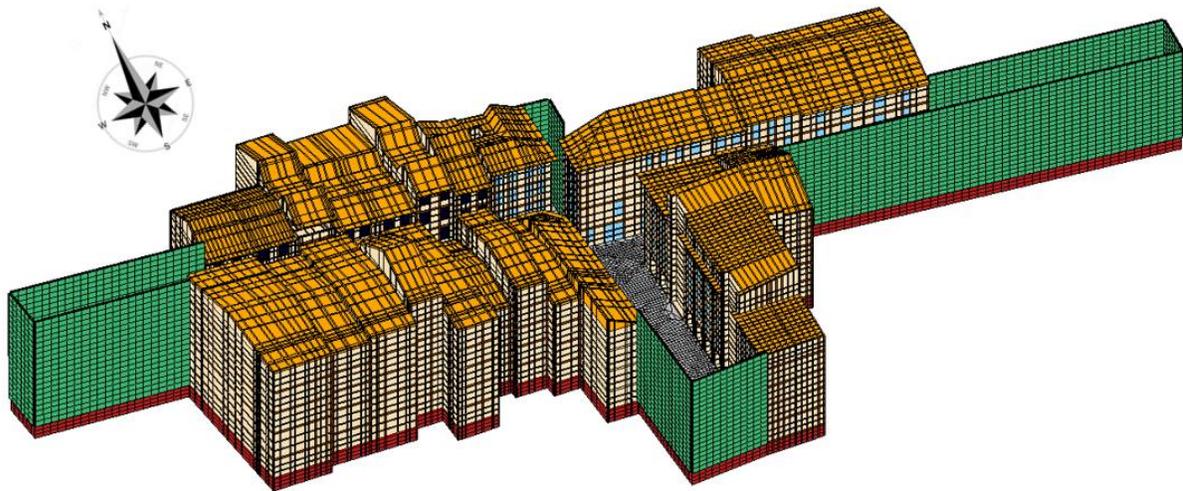


Figure 3.7 Maillage du modèle de la rue des Tonneliers.

Les peaux intérieures et extérieures de chaque bâtiment sont assemblées pour former la peau de la rue. L'assemblage des peaux extérieures entraîne une ambiguïté sur les surfaces se trouvant à la jonction entre deux ou plusieurs bâtiments (mitoyennes). Il faut dissocier les faces aveugles de celles qui échangent avec l'environnement extérieur (Figure 3.8). Les faces mitoyennes sont classées selon trois groupes : les faces aveugles, les faces extérieures (rose) et les faces des masques (bleu clair). Une face de la surface verte est considérée comme extérieure si son barycentre se situe en dehors du contour de la surface rouge et vice versa. Si une face de

la surface verte possède un nœud en dehors du contour de la surface rouge, mais que son barycentre est à l'intérieur, elle est considérée comme masque.

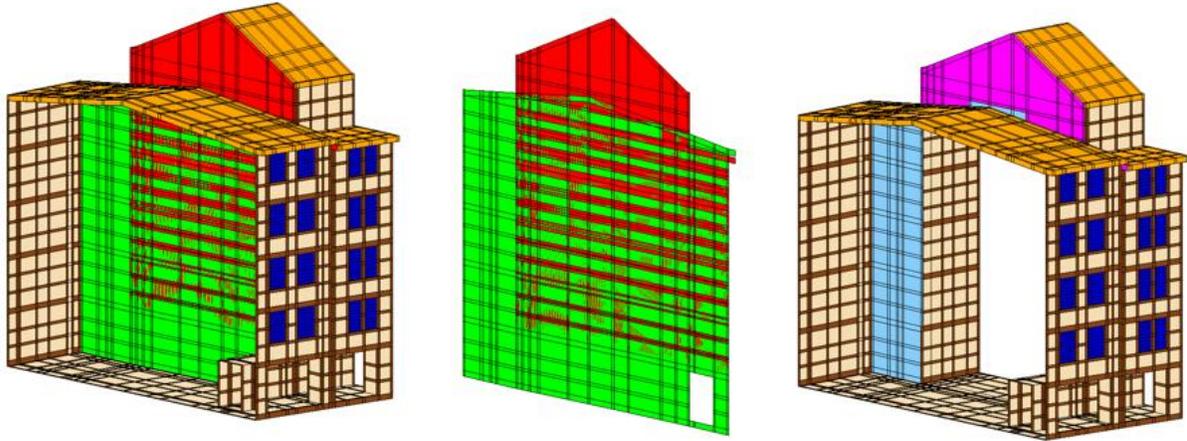
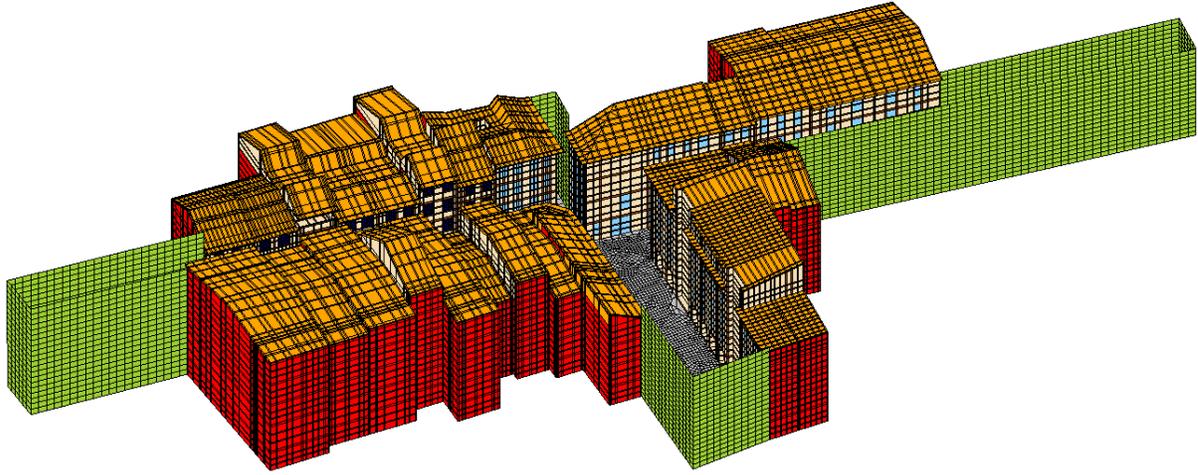


Figure 3.8 Identification des faces aveugles de la peau extérieure.

Les faces des masques, considérées comme adiabatiques, permettent d'éviter les trous dans le modèle et ne contribuent pas aux échanges d'énergie. Si une face de la surface verte possède tous ses nœuds à l'intérieur du contour rouge, elle est considérée comme aveugle et est supprimée de la peau extérieure de la rue. On obtient finalement la peau extérieure de la rue (Figure 3.9). Les faces aveugles (en rouge) sont considérées comme adiabatiques.



Description géométrique de la peau extérieure de la rue			
Faces	Surface (m ²)	Nombre	Densité moyenne (él.m ²)
Aveugles	4 184	18 523	4.42
Bâtiments	7 746	38 608	4.98
Rue	1 138	7 648	6.72
Masques	1 671	2 280	1.36
Vitrages	538	6 602	12.27

Figure 3.9 Peau extérieure du modèle de la rue (en haut) et sa description géométrique (en bas).

3.3 Comparaison entre simulations et mesures

3.3.1 Résultats de la campagne de mesures du 20 février 2019

La campagne de mesures a duré 24 h, de 22 h le 19 février à 22 h le 20 février 2019. La caméra thermique utilisée est une FLIR T460. Elle possède un objectif grand angle ($73^\circ \times 90^\circ$), une résolution de 240×320 pixels et une précision de ± 1 K. Elle possède un angle de vue plus grand et une meilleure résolution que celle utilisée pour la première campagne de mesures. Une photo a été prise toutes les trente minutes.

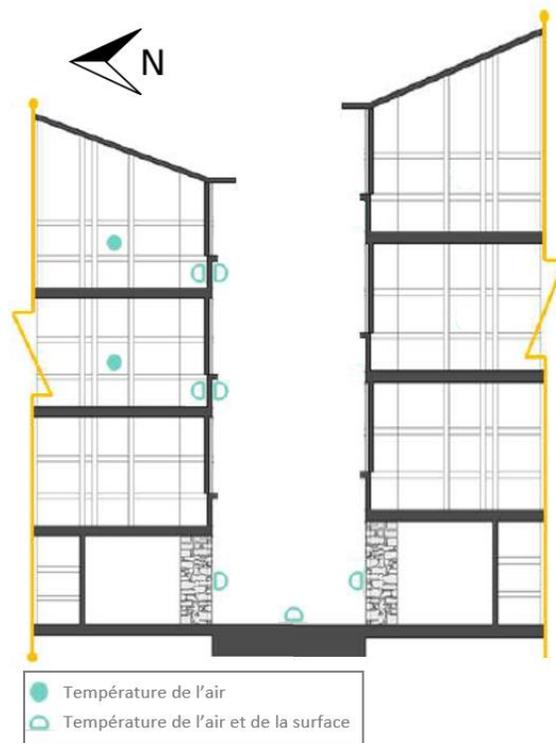


Figure 3.10 Emplacements des appareils de mesures dans la rue.

Les thermocouples sont des HOBO MX 2303. Ces derniers ont une précision de ± 0.25 °C. La Figure 3.10 montre l'emplacement des appareils dans la rue. Au total, il y a neuf points de mesure. Cinq d'entre eux permettent de mesurer les températures des surfaces extérieures

(façades et sol de la rue). Deux autres permettent de mesurer la température des surfaces intérieures de deux appartements. Les deux derniers permettent de mesurer la température de l'air à l'intérieur de ces deux appartements. Les données ont été enregistrées toutes les cinq minutes. Les points représentant ces appareils sont appelés points de comparaison dans la suite de ce chapitre.

Les températures de l'air à l'intérieur de la rue sont présentées sur la Figure 3.11. Elles ont été mesurées à trois hauteurs différentes. Il apparaît un gradient de température selon la hauteur de la rue.

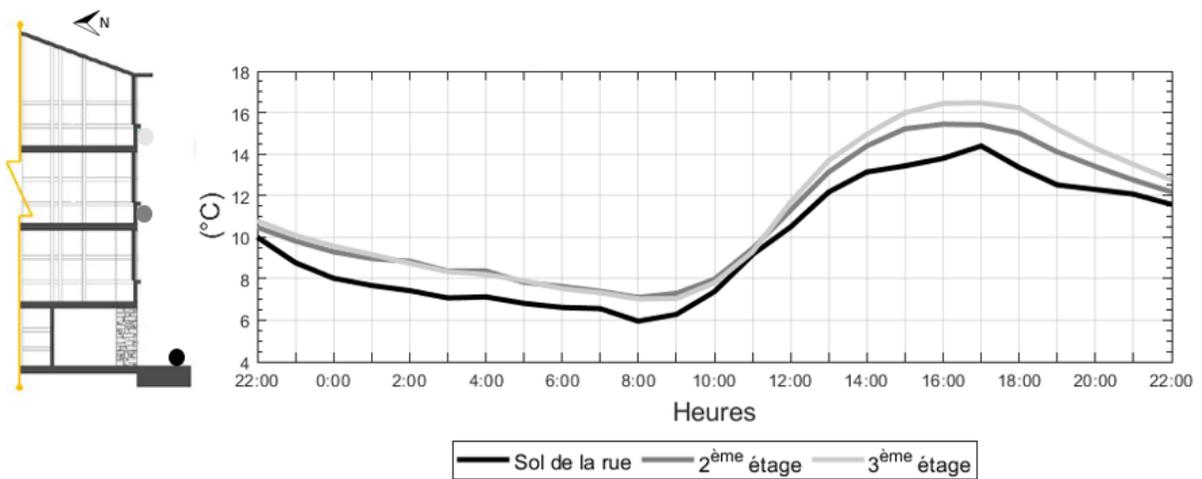


Figure 3.11 Température de l'air à l'intérieur de la rue à différentes hauteurs.

L'influence du vent sur les températures des surfaces est limitée avec des vitesses de vent moyennes de 0.5 ms^{-1} .

Des thermocouples ont mesuré la température de l'air ainsi que les températures de surface de deux appartements orientés face au sud (Figure 3.12). L'appartement du 3^{ème} étage était chauffé pendant toute la durée de la campagne de mesures, alors que celui du 2^{ème} étage ne l'était pas. La température de l'air du premier est constante pendant la nuit lorsque le

chauffage est allumé et chute de 1 K lorsqu'il s'éteint, à 9 h. La température de surface suit le même comportement tout en étant plus faible de 1 K.

Il est intéressant de noter que cette température reste constante pendant toute la journée grâce à l'isolation thermique du mur de façade. Pour le 2^{ème} étage, on voit clairement les effets des variations atmosphériques de l'extérieur. Les températures de l'air et des surfaces ont le même comportement avec une diminution pendant la nuit et une augmentation pendant la journée. Néanmoins, on peut noter que la température de surface fluctue davantage que la température de l'air. Ceci pourrait traduire une absence d'isolation.

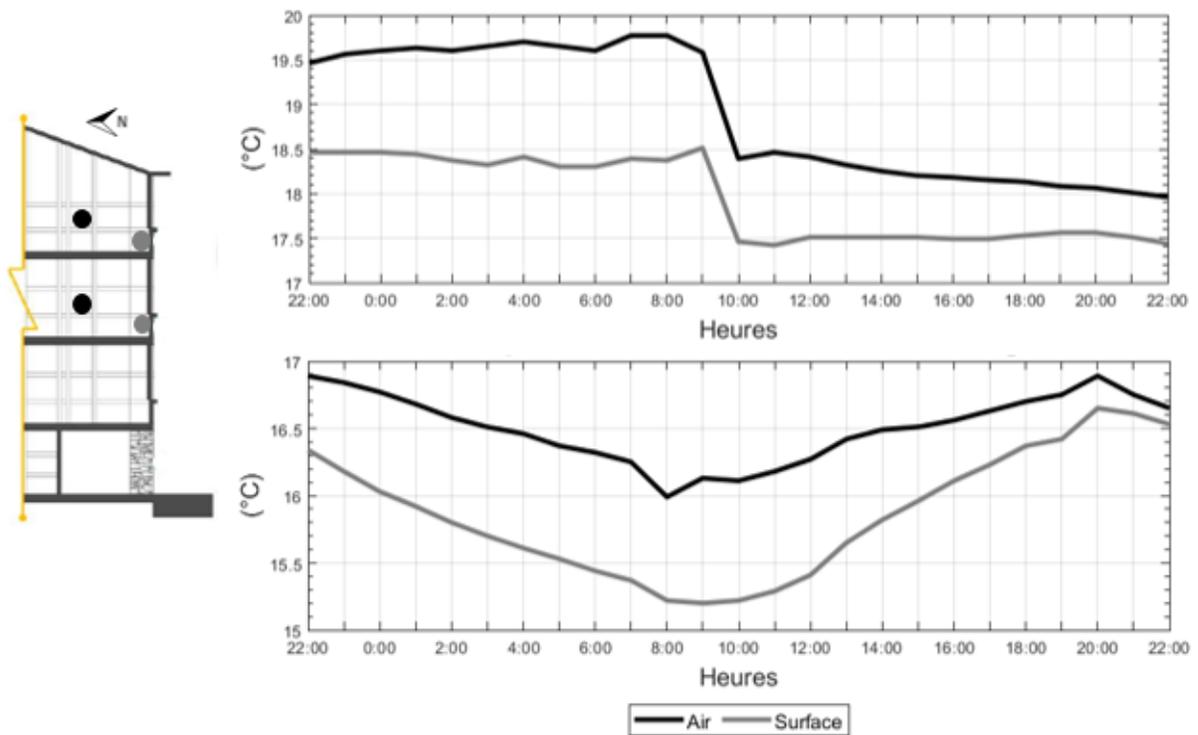


Figure 3.12 Température de l'air et des surfaces à l'intérieur d'un appartement au 2^{ème} étage en bas et au 3^{ème} étage en haut.

3.3.2 Modèle de simulation

Les données d'entrée de la simulation sont extraites de la campagne de mesures. Pour représenter la rue en perspective, une caméra virtuelle est placée dans le modèle et la position de cette caméra est appelée point d'observation.

*

Conduction

La rue des Tonneliers est composée d'une multitude de matériaux. Dans une rue aussi ancienne, il est difficile de connaître la composition réelle des éléments constructifs et leurs propriétés thermiques. Nous nous limitons ici à une analyse visuelle du type de matériaux dont les propriétés sont estimées à partir des bases de données de la réglementation. Nous prenons l'hypothèse que tous les bâtiments ont le même système constructif et que l'ensemble des appartements est isolé. La Figure 3.13 montre les valeurs de conductivité thermique, de capacité thermique massique et de masse volumique des matériaux utilisés.

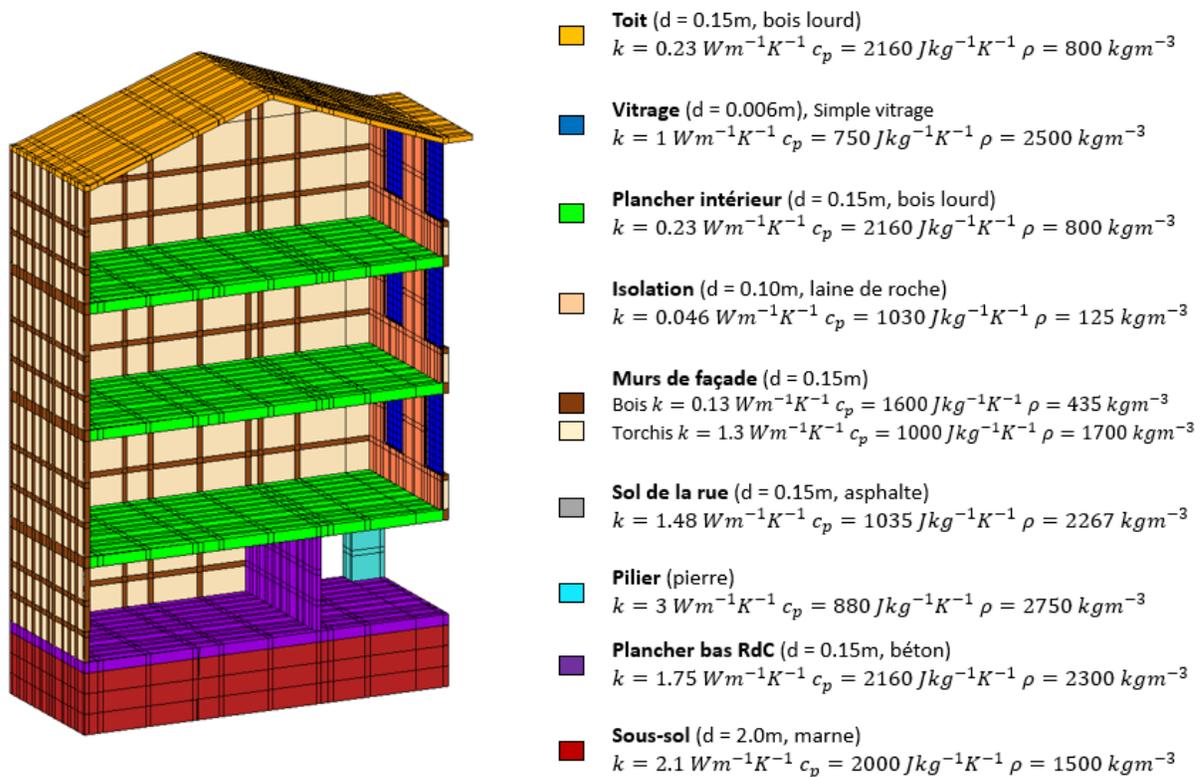


Figure 3.13 Propriétés des matériaux.

*

Convection

Intérieure

Les parois intérieures de chaque appartement échangent par convection avec l'air intérieur. Le volume intérieur est représenté par un nœud virtuel sur lequel l'inertie thermique est concentrée. La réglementation thermique différencie la valeur de ce coefficient en fonction du sens du flux de chaleur et de la paroi considérée. Dans notre cas, les études thermiques sont menées en hiver. On suppose donc que le sens du flux va toujours de l'intérieur vers l'extérieur des bâtiments. Ainsi, les coefficients d'échange sont les suivants :

- Pour les planchers : $h_{\text{int,plac}} = 0.7 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$
- Pour les murs : $h_{\text{int,mur}} = 2.5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$
- Pour les plafonds : $h_{\text{int,plaf}} = 5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$

Ces coefficients sont les mêmes pour tous les appartements et pour toute la durée de la simulation. À partir des thermographies mesurées, il est possible d'identifier les appartements chauffés. Pour ces derniers, la température de l'air est bloquée suivant les températures mesurées dans l'appartement de référence.

Un taux de renouvellement d'air constant de 0.25 vol.h^{-1} a été pris en compte pour tous les appartements.

Extérieure

Le coefficient de convection extérieur a été ajusté par comparaison avec les mesures à $20 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Cette valeur est du même ordre de grandeur que les valeurs utilisées dans les modèles de référence pour une journée sans vent.

La température de l'air a été mesurée à trois hauteurs différentes. Une combinaison linéaire entre le point de mesure le plus haut et le point le plus bas permet de calculer la

température de l'air correspondant à chaque élément de surface. En partant de la loi de Newton qui régit la condition limite convective, on a pour une face i :

$$\Phi_{conv,i} = h_{ext}(T_{surf,i} - T_{air\ ext}) \quad [W.m^{-2}]$$

Et :

$$h_{ext} * T_{air\ ext} = h_{ext} * \left(\frac{z_{max} - z_i}{z_{max} - z_0} * T_{inf} + \frac{z_i - z_0}{z_{max} - z_0} * T_{sup} \right) \quad [W.m^{-2}]$$

Avec T_{inf} la température de l'air au niveau inférieur z_0 , T_{sup} la température de l'air au niveau supérieur z_{max} , et z_i l'altitude de la face i . Lorsque z_i vaut z_{max} , la température de l'air à prendre en compte est bien T_{sup} et lorsque z_i vaut z_0 , la température de l'air à prendre en compte est bien T_{inf} .

*

Rayonnement

Ondes courtes

Le modèle de ciel par temps clair de Liu et Jordan (1960) est utilisé pour déterminer l'irradiance normale directe et l'irradiance horizontale diffuse avec une atténuation atmosphérique de 73 %. Ces irradiances sont comparées aux mesures d'irradiances globales obtenues par la station météo du campus de l'université d'Anglet (Figure 3.14). Les irradiances globales mesurées et simulées sont quasiment égales.

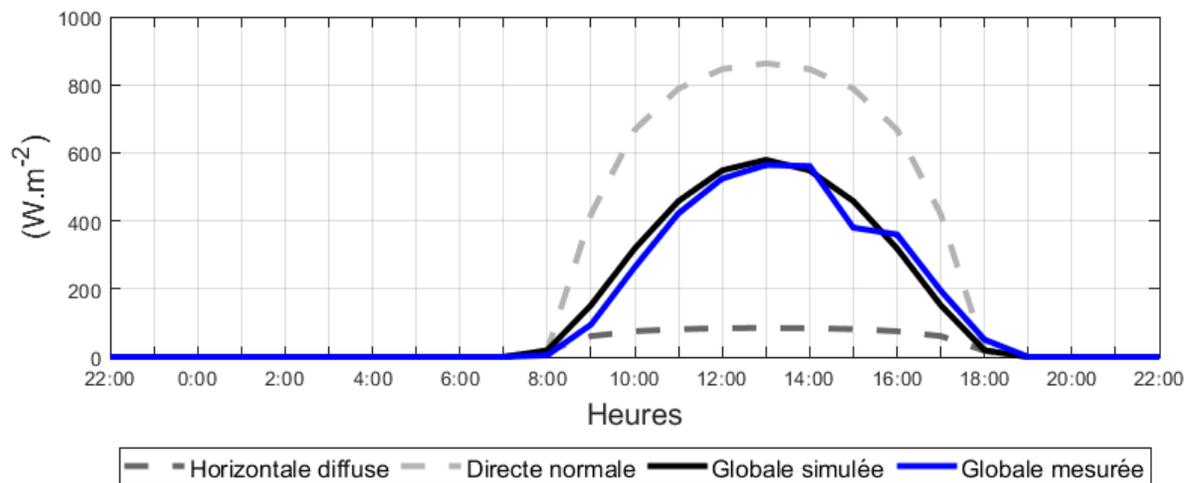


Figure 3.14 Irradiances en ondes courtes.

Le Tableau 3.1 montre les propriétés des surfaces dans le spectre ondes courtes. Pour les surfaces opaques, elles résultent de la moyenne des valeurs mesurées dans la rue.

<i>Bande spectrale</i>	<i>Surfaces</i>	ρ_r	ρ_d	τ_r	α
<i>Ondes courtes</i>	Opaques	0	0.5	0	0.5
	Vitrages	0.1	0	0.8	0.1

Tableau 3.1 Propriétés des surfaces en ondes courtes.

A partir des irradiances horizontales diffuses et directes normales, le modèle de Pérez est appliqué sur la partition de Beckers pour déterminer les exitances de chaque carreau de ciel (voir 2.6 *Rayonnement en ondes courtes : cavité 3D avec fenêtre*). La Figure 3.15 montre les irradiances absorbées en ondes courtes pour trois moments de la journée. Les apports solaires sur les façades sont limités. Les rayons du soleil n’atteignent jamais le second étage des bâtiments. Les surfaces proches du point d’observation reçoivent du soleil entre 10 h et 15 h. Les petites taches chaudes sur les façades nord à 13 h proviennent de la réflexion spéculaire des vitrages du dernier étage de la façade sud.

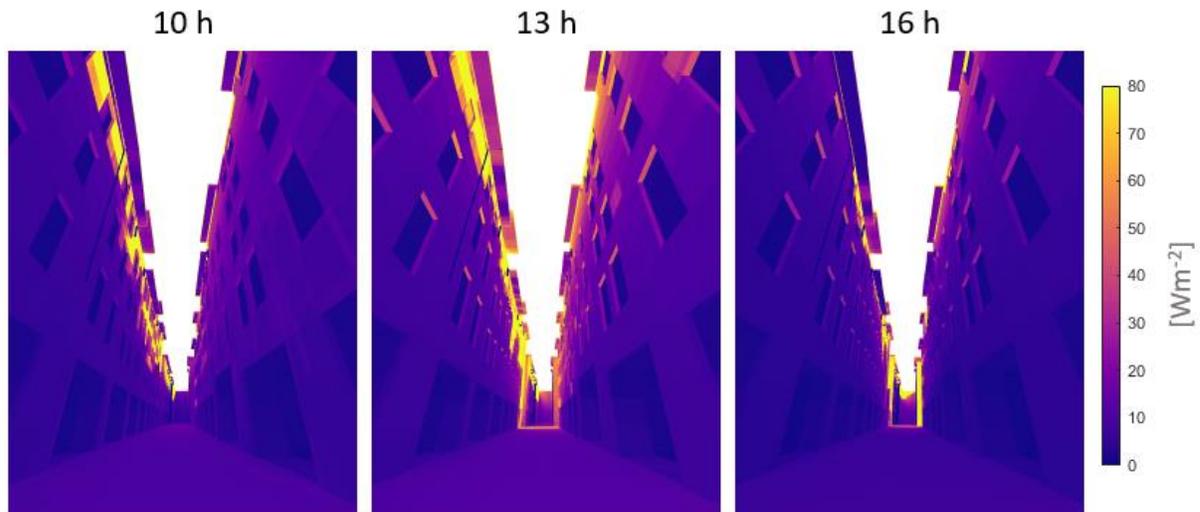


Figure 3.15 Irradiances absorbées le 20 février en ondes courtes.

Ondes longues

Les exitances du ciel en ondes longues sont déterminées à partir des données de la campagne de mesures. La température apparente du ciel mesurée par la caméra thermique est corrigée en fonction de l’angle zénithal et de l’émissivité directionnelle du ciel. Les exitances des carreaux de la partition du ciel sont calculées à partir de cette température. La Figure 3.16

montre la température au zénith et à l'horizon pendant toute la durée de l'étude. En moyenne, au zénith la température du ciel est de 263.09 K (-10.06 °C) alors qu'à l'horizon elle est de 282.13 K (8.98 °C). La température du zénith ne dépasse jamais les 268.15 K (-5 °C).

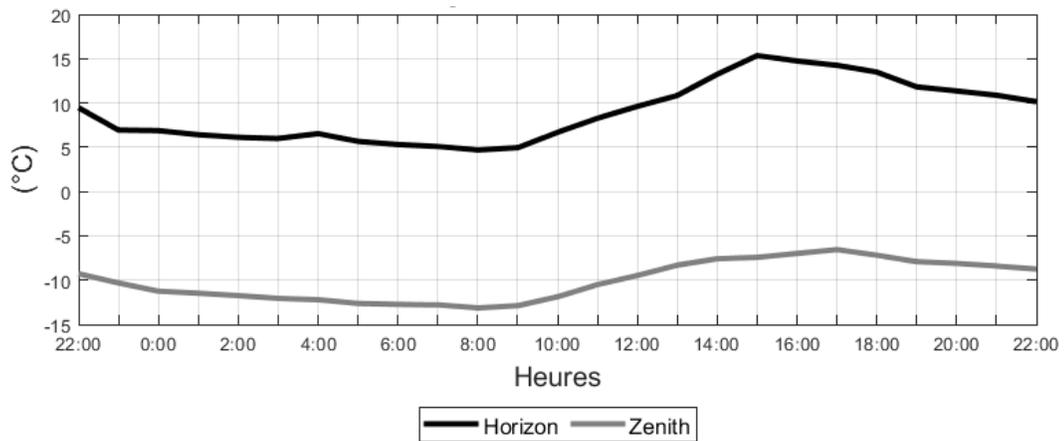


Figure 3.16 Température du ciel à l'horizon et au zénith pour toute la durée de l'étude.

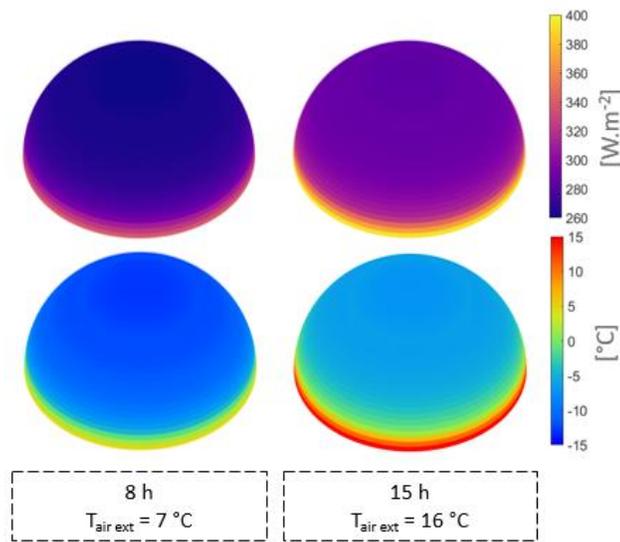


Figure 3.17 Exitances (en haut) et températures (en bas) du ciel.

La Figure 3.17 montre les exitances et la température du ciel pour le moment le plus froid (8 h) et le moment le plus chaud (15 h) de la période de simulation. Le ciel est à une température de 290.95 K (17.8 °C) à 8 h et de 295.95 K (22.8 °C) à 15 h.

En ondes longues, les surfaces sont considérées comme opaques, y compris les vitrages. Ces derniers réfléchissent de manière parfaitement spéculaire. Les valeurs d'émissivité sont extraites des bases de données. Le Tableau 3.2 montre les propriétés des surfaces en ondes longues.

<i>Bande spectrale</i>	<i>Surfaces</i>	ρ_r	ρ_d	τ_r	α	ε
<i>Ondes longues</i>	Bois peint		0.05	-	0.95	0.95
	Torchis		0.09	-	0.91	0.91
	Pierre		0.04	-	0.96	0.96
	Asphalte		0.08	-	0.92	0.92
	Toit (tuiles)		0.10	-	0.90	0.90
	Vitrages	0.18	0	0	0.82	0.82

Tableau 3.2 Propriétés des surfaces en ondes longues.

La Figure 3.18 montre les irradiances absorbées par la peau du modèle à 8 h et à 15 h. Elles varient selon la hauteur des bâtiments. Plus le facteur de vue du ciel augmente, plus les faces reçoivent de l'énergie. La façade exposée au nord reçoit plus d'énergie car elle est plus haute que la façade sud. De plus, la différence maximale d'irradiances entre le moment le plus chaud et le moment le plus froid est de 12 W.m⁻².

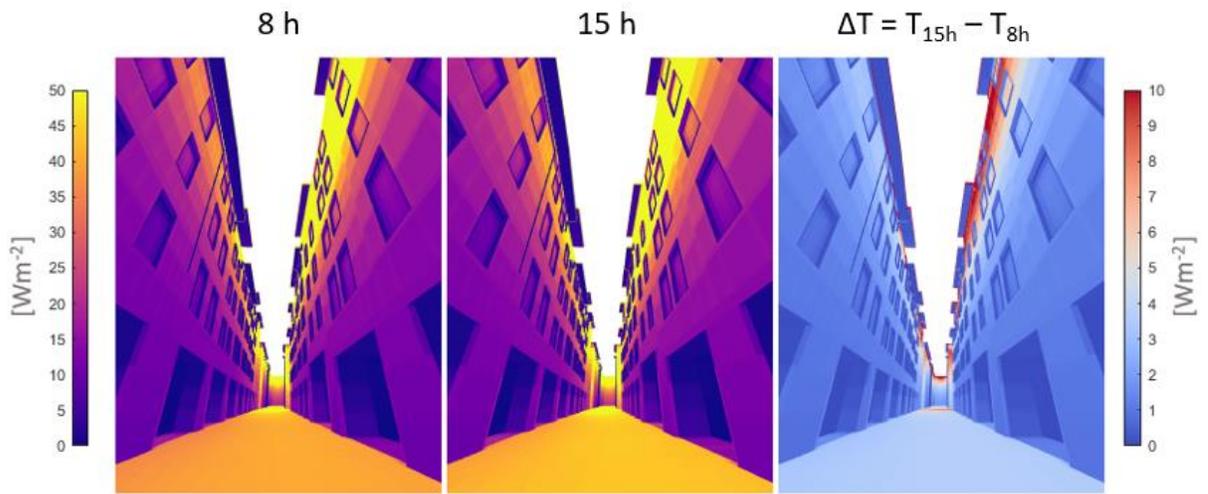


Figure 3.18 Irradiances absorbées en ondes longues.

*

Conditions initiales

Les températures de la condition initiale sont obtenues en résolvant le problème en régime permanent à 22 h le 19 février (première heure des mesures). Les températures de l'air des appartements sont bloquées en accord avec les mesures. La Figure 3.19 montre les températures mesurées et simulées des points de comparaison pour la condition initiale. L'écart de température maximal est de 0.54 K au niveau des piliers. Une étude de sensibilité est réalisée sur le pas de temps du calcul (1 h, 30 min et 10 min). Il en résulte qu'un pas de temps d'une heure est suffisant pour assurer la convergence des calculs. Pour les mêmes raisons, la séquence est répétée plusieurs fois (24 h, 48 h et 72 h) et une simulation de 24 h est suffisante (écart max de 0.1 K).

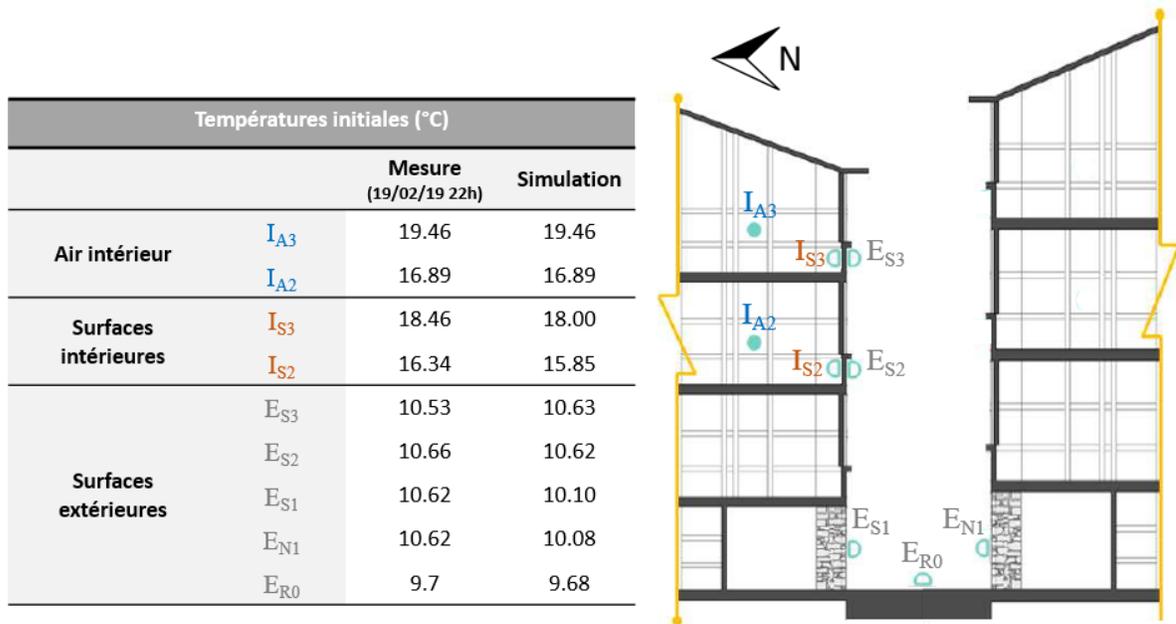


Figure 3.19 Températures initiales des points de comparaison.

*

Synthèse des paramètres de simulation

La Figure 3.20 récapitule les données d'entrée du problème.

Données d'entrée du problème				
Location	Bayonne, rue des Tonneliers (France)			
Jour	19 Février / 20 Février 2019			
Heures	22h à 22h			
Type d'éléments	Hexaèdres linéaires à 8 nœuds Prismes linéaires à 6 nœuds			
Taille du modèle	349 276 volumes 56 271 surfaces (rayonnement)			
Pas de temps	1h			
	Unité	Mesuré	Calculé	Estimé
Irradiance globale horizontale	W m ⁻²	x		
Irradiance directe normale	W m ⁻²		x	
Irradiance diffuse horizontale	W m ⁻²		x	
Irradiance infrarouge	W m ⁻²	x		
Température du ciel	°C		x	
Température de l'air extérieur	°C	x		
Température de l'air intérieur des appartements chauffés	°C	x		
Vitesse du vent	m s ⁻¹	x		
Coefficient de convection	W m ⁻² K ⁻¹			x
Température du sous sol	°C			x
Propriétés de surfaces (r, ε, τ)	-			x
Propriétés de volumes (λ, ρ, c_p)	-			x

Figure 3.20 Synthèse des données d'entrée de la simulation.

3.3.3 Résultats

Thermographies

La Figure 3.21 montre une séquence de thermographies mesurées et simulées à différentes heures de la période étudiée. La séquence commence à 22 h le 19 février 2019 et se termine à 22 h le 20 février 2019. La dernière image affiche des températures plus chaudes que la première (1.7 K en moyenne). Cela provient du fait que la journée du 20 février a été plus ensoleillée et plus chaude que la journée précédente. La température moyenne de l'air dans la rue est de 283.75 K (10.60 °C) contre 283.41 K (10.26 °C) pour les températures des surfaces simulées.

Les températures de la condition initiale correspondent bien aux températures mesurées. Pendant la nuit, les surfaces se rafraîchissent jusqu'au moment le plus froid de la séquence (7 h) avec des températures mesurées toujours plus faibles que les températures simulées (différences moyennes maximales de 2 K à 7 h). Ces différences proviennent des corrections apportées sur les thermographies mesurées, car, comme nous le verrons dans la section suivante, les températures simulées sont proches des températures mesurées par les thermocouples pendant la nuit.

Pendant la journée, l'accord entre les thermographies simulées et mesurées est très satisfaisant et les principales différences proviennent de la simplification du modèle géométrique (volets, avancées de toiture).

En fin de journée, les températures simulées sont plus élevées que les mesurées. Cet écart peut provenir soit d'une inertie thermique des matériaux simulée trop forte soit d'un coefficient de convection surestimé.

La séquence de thermographies donne de bons résultats avec de faibles différences entre la mesure et la simulation. Les hypothèses prises sur les actions des habitants avec la présence d'un chauffage dans certains appartements sont validées.

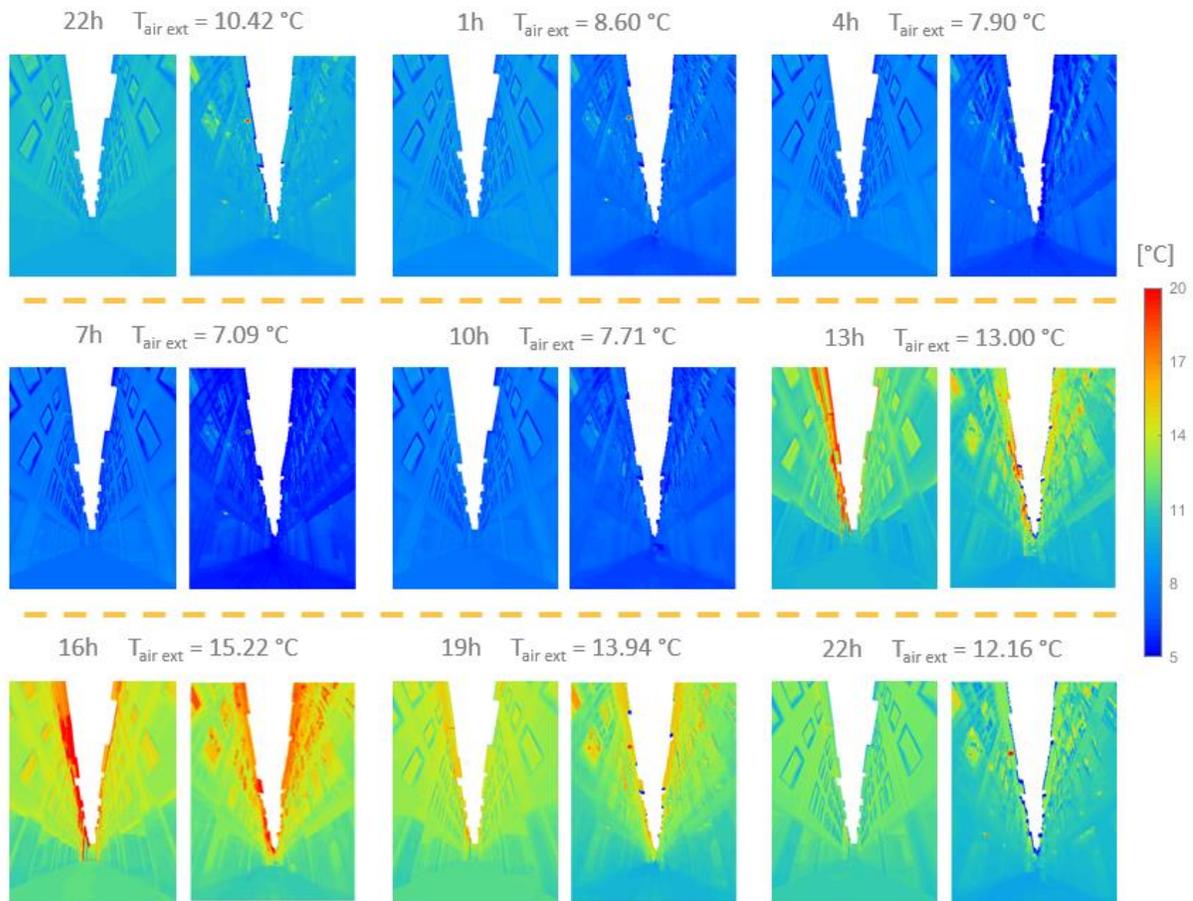


Figure 3.21 Séquence de thermographies simulées et mesurées.

*

Points de comparaison

La température des points de comparaison est analysée selon trois méthodes d'acquisition : la mesure par contact (thermocouple), la mesure sans contact (caméra thermique) et la simulation. La Figure 3.22 montre l'emplacement et la dénomination des points de comparaison. Cinq sont à l'extérieur des bâtiments et quatre sont à l'intérieur.

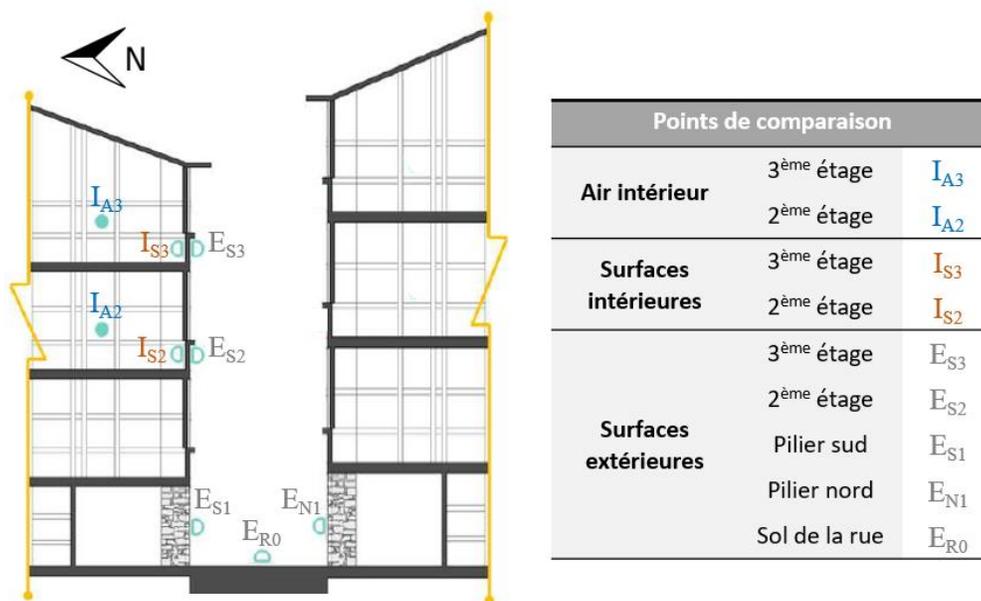


Figure 3.22 Emplacement et dénomination des points de comparaison.

Points de comparaison des façades et du sol de la rue

La Figure 3.23 montre les températures des points de comparaison placés sur les façades et sur le sol de la rue (E_{S3} , E_{S2} et E_{R0}). Les trois méthodes d'acquisition donnent des températures similaires. Les températures sont proches de la température de l'air sauf pour le sol de la rue. Pour ce dernier, la température de l'air a été mesurée à 1m50 du sol et non pas au niveau du sol.

Pendant la nuit, la simulation et le thermocouple donnent les mêmes températures pour les trois points de comparaison alors que la caméra thermique donne des températures plus faibles de 0.85 K en moyenne. On retrouve le même comportement que sur la séquence de thermographies.

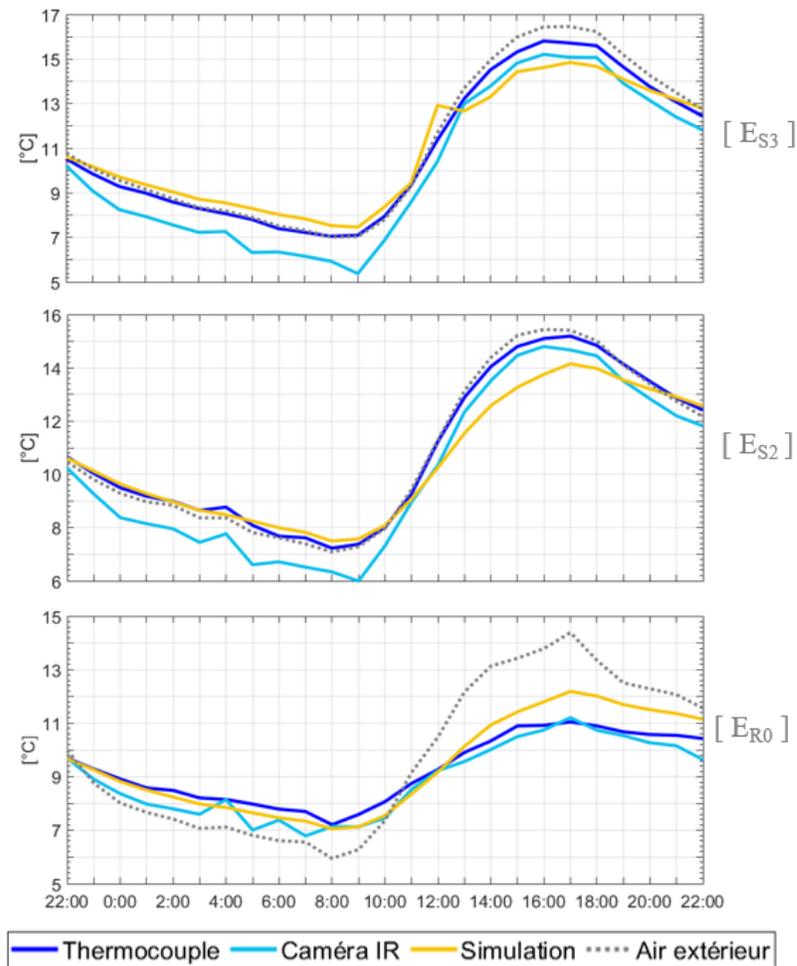


Figure 3.23 Températures des points de comparaison des façades et du sol de la rue.

Pendant la journée, les températures mesurées sont quasiment identiques alors que les températures simulées se différencient. Pour les points E_{S3} et E_{S2} , ces dernières sont plus faibles et diminuent moins vite en fin de journée. Cette différence peut être expliquée soit par le fait que le coefficient de convection est sous-estimé, soit par le fait que la conductivité thermique des matériaux est surestimée. La température simulée du point E_{R0} est plus élevée que celles mesurées pendant toute l'après-midi. Elle suit davantage le comportement de la température de l'air. Le coefficient de convection est peut-être surestimé pour ce point.

Le Tableau 3.3 donne les valeurs moyennes des trois points de comparaison selon les trois méthodes d'acquisition. Le thermocouple et la simulation donnent des valeurs moyennes relativement proches alors que la caméra thermique donne des valeurs moyennes un peu plus faibles. Cette différence provient des températures plus basses mesurées pendant la nuit.

Température moyenne (°C)			
	E_{S3}	E_{S2}	E_{R0}
Thermocouple	10.92	10.88	9.28
Caméra thermique	10.08	10.11	8.90
Simulation	10.98	10.55	9.45

Tableau 3.3 Température moyenne des points de comparaison selon la méthode d'acquisition.

Points de comparaison au niveau des piliers

La Figure 3.24 montre les températures mesurées par les thermocouples et simulées sur deux piliers (E_{S1} et E_{N1}). La comparaison avec des températures données par la caméra n'est pas possible car les piliers sont en dehors du champ de vision de la caméra. Les températures mesurées et simulées ont le même aspect. L'écart moyen de température est de 0.27 K pour E_{S1} et de 0.44 K pour E_{N1} .

Les piliers nord et sud sont à la même température jusqu'à 13 h. En fin de journée, le pilier nord est plus chaud de 0.6 K. Il reçoit de l'énergie par réflexion en ondes courtes et par émission en ondes longues des derniers étages des bâtiments d'en face qui reçoivent du rayonnement solaire toute l'après-midi.

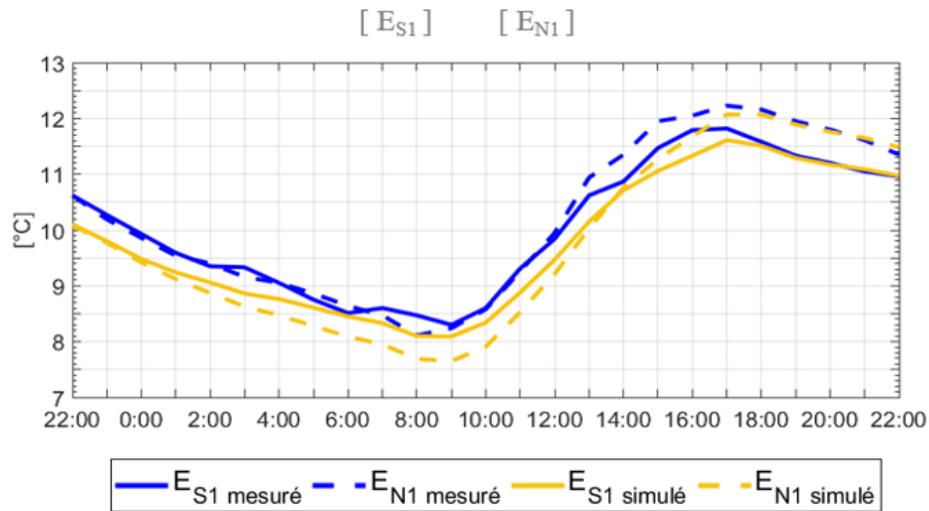


Figure 3.24 Températures des piliers.

Points de comparaison à l'intérieur des appartements

La Figure 3.25 montre les températures de l'air et des surfaces des points de comparaison situés à l'intérieur des bâtiments obtenues par simulation et par thermocouple (I_{S3} , I_{S2} , I_{A3} et I_{A2}).

Les températures des surfaces du deuxième étage sont similaires (I_{S2}). Les températures simulées sont plus faibles que celles mesurées tout au long de la journée de 0.30 K en moyenne. Les températures de l'air sont très proches avec une différence de 0.14 K en moyenne (I_{A2}). Les courbes de température sont légèrement décalées dans le temps. L'inertie thermique simulée de l'air intérieur semble légèrement surestimée.

Au troisième étage, les températures des surfaces ont un comportement similaire avec une différence moyenne de 0.42 K (I_{S3}). La température simulée diminue légèrement pendant la nuit contrairement à la température mesurée qui reste stable. Les deux températures chutent brusquement d'environ 1 K lorsque le chauffage s'éteint à 9 h. Pendant l'après-midi, la température simulée augmente progressivement alors que la température mesurée reste stable. Cette différence provient du fait que cet appartement possède une isolation plus forte que dans la simulation. La température de l'air n'est montrée qu'une seule fois. La température de l'air mesurée a été imposée dans la simulation pour modéliser le chauffage (I_{A3}).

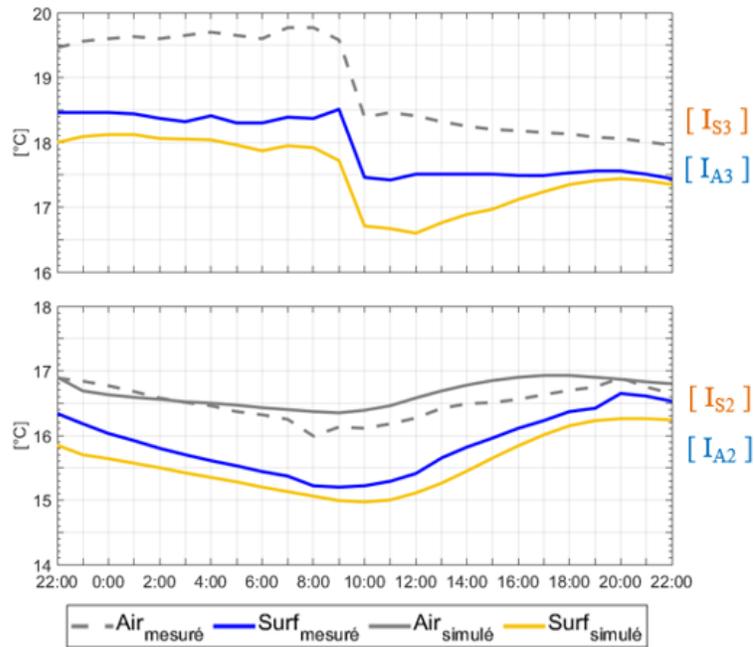


Figure 3.25 Températures de l'environnement intérieur des deux appartements.

*

Discussion

Une étude comparative des températures mesurées et simulées des bâtiments de la rue des Tonneliers a été réalisée. Les résultats de trois méthodes d'acquisition ont été comparés (thermocouple, caméra thermique et simulation). Ces trois méthodes ont donné des résultats cohérents avec des différences minimales. La caméra thermique (pendant la nuit) et la simulation (pendant la journée) sous-estiment les températures de surface. Ces différences peuvent être expliquées par les corrections apportées aux thermographies mesurées et par les paramètres estimés (coefficient de convection, propriétés thermiques des matériaux).

Le cadre de simulation développé dans cette thèse (traitement de la géométrie, définition des conditions aux limites, représentation graphique des résultats) a permis de réaliser une comparaison fine avec les mesures. En un seul calcul, il est possible de comparer des thermographies de la rue ainsi que l'ambiance thermique intérieure des appartements.

3.4 Influence du type de réflexion des modèles radiatifs

3.4.1 Contexte

La campagne de mesures de février 2019 menée dans la rue des Tonneliers a soulevé des questionnements sur la manière dont les surfaces urbaines réfléchissent le rayonnement. La Figure 3.26 montre les températures de surface mesurées relativement à la température de l'air à 17h30. La partie chaude en haut à gauche est provoquée par du rayonnement solaire direct. La partie basse de la façade de droite est plus chaude que le reste de la façade en raison du rayonnement reçu par réflexion de la partie haute de la façade de gauche. Pour que cela soit possible, il faut qu'une partie de l'énergie solaire reçue se réfléchisse spéculairement. L'hypothèse selon laquelle la réflexion du rayonnement solaire est diffuse dans le spectre visible et spéculaire dans l'infrarouge proche est formulée.

Si la réflexion est spéculaire dans l'infrarouge proche des ondes courtes, elle doit l'être également dans les ondes longues. Plus la longueur d'ondes augmente, plus elle devient grande par rapport à la rugosité des surfaces.

L'objectif de cette section est double : vérifier l'hypothèse de la réflexion spéculaire dans l'infrarouge proche d'une part et analyser l'influence de la réflexion spéculaire en ondes longues d'autre part.

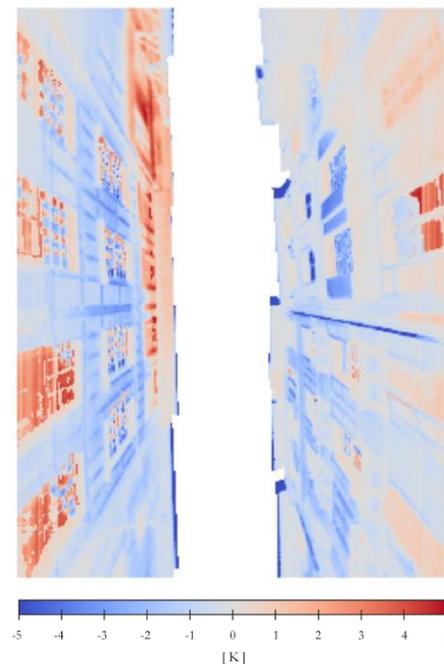


Figure 3.26 Température de surfaces de la rue des Tonneliers, relativement à la température de l'air.

3.4.2 Modèle de simulation

Un nouveau modèle de simulation est défini de manière à considérer la réflexion spéculaire dans l'infrarouge proche et les ondes longues. Il est appelé modèle spéculaire dans la suite de cette section par opposition au modèle diffus des sections précédentes.

<u>Modèle diffus</u>			<u>Modèle spéculaire</u>		
	Faces opaques	Vitrages		Faces opaques	Vitrages
Visible	diffuse	spéculaire	Visible	diffuse	spéculaire
Infrarouge proche	diffuse	spéculaire	Infrarouge proche	spéculaire	spéculaire
Ondes longues	diffuse	spéculaire	Ondes longues	spéculaire	spéculaire

Figure 3.27 Réflexion des surfaces en fonction de la bande spectrale pour les deux modèles de simulation.

Ondes longues

Dans les ondes longues, la réflexion diffuse des faces opaques devient parfaitement spéculaire. Pour des raisons de taille de la matrice des facteurs de vue étendus, seules les façades des cinq premiers rangs de bâtiments à partir du point d'observation sont modélisées avec une réflexion spéculaire (Opaques ⁽¹⁾, en gris clair sur la Figure 3.28). Les autres surfaces du modèle (Opaques ⁽²⁾) ne sont pas modifiées (réflexion diffuse). La réflexion spéculaire augmente la densité de la partie étendue de la matrice des facteurs de vue. Cela provient du fait qu'il y a plus de carreaux qui se voient les uns les autres. La Figure 3.29 montre les facteurs de vue (FV) et les facteurs de vue étendus (FVE) pour une face en fonction du type de réflexion. Quand la réflexion est diffuse, FV montre les faces qu'elle voit directement et FVE les faces qu'elle voit par réflexion spéculaire sur les vitrages. Quand la réflexion est spéculaire, le nombre de faces vues par réflexion spéculaire est largement augmenté. Entre le modèle diffus

et le modèle spéculaire, la densité de la matrice passe de 4.7 % à 6.5 % et sa taille de 4.8 Go à 7.2 Go.

<i>Surfaces</i>	<i>Matériaux</i>	ρ_r	ρ_d	α	ε
<i>Opaques⁽¹⁾</i>	Bois peint	0.05	-	0.95	0.95
	Torchis	0.09	-	0.91	0.91
	Pierre	0.04	-	0.96	0.96
	Asphalte	0.08	-	0.92	0.92
	Toit (tuiles)	0.10	-	0.90	0.90
<i>Vitrages</i>	-	0.18	0	0.82	0.82
<i>Opaques⁽²⁾</i>	Bois peint	-	0.05	0.95	0.95
	Torchis	-	0.09	0.91	0.91
	Pierre	-	0.04	0.96	0.96
	Asphalte	-	0.08	0.92	0.92

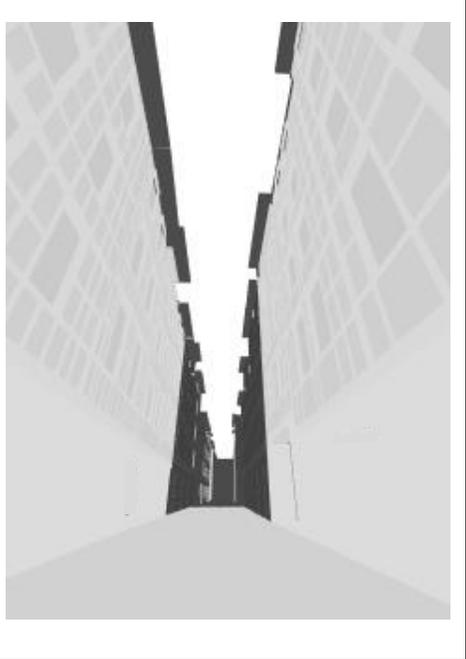


Figure 3.28 Propriétés des surfaces en ondes longues : faces spéculaires en gris clair et faces diffuses en gris foncé.

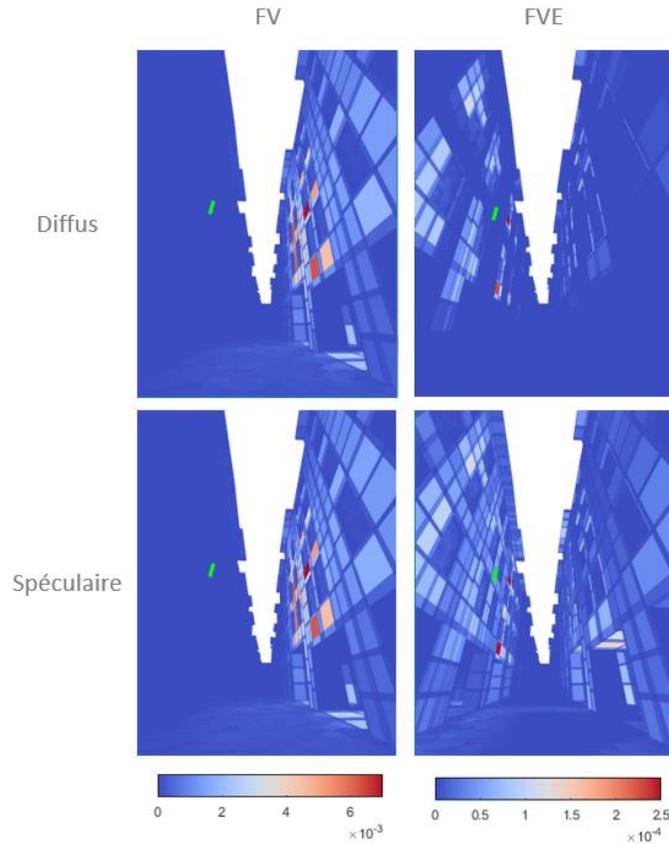


Figure 3.29 Facteur de vue (FV) et facteur de vue étendu (FVE) d'une face (en vert) en fonction du type de réflexion.

Ondes courtes

Dans le modèle diffus, la réflexion en ondes courtes était diffuse pour les faces opaques et spéculaire pour les vitrages. Dans le modèle spéculaire, la réflexion des faces opaques dépend de la bande spectrale. Elle reste diffuse dans le visible mais devient spéculaire dans l'infrarouge proche. Ces deux bandes comprennent respectivement 45 % et 55 % des ondes courtes.

Les irradiances absorbées en ondes courtes sont calculées par combinaison linéaire des irradiances selon deux situations, l'une où les faces opaques sont diffuses (E_{diffus}), et l'autre où elles sont spéculaires ($E_{spéculaire}$) :

$$E_{OC} = 0.45 * E_{diffus} + 0.55 * E_{spéculaire} \quad [W.m^{-2}]$$

Avec E_{OC} les irradiances absorbées en ondes courtes.

Le Tableau 3-4 montre les propriétés des surfaces pour les deux situations. La réflectivité est supposée constante. Pour les mêmes raisons qu'en ondes longues, seules les faces les plus proches du point d'observation (Opaques⁽¹⁾) sont modélisées avec une réflexion spéculaire.

<i>Cas</i>	<i>Surfaces</i>	ρ_s	ρ_d	τ_D	α
<i>Diffus</i>	Opaques	0	0.5	0	0.5
	Vitrages	0.1	0	0.8	0.1
<i>Spéculaire</i>	Opaques ⁽¹⁾	0	0.5	0	0.5
	Opaques ⁽²⁾	0.5	0	0	0.5
	Vitrages	0.1	0	0.8	0.1

Tableau 3-4 Propriétés des surfaces pour chaque modèle.

La Figure 3.30 montre les irradiances absorbées à 13 h pour le cas diffus (image de gauche), le cas spéculaire (image du milieu) et la combinaison des deux (image de droite). Quand la réflexion est diffuse, les interactions entre les façades sont limitées. Les petites taches sur la façade de droite correspondent à la réflexion spéculaire des fenêtres du dernier étage de la façade de gauche. Quand la réflexion est spéculaire, les interactions entre les façades sont multiples et l'énergie solaire parvient jusqu'au sol de la rue.

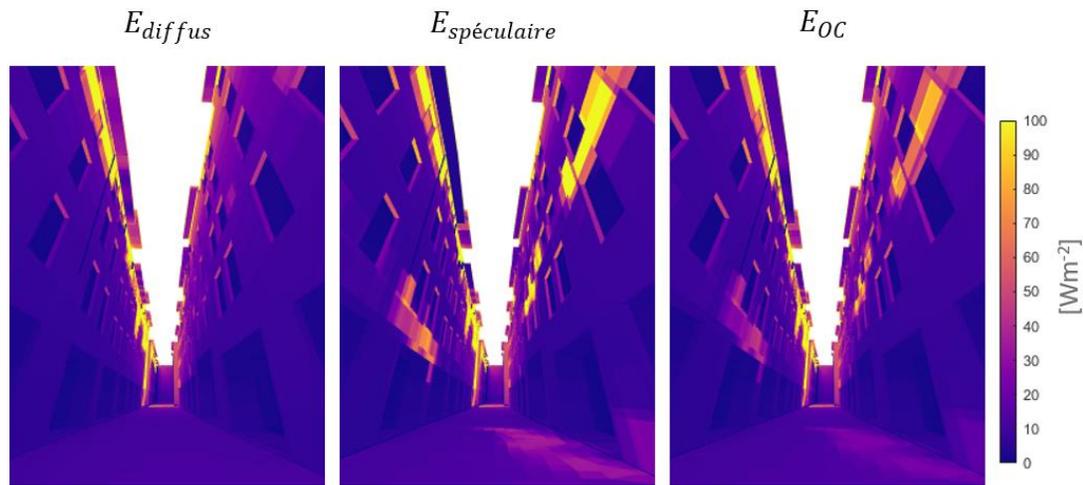


Figure 3.30 Irradiances absorbées en fonction du type de réflexion à 13 h.

3.4.3 Résultats

La Figure 3.31 montre les températures de surface à 18 h pour les modèles diffus et spéculaire et la différence entre les deux. Géométriquement, la tache plus chaude se situe au même endroit que sur la Figure 3.26. De plus, l'augmentation de température de cette tache est du même ordre de grandeur. Cette comparaison valide l'interprétation de la mesure.

La Figure 3.32 montre les différences des températures de surface entre les modèles diffus et spéculaires pour trois heures de la journée. Pendant la nuit, l'influence de la réflexion spéculaire en ondes longues est limitée. Les encadrements des fenêtres et le sol de la rue sont impactés avec une différence de -0.1 K pour ce dernier. Pendant l'après midi, les taches chaudes proviennent de la distribution du rayonnement solaire provoquée par la réflexion spéculaire dans l'infrarouge proche. À 13 h, le haut de la façade nord est plus froid de -0.2 K. Cela provient du fait que les faces redirigent l'énergie solaire vers l'intérieur de la rue et non plus dans toutes les directions. Les températures de l'air intérieur d'un appartement non chauffé sont également montrées. Elles ne sont indiquées qu'une seule fois car les modifications du type de réflexion des surfaces n'ont pas d'effets sur l'intérieur des bâtiments.

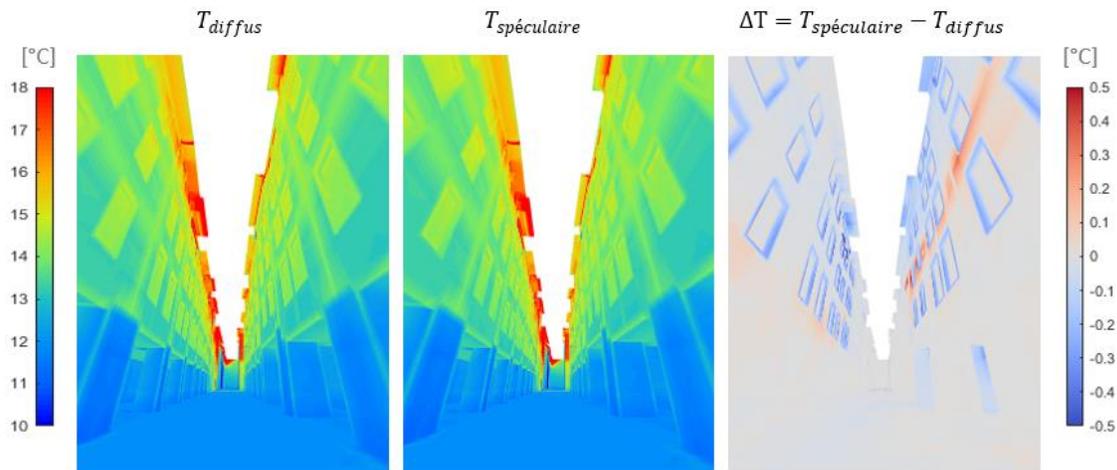


Figure 3.31 Températures de surface avec réflexions diffuses (à gauche), spéculaires (au milieu) et différences des deux (à droite).

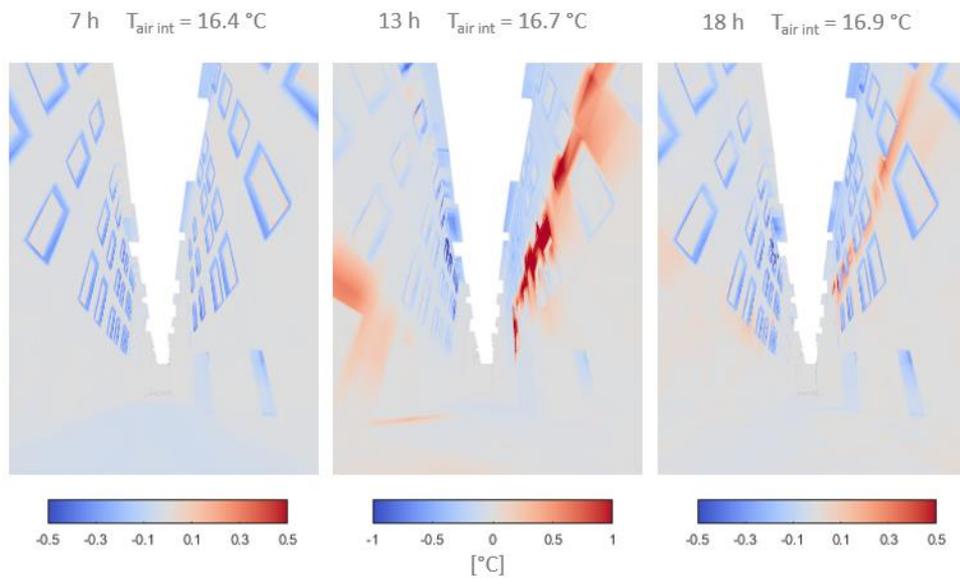


Figure 3.32 Différences des températures de surface entre les modèles spéculaires et diffus.

*

Discussion

L'influence de la réflexion spéculaire dans différentes bandes spectrales a été étudiée. Suite aux mesures, l'hypothèse selon laquelle elle devient spéculaire dans l'infrarouge proche des ondes courtes a été émise. Il en va de même pour la réflexion en ondes longues. Les résultats ont montré une bonne corrélation entre les mesures et les simulations pour l'infrarouge proche. En revanche, le caractère spéculaire de la réflexion joue un rôle beaucoup moins marqué dans les ondes longues dans le cas de la rue des Tonneliers. Les matériaux de la rue se comportant pratiquement comme des corps noirs en ondes longues, ils ne réfléchissent que très peu l'énergie reçue. De plus, la rue étant très étroite, l'énergie échangée entre les surfaces reste à l'intérieur de la rue et elle finit par être absorbée par les bâtiments. Dans d'autres types de configurations, plus ouvertes sur le ciel, la réflexion spéculaire en ondes longues peut avoir une plus grande influence.

3.5 Influence d'une isolation thermique par l'extérieur

3.5.1 Contexte

Dans les pays du nord, les réglementations thermiques ont encouragé les praticiens de l'architecture à limiter les consommations énergétiques des bâtiments. Les pertes de chaleur par l'enveloppe des bâtiments ont été réduites grâce à l'utilisation de matériaux isolants. Pour des raisons pratiques de mise en œuvre, ces matériaux ont été traditionnellement placés à l'intérieur des bâtiments. Ces dernières années, des systèmes d'isolation par l'extérieur ont été mis au point dans le but d'éliminer les ponts thermiques. Dans cette configuration, les bâtiments sont devenus plus performants du point de vue des consommations, mais des questions se sont alors posées quant à leur efficacité sur le confort thermique. L'influence de telles dispositions à l'échelle urbaine a été discutée par les concepteurs, sans pour autant réussir à la quantifier.

3.5.2 Modèle de simulation

Le modèle de la rue des Tonnelliers des sections précédentes est comparé avec un nouveau modèle dans lequel l'isolation thermique est placée à l'extérieur des bâtiments.

Pour modéliser cette isolation, un volume est créé à partir de la façade des bâtiments (peau extérieure) par translation. Le maillage des deux isolants est montré sur la Figure 3.33. Ces derniers ont les mêmes propriétés thermiques (laine de roche de 10 cm, $k = 0.046 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $c_p = 1030 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\rho = 125 \text{ kgm}^{-3}$).

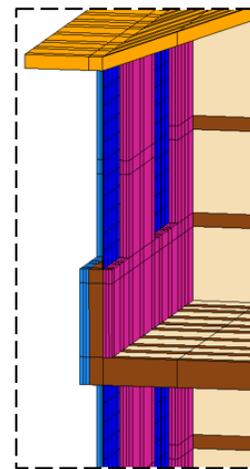


Figure 3.33 Isolation intérieure en rouge et extérieure en bleu.

3.5.3 Résultats

La Figure 3.34 montre les thermographies simulées des deux modèles pour différentes heures de la journée d'étude. Ces derniers donnent des températures similaires pour la première et la dernière heure de l'étude. En revanche, des différences notables apparaissent à 4 h et 7 h (-0.8 K) ainsi qu'à 13 h (+1.7 K) et 16 h (+1.3 K). La température de surface de l'isolant extérieur est plus basse pendant la nuit et plus haute pendant la journée que celle des murs de façade.

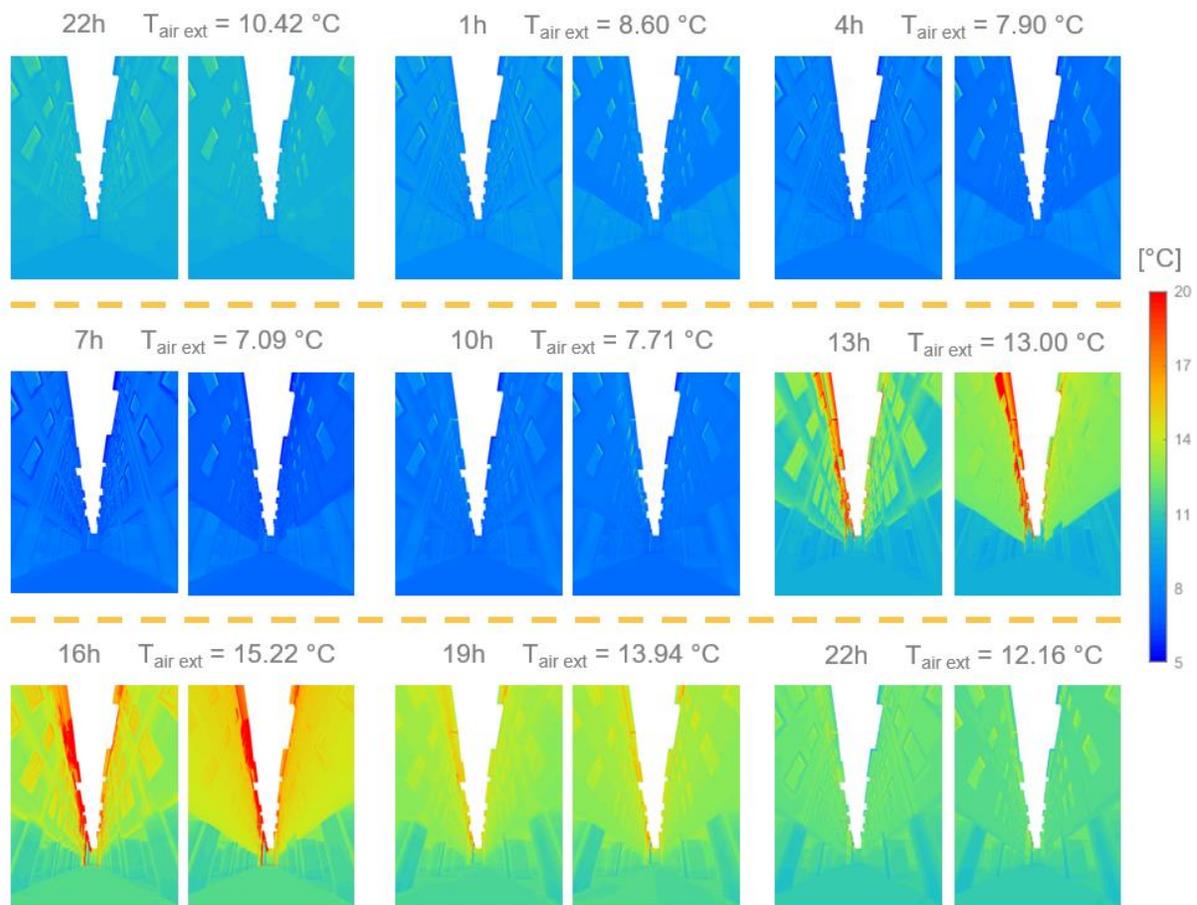


Figure 3.34 Températures de surface avec l'isolation intérieure à gauche et extérieure à droite.

Elle suit les variations de la température de l'air pour deux raisons principales :

- La première provient du fait que le rayonnement solaire n'affecte que le dernier étage des bâtiments orientés au sud. L'isolant extérieur est alors principalement soumis aux échanges convectifs avec la température de l'air.
- La seconde provient de l'inertie thermique de cet isolant qui est plus faible que celle des murs de façades. Les variations de température sont alors plus rapides et le déphasage moins important.

Comme attendu, l'isolation par l'extérieur élimine les ponts thermiques, ce qui a pour effet d'uniformiser les températures de surface (Figure 3.35). Cela provient du fait que l'isolation est constituée seulement de laine de roche, alors que les murs de façade sont constitués de bois et de torchis.

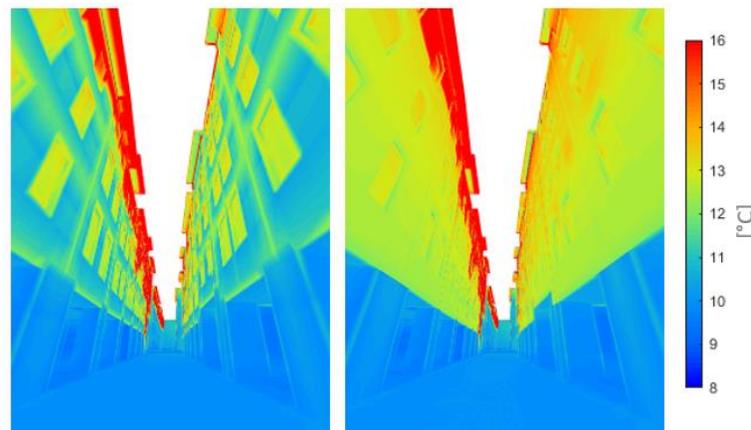


Figure 3.35 Températures de surface avec isolation intérieure à gauche et extérieure à droite à 13h.

La Figure 3.36 montre la température d'un nœud nommé P1 situé en façade au niveau d'un plancher intermédiaire. Elle est plus élevée pendant la nuit et plus faible pendant la journée lorsque l'isolant est à l'intérieur. Globalement, elle a une amplitude plus grande lorsque l'isolant est à l'extérieur (différence maximale de -0.9 K à 8 h et 1.3 K à 13 h).

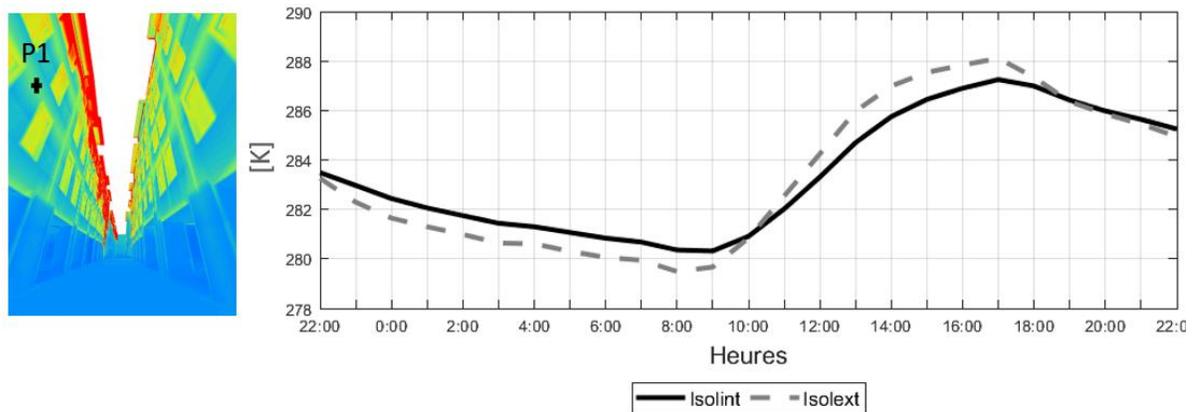


Figure 3.36 Températures du point P1 selon les deux modèles.

Pour mieux comprendre cette différence d'amplitude, un bilan des flux sur ce nœud est réalisé (Figure 3.37). Il montre l'équilibre entre les flux qui « rentrent » et les flux qui « sortent » du nœud. Une faible valeur des flux signifie des échanges d'énergie plus faibles et tend vers l'équilibre thermique.

Les flux en ondes courtes sont toujours positifs puisqu'ils apportent de l'énergie au nœud. La géométrie et la réflectivité étant les mêmes, ils sont égaux dans les deux modèles.

Les flux convectifs et radiatifs en ondes longues dépendent de la différence de température entre le nœud et l'environnement extérieur. Avec l'isolant à l'intérieur, les flux convectifs sont négatifs pendant la nuit et la matinée. Cela traduit une température de l'air extérieur inférieure à celle du nœud et indique que l'air extérieur transmet de l'énergie au nœud. Pendant l'après-midi, le nœud perd de l'énergie par convection dans les deux cas. La valeur de ce flux caractérise l'écart entre la température de l'air et la température du nœud. Les flux convectifs avec l'isolant extérieur sont presque nuls, ce qui signifie que la température du nœud dans ce cas est quasiment à la température de l'air, excepté en fin de journée où l'air extérieur transmet de l'énergie au nœud.

Les flux radiatifs en ondes longues sont toujours négatifs, avec des valeurs plus grandes pour l'isolant extérieur. Cela signifie que le nœud émet plus d'énergie qu'il n'en reçoit. Ce qui est expliqué par le fait que le nœud P1 est situé sur la façade exposée au sud qui est plus chaude que la façade nord, nuit et jour.

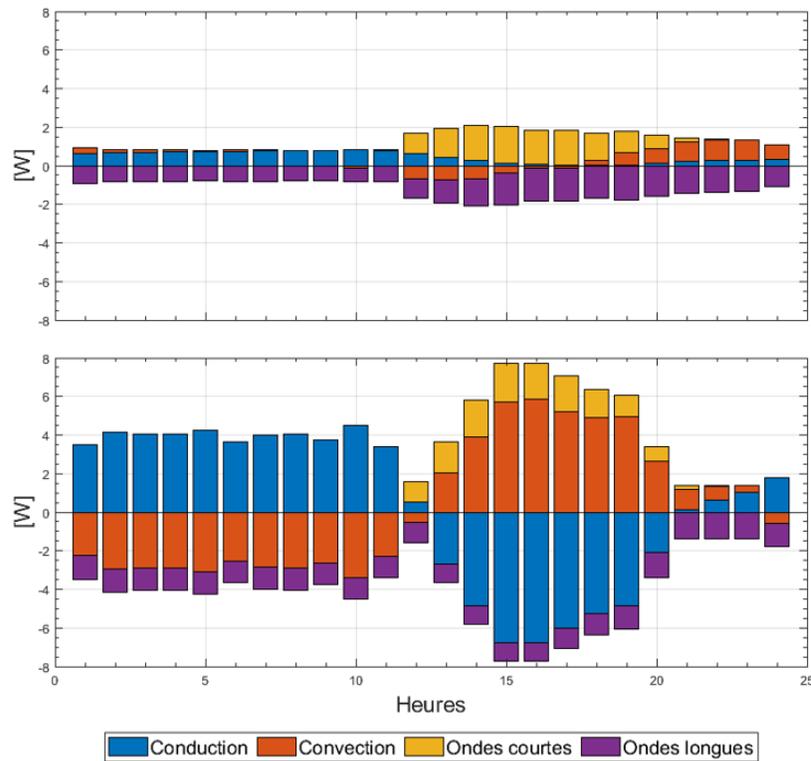


Figure 3.37 Bilan des flux nodaux du nœud P1 avec isolant extérieur en haut et intérieur en bas.

Un flux conductif positif signifie que de la chaleur est apportée au nœud par l'intérieur du mur (le plancher est en train de se refroidir), alors qu'un flux conductif négatif signifie que le nœud transmet de la chaleur vers l'intérieur du mur (le plancher est en train de se réchauffer).

Ainsi, lorsque l'isolant est à l'intérieur, le nœud P1 se refroidit pendant la nuit, se réchauffe pendant l'après-midi et se refroidit en fin de journée. Lorsque l'isolant est à l'extérieur, les flux conductifs du nœud sont bien plus stables.

La Figure 3.38 montre la somme des flux conductifs des nœuds de la surface du plancher donnant sur la rue dans lequel le nœud P1 se situe. Le plancher subit les mêmes variations que le nœud P1. En valeur absolue, le flux conductif total à travers le nez de plancher est de 721 W avec l'isolant intérieur et de 89 W avec l'isolant extérieur pour l'ensemble de la période étudiée. L'isolant extérieur divise par huit le flux conductif à travers le plancher.

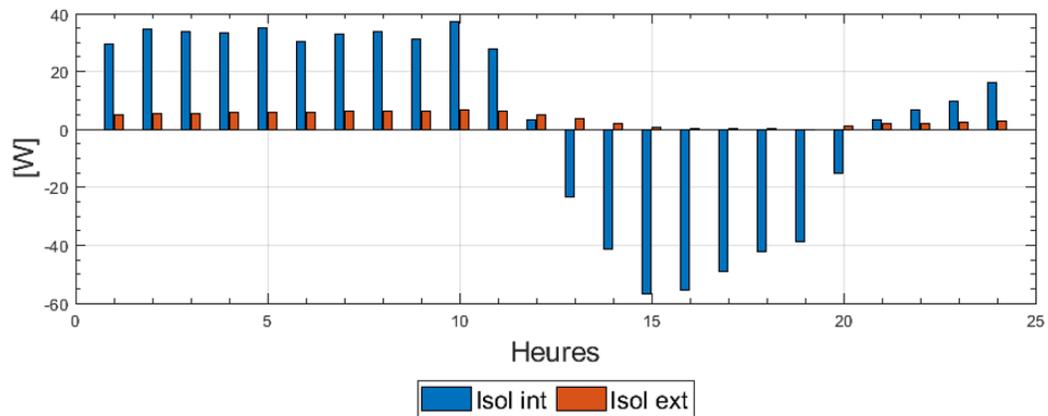


Figure 3.38 Flux conductifs du nez de plancher avec isolant intérieur et extérieur.

L'influence sur la température de l'air intérieur des appartements est limitée. Dans un appartement non chauffé, la différence de température entre l'isolant intérieur et extérieur est de 0.2 K en moyenne. Cela provient du fait que les planchers intermédiaires sont modélisés avec du bois lourd dont la conductivité thermique est faible. De plus, la température de l'air est influencée par l'ensemble des surfaces intérieures de l'appartement qui elles ne dépendent pas du changement de position de l'isolant.

*

L'isolation extérieure est plus sensible à l'environnement extérieur que les murs de façade. Sur la Figure 3.35, lorsque l'isolant est à l'extérieur, on peut voir une température de surface qui augmente avec la hauteur. Cette augmentation est provoquée par la réflexion du rayonnement solaire et de l'émission infrarouge de la partie haute de la façade sud. Ces interactions et les variations des températures de surface influencent le confort des piétons.

La température moyenne radiante est calculée en un point au centre de la rue à une hauteur de 1 m 50. La Figure 3.39 montre les irradiances en ondes courtes à 13 h et en ondes longues à 8 h et 13 h. Les premières ne sont montrées qu'une seule fois car elles sont égales dans les deux modèles. En ondes longues, des différences sont visibles. Lorsque l'isolant est à l'extérieur, les irradiances sont plus faibles en début de journée et plus élevées en début d'après-midi. Elles suivent le comportement de la température de surface (Figure 3.34). Sur l'image de 13 h, on peut voir une tache plus chaude sur le premier étage lorsque l'isolation est à l'extérieur. Elle provient de la réflexion spéculaire des vitrages du dernier étage de la façade sud. Cela constitue un autre exemple de l'influence des interactions entre les façades lorsque l'isolant est à l'extérieur. Lorsque l'isolant est à l'intérieur, on peut voir des bandes de radiosités différentes du reste de la façade. Elles correspondent au matériau bois qui a une émissivité plus grande que le torchis et des températures de surface plus variables (ponts thermiques).

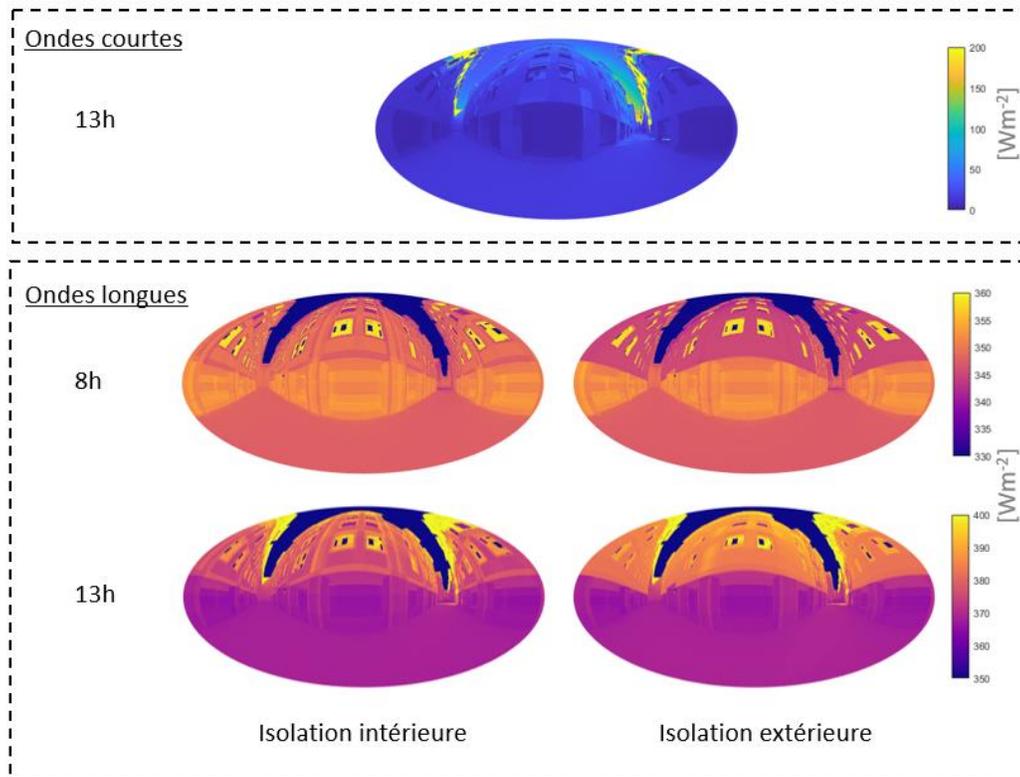


Figure 3.39 Irradiances en ondes courtes et en ondes longues pour les deux modèles.

La Figure 3.40 montre la différence de T_{mrt} entre les deux modèles à chaque heure de l'étude. Lorsque l'isolant est à l'extérieur, la T_{mrt} est plus faible qu'avec l'isolant intérieur avec une différence moyenne de -0.15 K pendant la nuit. Pendant la journée, c'est l'inverse avec une différence maximale de presque 0.4 K à 13 h. Les différences de T_{mrt} demeurent faibles du fait que les températures des façades dans les deux cas sont proches.

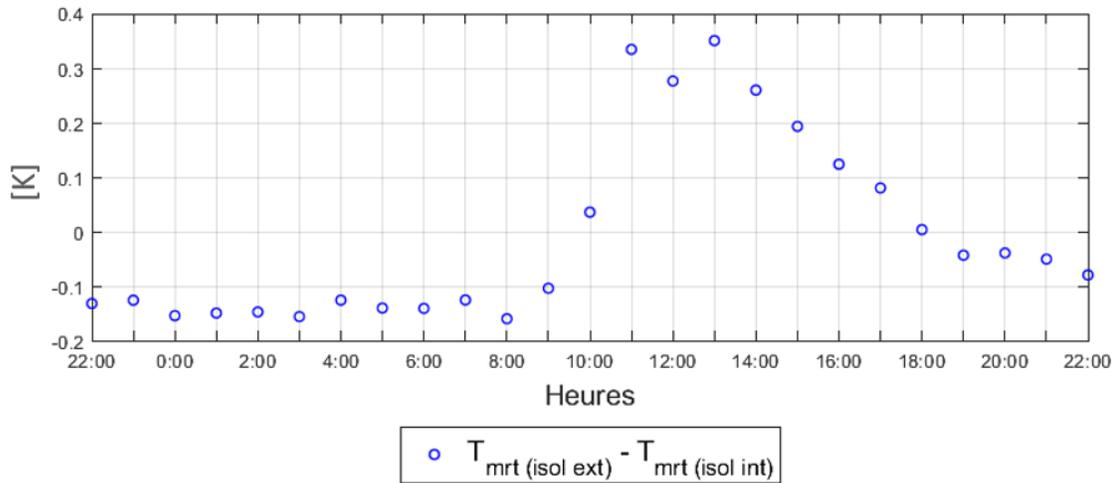


Figure 3.40 Différence de températures moyennes radiantes entre les deux modèles.

*

Discussion

L'influence d'une isolation par l'extérieur dans la rue des Tonneliers a été analysée. Elle permet de réduire les ponts thermiques à travers les façades. Son influence sur la température de l'air intérieur est limitée en raison de la faible conductivité thermique des planchers intermédiaires. Sa faible inertie thermique engendre une amplitude des températures de surface plus grande sur la période étudiée. Cette augmentation d'amplitude influence le confort thermique des piétons avec une température moyenne radiante plus faible pendant la nuit et plus élevée pendant le jour.

3.6 Conclusions

Trois études ont été menées sur le modèle géométrique de la rue des Tonneliers (Bayonne). La première consistait à comparer les résultats d'une campagne de mesures avec ceux de la simulation. La seconde portait sur l'étude de la réflexion des modèles radiatifs en ondes courtes et en ondes longues, également basée sur des résultats de mesures. Et la troisième étudiait l'influence d'une isolation par l'extérieur dans la rue.

L'étude comparative entre simulations et mesures a montré de très bonnes corrélations dans les résultats. La comparaison a été réalisée de manière spatialisée et ponctuelle : la première au moyen de thermographies mesurées et simulées et la seconde pour analyser l'environnement intérieur des appartements (air et surface). Ces comparaisons ont permis de valider le modèle de simulation ainsi que les corrections des thermographies mesurées, de valider les hypothèses relatives aux usages des habitants (chauffage) ainsi que les propriétés thermiques des matériaux des bâtiments.

L'influence du type de réflexion dans différentes bandes spectrales a été étudiée suite aux mesures. Les résultats ont montré qu'il serait intéressant d'introduire une troisième bande spectrale (infrarouge proche) dans les simulations. Le spectre ondes courtes devrait être divisé entre le visible et l'infrarouge proche. L'impact de la réflexion spéculaire en ondes longues est limité dans le cas de la rue des Tonneliers (matériaux proches d'un corps noir et piégeage du rayonnement).

L'isolation par l'extérieur des bâtiments permet de réduire les ponts thermiques en façade. Sa faible inertie thermique engendre une amplitude des températures de surface plus grande que les murs de façade. Cela entraîne une variation de la température moyenne radiante et pénalise le confort des piétons. Ces variations sont limitées dans le cas de la rue des Tonneliers car le rayonnement solaire ne pénètre que très légèrement dans la rue en hiver.

Chapitre 4

Études thermiques à l'échelle du quartier

4.1 Introduction

Différentes échelles urbaines ont été abordées dans les chapitres précédents (chambre, bâtiment et rue). Ici, nous proposons de considérer l'échelle du quartier.

L'influence de la morphologie urbaine sur le potentiel solaire [Beckers 2010b] [Sarralde 2015] et sur le confort thermique [Kawai 2014] [Taleghani 2015] [Sobstyl 2018] a fait l'objet d'une grande attention ces dernières années.

Dans la plupart des études d'apports solaires, la partie réfléchie du rayonnement est négligée. Ce n'est que récemment que les inter-réflexions ont pu être prises en compte dans les calculs grâce à l'utilisation de la méthode de radiosité [Bugeat 2020].

De nombreux facteurs influençant le confort thermique d'une scène urbaine ont été identifiés, comme l'enveloppe des bâtiments, la densité ou encore la forme de la scène. Cependant, le rôle de l'inertie thermique des bâtiments est très peu étudié à une échelle plus grande que celle du bâtiment. L'inertie est étroitement liée à la géométrie de la scène, qui doit donc être détaillée.

Une forte inertie thermique permet de limiter l'augmentation de la température des bâtiments et d'assurer un déphasage suffisant pour évacuer pendant la nuit la chaleur accumulée. L'albédo du quartier influence l'énergie solaire réfléchie et absorbée par l'enveloppe des bâtiments. L'étude couplée de l'inertie thermique et de la réflectivité des

bâtiments peut améliorer le confort thermique des habitants ainsi que des piétons. L'idée est donc d'étudier la répartition de l'inertie thermique avec une réflectivité adaptée en fonction de l'ensoleillement.

Pour cela, le comportement thermique d'un quartier idéalisé sous le climat de la ville espagnole de Cordoue est étudié. Les résultats sont analysés pour les trois quantités d'intérêt des simulations effectuées dans cette thèse : la température des surfaces, la température de l'air intérieur et la température moyenne radiante.

*

En premier lieu, le maillage du quartier idéalisé et les modèles de simulation sont présentés. Ensuite, une comparaison entre inertie thermique forte et faible est menée. Puis, l'influence de la couleur des bâtiments du quartier en fonction du type d'inertie est analysée. Enfin, une réhabilitation énergétique du quartier est étudiée grâce à une répartition de l'inertie thermique en fonction des trajets solaires.

4.2 Description du modèle géométrique et de simulation

4.2.1 Modèle géométrique

Le quartier idéalisé (Figure 4.1) est un rectangle de 64 m par 72.8 m. Il est composé d'une place rectangulaire de 32 m par 19.2 m, d'une rue canyon de 32 m de longueur et de $\frac{\text{Hauteur}}{\text{Largeur}} = 0.4$ orientée selon l'axe est-ouest et d'une zone de huit pavillons orientés à l'est et à l'ouest. La hauteur moyenne des bâtiments est de 10 m avec un maximum de 23.80 m pour la tour située entre la place et la rue canyon. L'aire de la surface construite représente 46 % de l'emprise du quartier. Les bâtiments sont construits en répétant la chambre créée dans le chapitre 2 traitant de la méthode. Le quartier en comporte 121 au total.

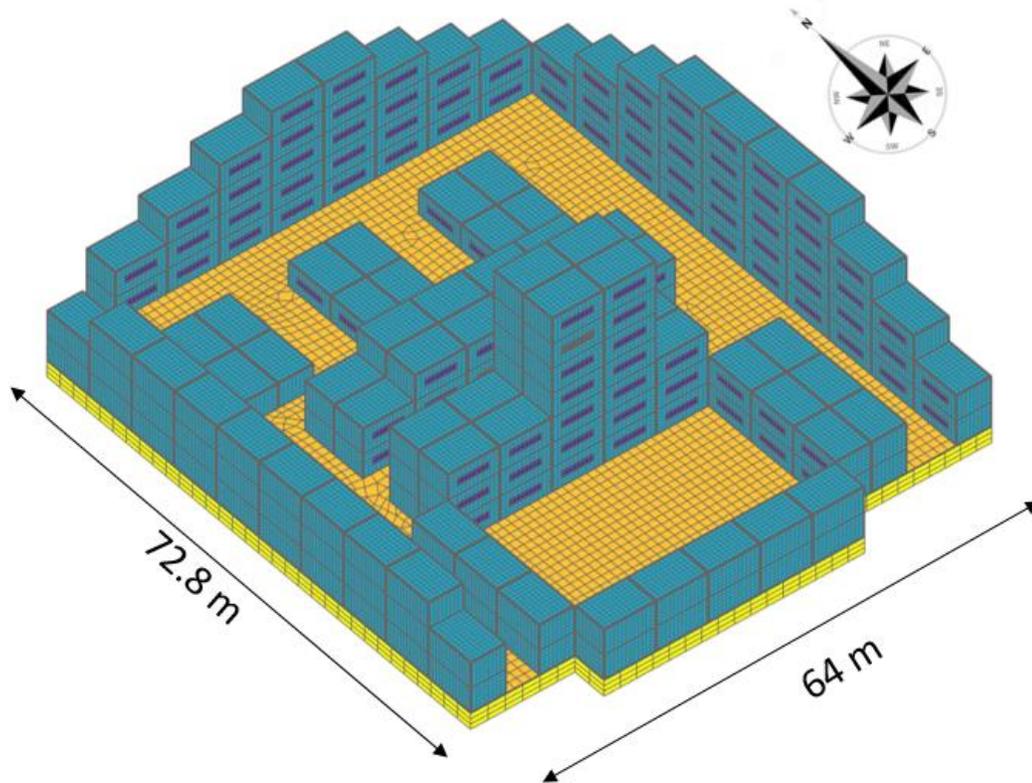


Figure 4.1 Modèle du quartier idéalisé.

Le maillage du quartier se décompose en trois parties. La première concerne les bâtiments (mailles de 50 cm de côté), la deuxième la chaussée (mailles de 1 m de côté) et la troisième le sous-sol (mailles de 2 m de côté). La méthode du collage de maillage est utilisée pour les connecter. L'ensemble du modèle comprend 424 532 éléments de volume (97.5 % pour les bâtiments, 1.6 % pour la chaussée et 0.7 % pour le sous-sol) et 539 071 degrés de liberté (nœuds).

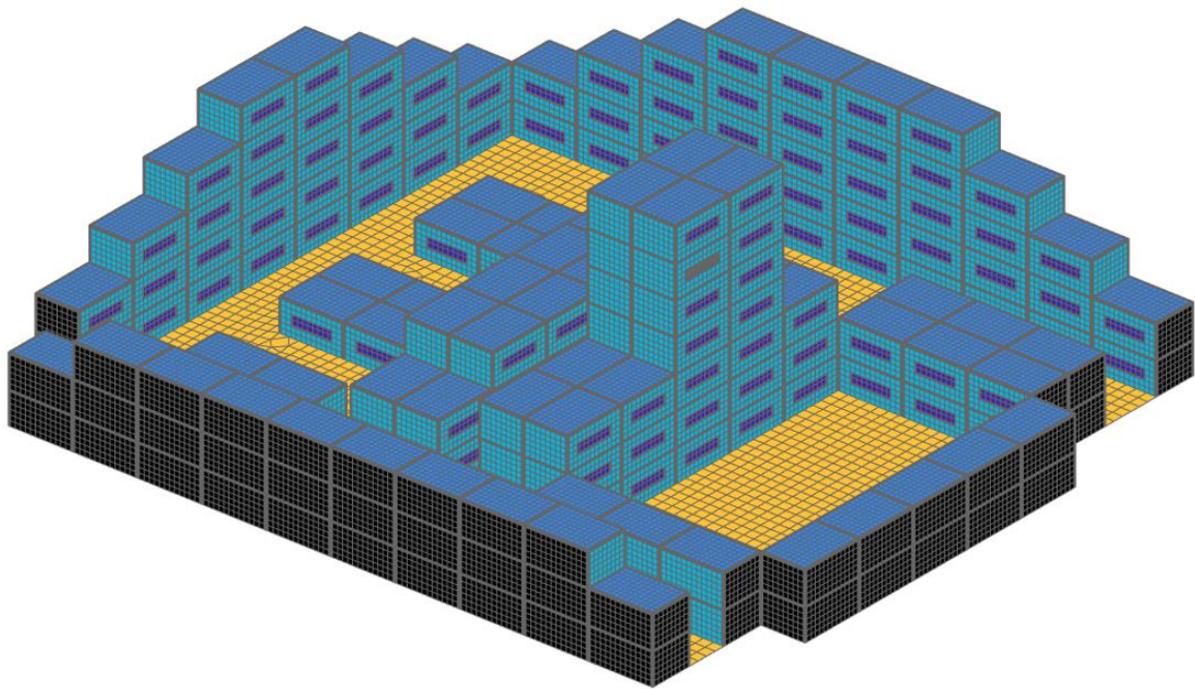


Figure 4.2 Peau du modèle du quartier.

La peau extérieure (Figure 4.2) échange avec l'environnement extérieur sauf les faces aux extrémités du quartier qui sont considérées comme adiabatiques (en noir sur la Figure 4.2). Elle contient 83 364 faces radiatives dont 10 % représentent les vitrages. La matrice des facteurs de vue a un taux de remplissage de 7 % et une taille de mémoire de 10.1 Go. Pour limiter les temps de calcul, seuls les vitrages de trois appartements sont maillés finement (mailles de 5 cm de côté). Le premier se situe à l'avant dernier étage de la tour orientée au sud,

le deuxième est situé au premier étage d'un bâtiment au centre de la rue canyon orientée au sud et le troisième est positionné au premier étage d'un bâtiment donnant sur les pavillons orientés au nord (Figure 4.3). Ils sont appelés respectivement **I1**, **I2** et **I3**. Pour obtenir une enceinte radiative fermée, le quartier est entouré d'un sol infini à la température de l'air.

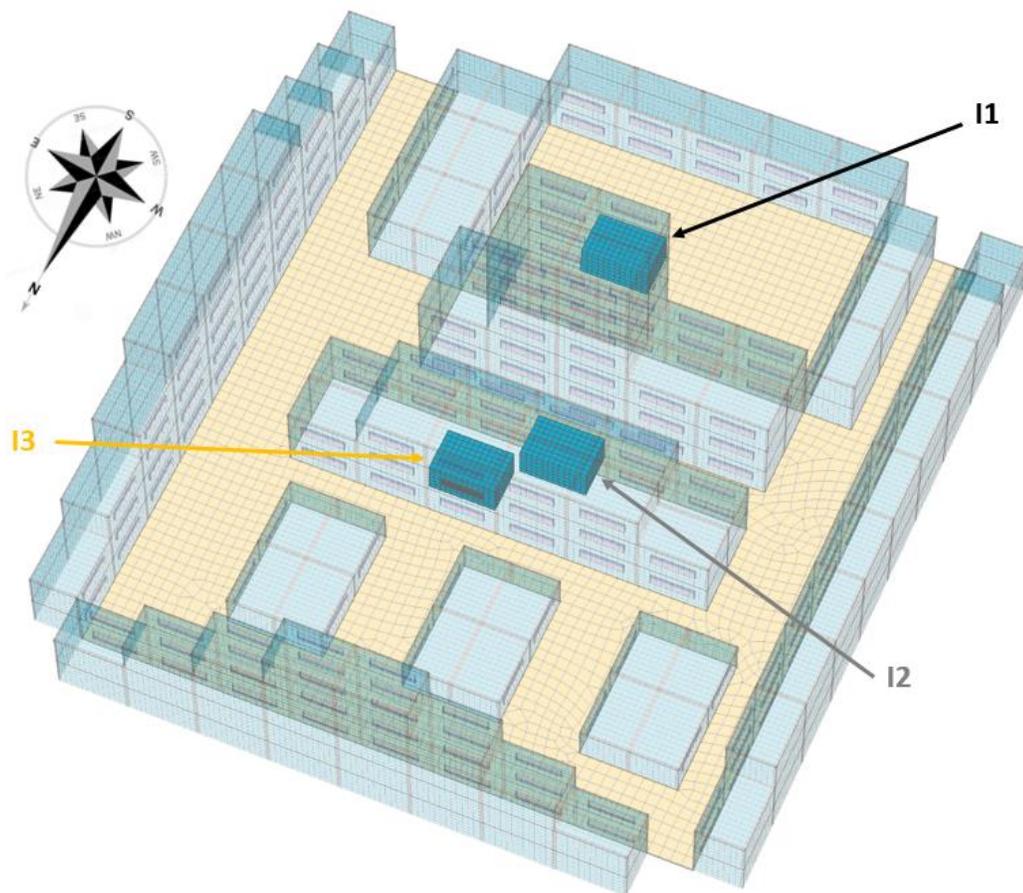


Figure 4.3 Position des trois appartements étudiés.

La Figure 4.4 montre le quartier en vue de dessus et en vue 3D. Chaque ensemble de bâtiments est représenté avec une couleur différente. Cela permet de mieux interpréter les projections stéréographiques des points **P1**, **P2** et **P3**, montrées sur la Figure 4.4. Les bâtiments ainsi que les trajets solaires pour les 21 de chaque mois y sont représentés. Les trois points sont

positionnés au niveau du sol de la rue et représentent les différentes configurations à l'intérieur du quartier. Le point **P1** est situé au centre de la place. Le soleil y est visible toute l'année sauf entre mi-octobre et mi-janvier. Le 21 septembre, il est visible entre 8 h et 16 h. Le facteur de vue du ciel est de 45 %. Pour le point **P2** qui est situé au centre de la rue canyon, la visibilité est largement réduite avec un soleil visible en juin et juillet entre 7h30 et 9h30 et 14 h et 16h30. Le 21 septembre, il n'est jamais visible depuis cette position et le facteur de vue du ciel est de 9.6 %. Enfin, depuis le point **P3**, le soleil est visible la moitié de l'année entre mi-février et mi-septembre entre 9 h et 15 h en moyenne. Le facteur de vue du ciel est égal à 33 %.

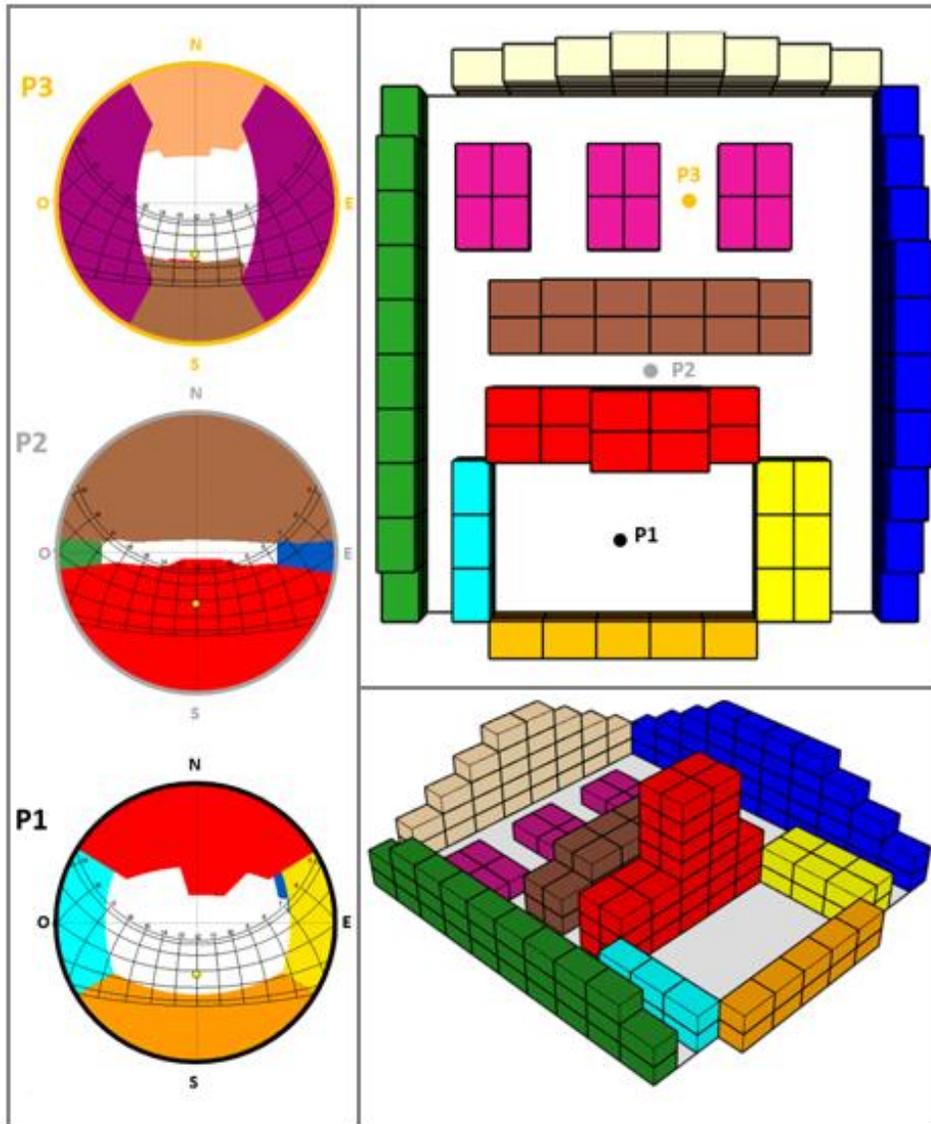


Figure 4.4 Projection stéréographique de trois points du quartier, vue de dessus et vue 3D (Heliodon2™).

4.2.2 Modèle de simulation

L'étude est menée sur une période de 24 h du 26 septembre à 6 h du matin au 27 septembre à 6 h du matin (jour dégagé et chaud), sous le climat de la ville de Cordoue. La Figure 4.5 montre les propriétés thermiques des matériaux utilisés. Les fenêtres sont des simples vitrages, la chaussée est en asphalté et le sous-sol en argile. Deux matériaux sont utilisés pour les bâtiments : du béton lourd avec une forte inertie thermique ($\alpha_{\text{lourd}} = 9.17 \cdot 10^{-7}$) ou du béton léger avec une faible inertie thermique ($\alpha_{\text{léger}} = 5.23 \cdot 10^{-7}$). Ces valeurs ont été extraites des bases de données du site de l'application EnergyPlus (<https://energyplus.net>).

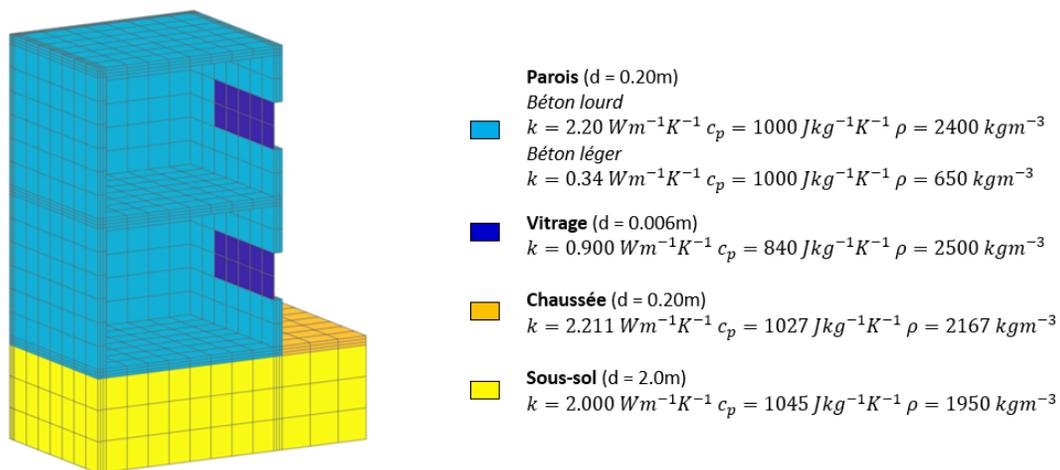


Figure 4.5 Propriétés thermiques des matériaux du quartier.

Pour les flux convectifs, la température de l'air est extraite du fichier de données climatiques et le coefficient de convection est fixé à $10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ en considérant une vitesse de vent faible [Mirsadeghi 2013]. La température de l'air intérieur est calculée dans les trois appartements (vitrages finement maillés). À l'intérieur de ces derniers, la température de l'air est libre et le coefficient de convection est fixé à $2.5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ pour les murs, $5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ pour les plafonds et $0.7 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ pour les planchers [CSTB 2012]. Le taux de renouvellement d'air est constant et égal à 1 vol h^{-1} .

Pour le rayonnement en ondes courtes, les irradiances directes normales et diffuses horizontales sont extraites du fichier de données climatiques. Elles sont introduites dans le modèle de Pérez pour calculer les exitances du ciel en utilisant la partition de Beckers (5 000 éléments). La même partition de ciel est utilisée pour calculer les températures et les exitances du ciel en ondes longues à partir du modèle de Martin et Berdhal. Les propriétés radiatives en ondes courtes et en ondes longues des faces de la peau du modèle sont montrées sur la Figure 4.6. Les vitrages sont parfaitement spéculaires en ondes courtes et en ondes longues.

Propriétés optiques et radiatives des surfaces

Surfaces		Ondes courtes					Ondes longues		
		τ_r	τ_d	ρ_r	ρ_d	α	ε	$\rho_{r,ol}$	$\rho_{d,ol}$
Bâtiments	Sombres	0	0	0	0.30	0.70	0.90	0	0.10
	Clairs	0	0	0	0.70	0.30	0.90	0	0.10
Vitrages		0.80	0	0.10	0	0.10	0.80	0.2	0

Figure 4.6 Propriétés radiatives des surfaces en ondes courtes et en ondes longues.

La Figure 4.7 présente les données d'entrée radiatives du calcul. La température de l'air extérieur est égale à la température du ciel à l'horizon. C'est pourquoi elle n'est pas montrée explicitement.

Le problème est résolu en régime transitoire. La durée de la simulation est de 24 h avec un pas de temps d'une heure. Les températures initiales sont obtenues en calculant le premier pas de temps en régime permanent. La température du sous-sol est fixée à 296.10 K selon le fichier de données climatiques. Le calcul des facteurs de vue étendus prend 30 min dans Embree et le calcul des irradiances absorbées moins de deux minutes. Le calcul thermique prend 1 h dans Cast3M. Au total, une simulation prend environ 1h30.

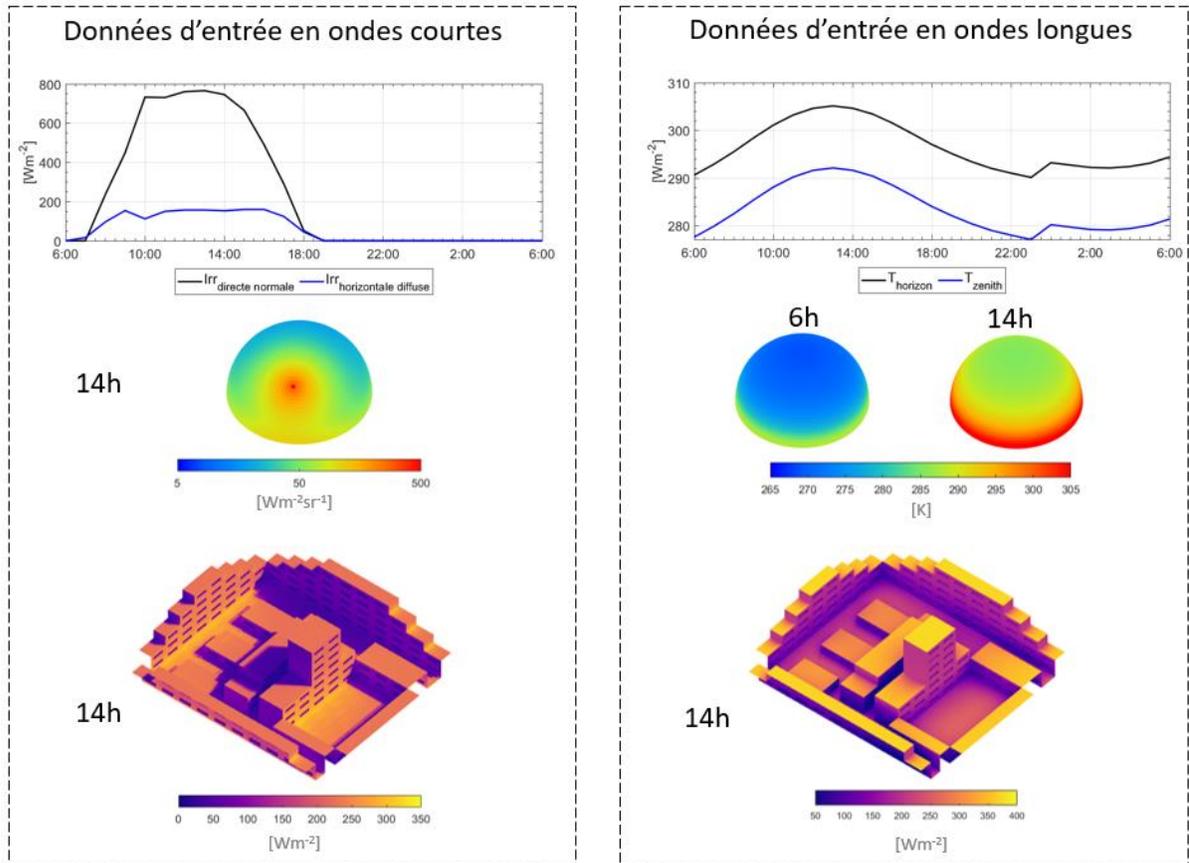


Figure 4.7 Données d'entrée radiatives de l'été.

4.3 Comparaison entre inertie thermique faible et forte

L'influence de l'inertie thermique des bâtiments sur le comportement thermique du quartier est analysée. Deux modèles sont comparés. Dans le premier, les bâtiments sont modélisés avec du béton lourd et dans le deuxième avec du béton léger (Figure 4.5). Dans les deux modèles, les faces opaques sont modélisées avec une couleur claire ($\rho_d = 0.7$). Les températures de surface, la température de l'air intérieur des trois appartements d'intérêt (**I1**, **I2** et **I3**) et la température moyenne radiante du quartier sont analysées.

La Figure 4.8 montre les températures de surface du quartier à différentes heures. Pendant la journée, les bâtiments lourds ont des températures de surface plus faibles que les bâtiments légers. Pendant la nuit, c'est l'inverse avec des températures de surface plus faibles pour les bâtiments légers. Cela provient du fait que le béton lourd a une plus grande inertie thermique. Il nécessite une plus grande quantité d'énergie pour monter ou baisser en température. À 14 h, lorsque le soleil est au plus haut, la différence des températures de surface entre les deux modèles est aussi maximale : + 6.5 K en moyenne pour des bâtiments légers. Les surfaces ensoleillées sont plus chaudes de 6.6 K en moyenne que les surfaces ombragées pour les bâtiments lourds. Pour les bâtiments légers, elles sont plus chaudes de 11.5 K. À partir de 19 h, lorsque le soleil est couché et que la température de l'air extérieur diminue, les bâtiments légers deviennent plus froids que les bâtiments lourds.

Pendant la nuit, les différences entre les deux modèles se réduisent, avec des bâtiments légers plus froids de 1.5 K en moyenne à 4 h du matin. Ils se rafraichissent deux fois plus vite que les bâtiments lourds. En effet, le toit des bâtiments légers de la rue canyon passe de 304.2 K à 16 h à 290 K à 23 h, soit une diminution de 14 K en 7 h. Sur la même durée, la température du toit avec des bâtiments lourds diminue de 6.4 K.

Globalement, le béton léger entraîne une amplitude des températures de surface plus grande que le béton lourd. Les plus grandes différences se trouvent dans les surfaces exposées au rayonnement direct du soleil.

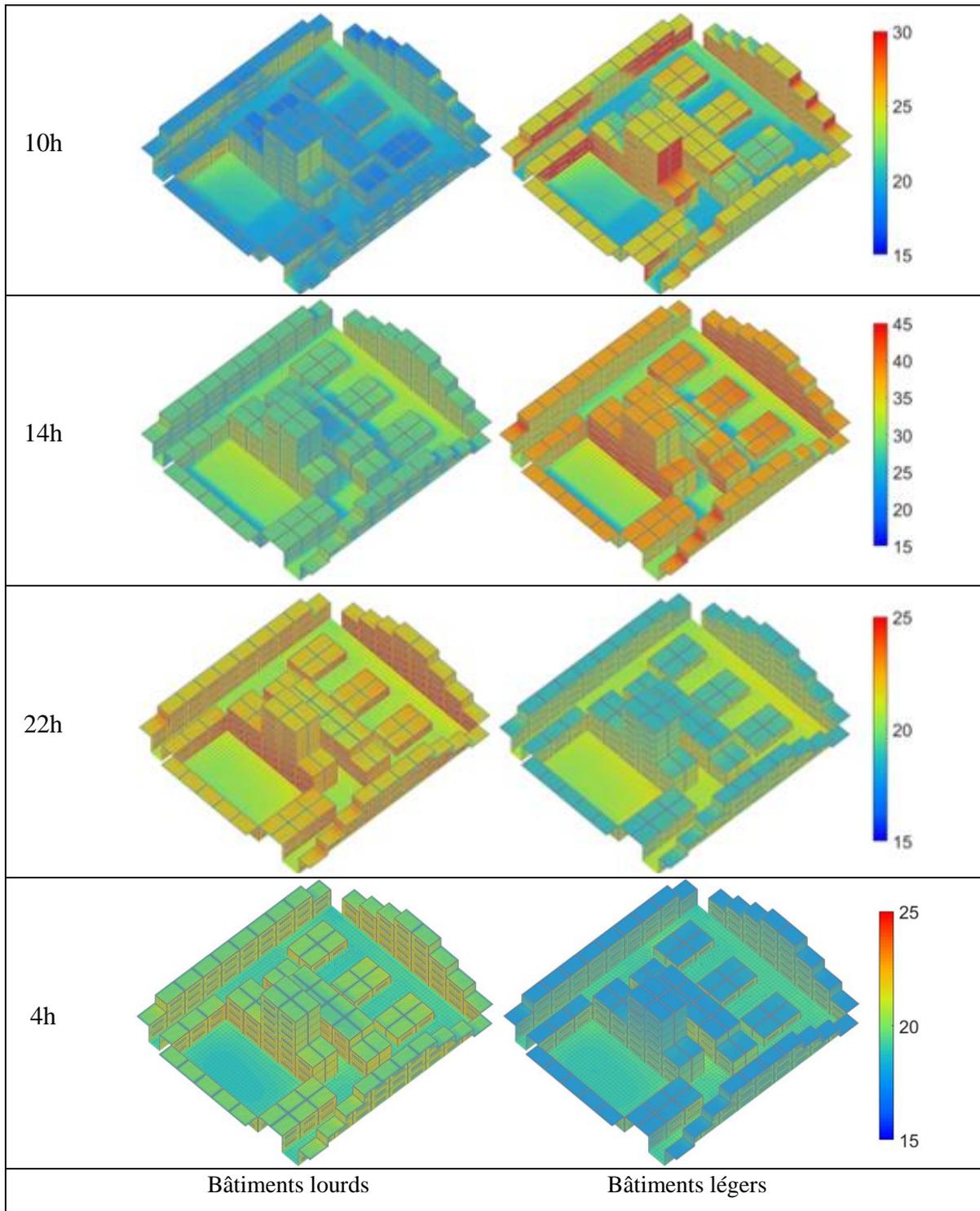


Figure 4.8 Températures de surface du quartier.

*

La Figure 4.9 montre la température de l'air intérieur des trois appartements étudiés pour les deux modèles. Pour rappel, **I1** correspond à un appartement de l'avant dernier étage de la tour orientée au sud, **I2** à un appartement situé dans la rue canyon orienté au sud et **I3** à un appartement orienté au nord situé dans la zone des pavillons (Figure 4.3).

Pour les trois appartements, la température de l'air des bâtiments légers est plus élevée que celle des bâtiments lourds, pour toute la durée de l'étude. Les différences moyennes sont de **2.75 K**, **1.6 K** et **1.2 K** respectivement. Les plus grandes différences se trouvent dans l'appartement de la tour **I1** car il est orienté au sud et reçoit du rayonnement solaire direct. Les deux autres appartements, l'un orienté au nord et l'autre étant masqué par son environnement bâti, ne reçoivent jamais du soleil direct. La différence maximale dans l'appartement de la tour est de **5 K** à 15 h entre les bâtiments légers et lourds. Pour les deux autres appartements, la différence maximale est divisée par deux (**2.7 K** et **2.3 K** à 16 h). Pendant la nuit, les températures de l'air des trois appartements baissent plus vite avec du béton léger qu'avec du béton lourd (comme les températures de surface). A 6 h du matin, la température de l'air des bâtiments légers reste plus élevée de **1.9 K**, **1.3 K** et **1 K** que les bâtiments lourds.

De plus, il est important de noter que la température de l'air maximale de **I1** est supérieure de 3.5 K par rapport à celle des deux autres appartements avec du béton léger. Avec du béton lourd, elle n'est que de 1.5 K. Cela signifie que le béton lourd est plus efficace que le béton léger lorsque les bâtiments sont exposés au rayonnement direct du soleil.

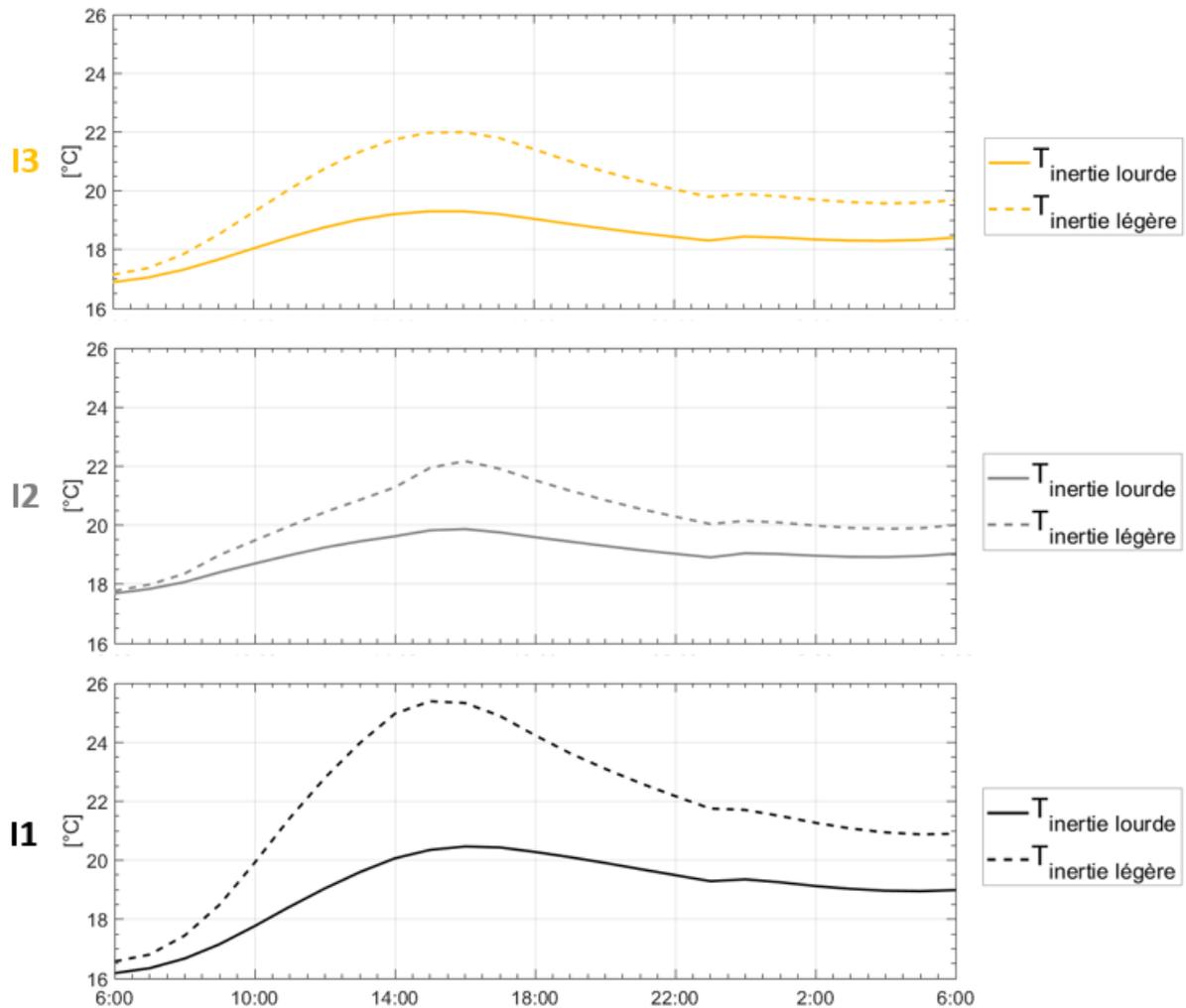


Figure 4.9 Températures de l'air intérieur des trois appartements étudiés.

*

La Figure 4.10 montre une carte de température moyenne radiante du quartier pour le modèle avec des bâtiments légers à 14 h. La carte est constituée de 2 352 points espacés d'un mètre. L'amplitude de T_{mrt} dans le quartier est de 70 K avec un maximum de 380 K dans les

zones ensoleillées comme la place et la zone nord des pavillons et un minimum de 310 K dans les zones ombragées comme la rue canyon et la zone sud des pavillons. La Figure 4.11 montre les irradiances totales (ondes courtes plus ondes longues) reçues par les trois points d'étude **P1**, **P2** et **P3** pour chaque modèle à 14 h. Les irradiances reçues par les points **P1** et **P3** sont plus grandes que celles reçues par le point **P2** à cause de leurs plus grands facteurs de vue du ciel.

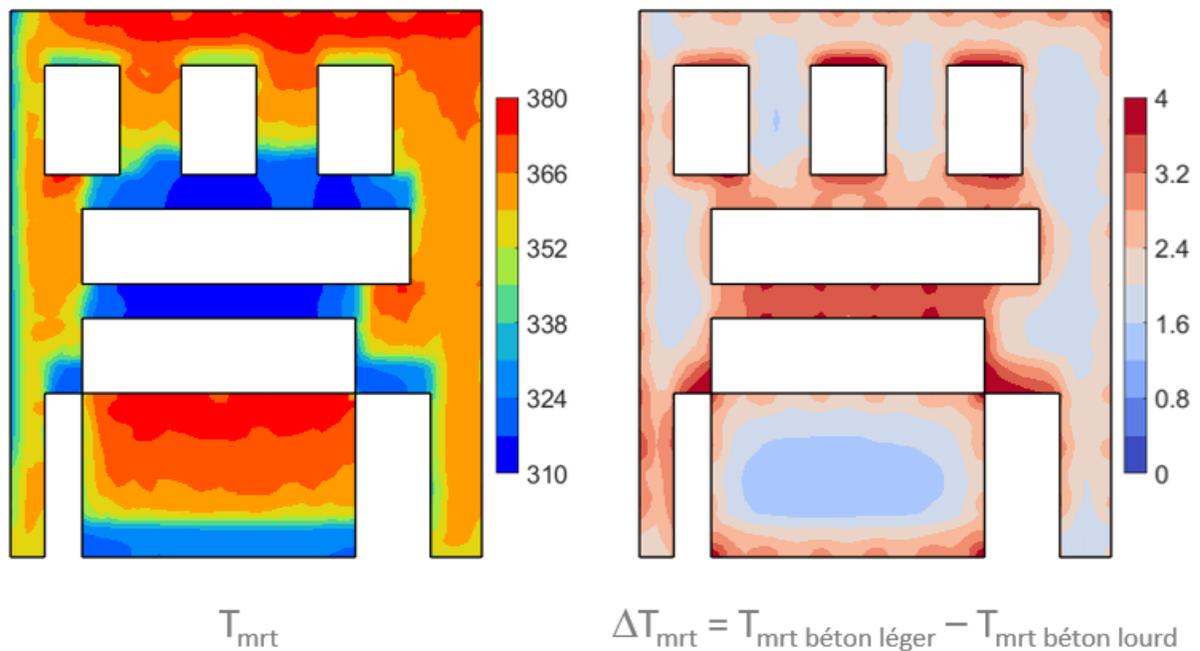


Figure 4.10 Carte de T_{mrt} du quartier à 14 h pour des bâtiments légers à gauche et différences de T_{mrt} à droite entre les deux modèles.

Du fait de la grande amplitude de la T_{mrt} dans le quartier, il est difficile de comparer directement la T_{mrt} du quartier entre les deux modèles. Pour cela, leur différence de T_{mrt} est montrée sur la Figure 4.10. Les bâtiments légers donnent des valeurs de T_{mrt} partout plus élevée que les bâtiments lourds. Les plus grandes différences se trouvent dans la rue canyon avec une augmentation de 3.5 K en moyenne. Les plus faibles différences (1.6 K) ont lieu dans les zones avec un plus grand facteur de vue du ciel, autrement dit les zones qui sont moins influencées

par les bâtiments. Sur la Figure 4.11, on peut voir que les plus grandes différences entre les deux modèles proviennent de la radiosité des bâtiments ensoleillés. L'inertie thermique des bâtiments a donc plus d'influence dans les zones qui reçoivent moins de rayonnement solaire.

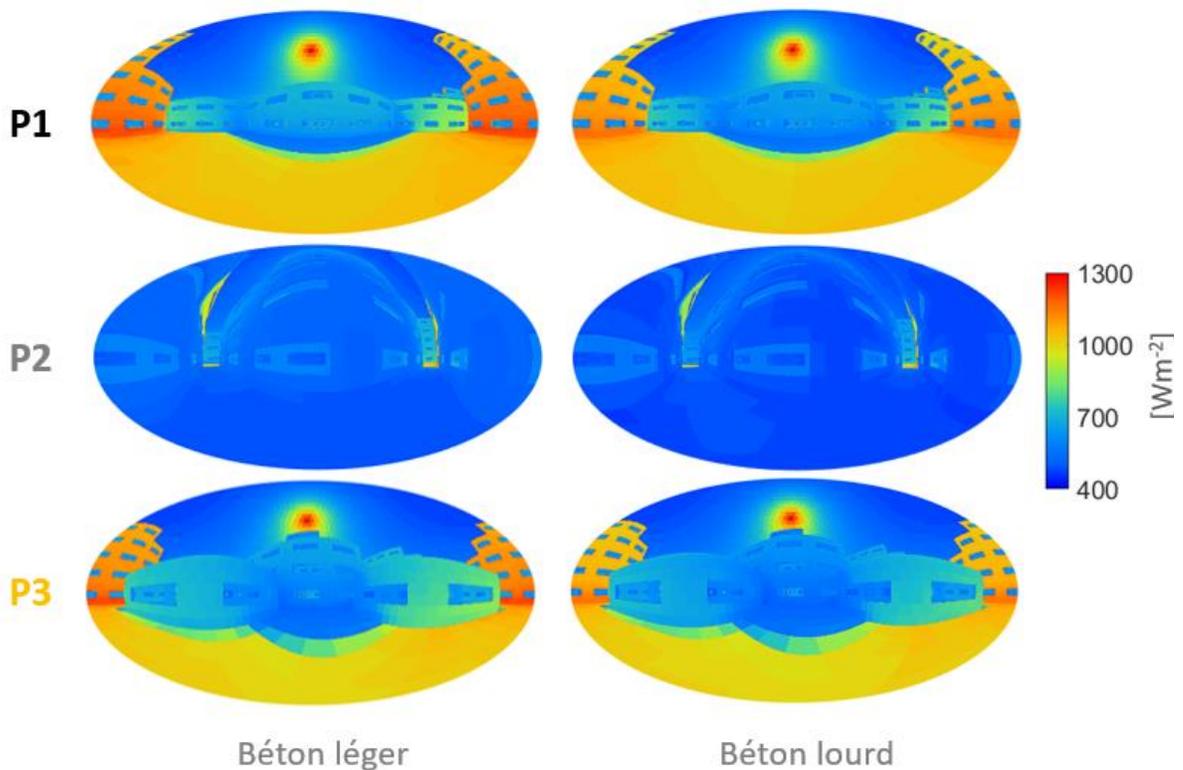


Figure 4.11 Irradiances totales de trois points du quartier pour chaque modèle à 14 h.

La Figure 4.12 montre la T_{mrt} moyenne du quartier pour chaque modèle pour toute la durée de l'étude. Elle est plus élevée pour des bâtiments légers que des bâtiments lourds pendant la journée avec un maximum de 2.2 K à 13 h. Pendant la nuit, elle est plus basse avec, pour des bâtiments légers, une différence maximale de 1.1 K à 22 h.

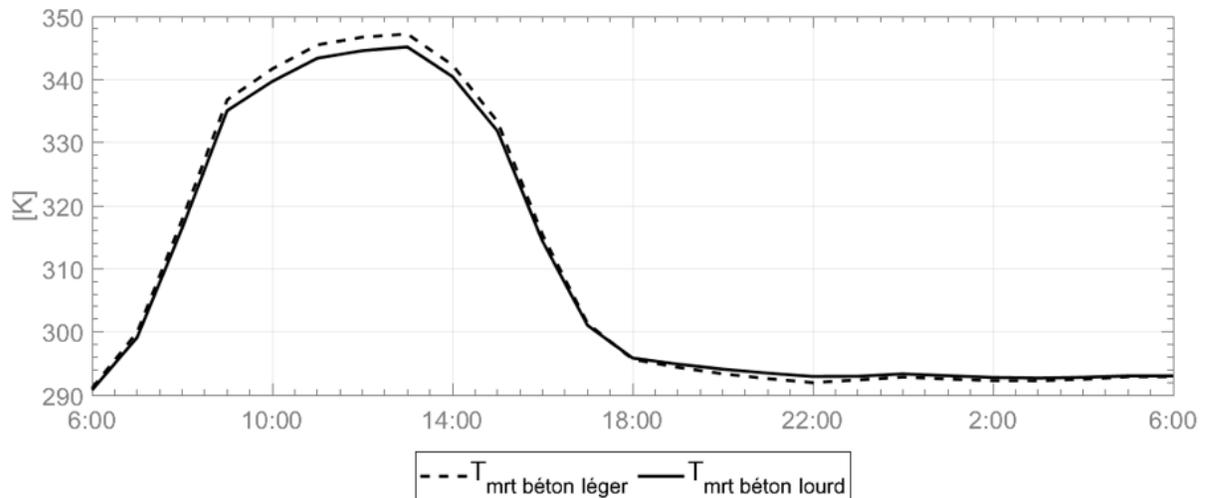


Figure 4.12 T_{mrt} moyenne du quartier pour chaque modèle.

*

Discussion

L'influence de l'inertie thermique sur le comportement thermique du quartier a été étudiée en comparant les bâtiments construits en béton léger et en béton lourd. Les bâtiments légers augmentent de 6.5 K les températures de surface au maximum pendant la journée et les diminuent de 1.5 K pendant la nuit. Les surfaces ensoleillées sont les plus touchées par le changement d'inertie avec une différence maximale de 9.6 K pour la tour de la place.

L'inertie thermique des bâtiments affecte le confort des habitants et celui des piétons. En effet, les bâtiments lourds diminuent de 1.9 K la température de l'air des bâtiments, en moyenne pour tout le quartier et pour toute la durée de l'étude. L'utilisation de cette forte inertie thermique est encore plus avantageuse pour les bâtiments exposés au rayonnement direct du

soleil avec une diminution de la température de l'air de 5 K au maximum pour un appartement situé dans la tour de la place.

En ce qui concerne le confort des piétons, les bâtiments légers donnent des T_{mrt} plus élevées pendant la journée (+2.2 K en moyenne) et plus basses pendant la nuit (-1.1 K en moyenne). L'inertie thermique des bâtiments a plus d'influence dans les zones les moins ensoleillées avec une différence maximale de 3.5 K dans la rue canyon entre les bâtiments légers et lourds.

Finalement, l'inertie thermique des bâtiments a plus d'influence sur le confort des habitants que sur le confort des piétons dans ce quartier idéalisé.

4.4 Relation entre couleur et inertie thermique

Après avoir étudié l'inertie thermique des bâtiments (béton léger et béton lourd), l'influence de la couleur des bâtiments est analysée. Les deux modèles précédents étaient modélisés avec des bâtiments clairs. Ils sont comparés à deux autres modèles dans lesquels la couleur des bâtiments est sombre. Ainsi, quatre modèles sont définis dans lesquels les bâtiments sont composés de :

- Béton léger clair.
- Béton léger sombre.
- Béton lourd clair.
- Béton lourd sombre.

La réflectivité est égale à $\rho_d = 0.7$ pour le béton clair et à $\rho_d = 0.3$ pour le béton sombre. La couleur du sol de la rue est la même pour l'ensemble des modèles.

*

La Figure 4.13 montre les températures de surface des quatre modèles à 14 h et à 4 h du matin pour chaque modèle. Les bâtiments sombres sont toujours plus chauds que les bâtiments clairs. Cela vient du fait que les bâtiments sombres absorbent plus d'énergie en ondes courtes que les bâtiments clairs pendant la journée. Les bâtiments lourds et sombres sont plus chauds de 4.5 K à 14 h et de 0.8 K à 4 h en moyenne par rapport aux bâtiments lourds et clairs. Les bâtiments légers et sombres sont plus chauds de 6.8 K à 14 h et 0.2 K à 4 h en moyenne par rapport aux bâtiments légers et clairs. La couleur sombre a donc plus d'influence sur les bâtiments légers que sur les bâtiments lourds. Les surfaces ensoleillées des bâtiments lourds et sombres sont plus chaudes de 9 K et les surfaces ombragées de 2 K en moyenne par rapport aux bâtiments lourds et clairs à 14 h. Pour des bâtiments légers et sombres, les premières sont plus élevées de 14.7 K et les secondes de 2.9 K que pour les bâtiments légers et clairs.

À 4 h du matin, l'influence du surplus de chaleur emmagasinée pendant la journée avec les bâtiments légers et sombres n'est plus visible en fin de simulation. Avec les bâtiments lourds et sombres, elle est notable avec une différence moyenne de 1 K.

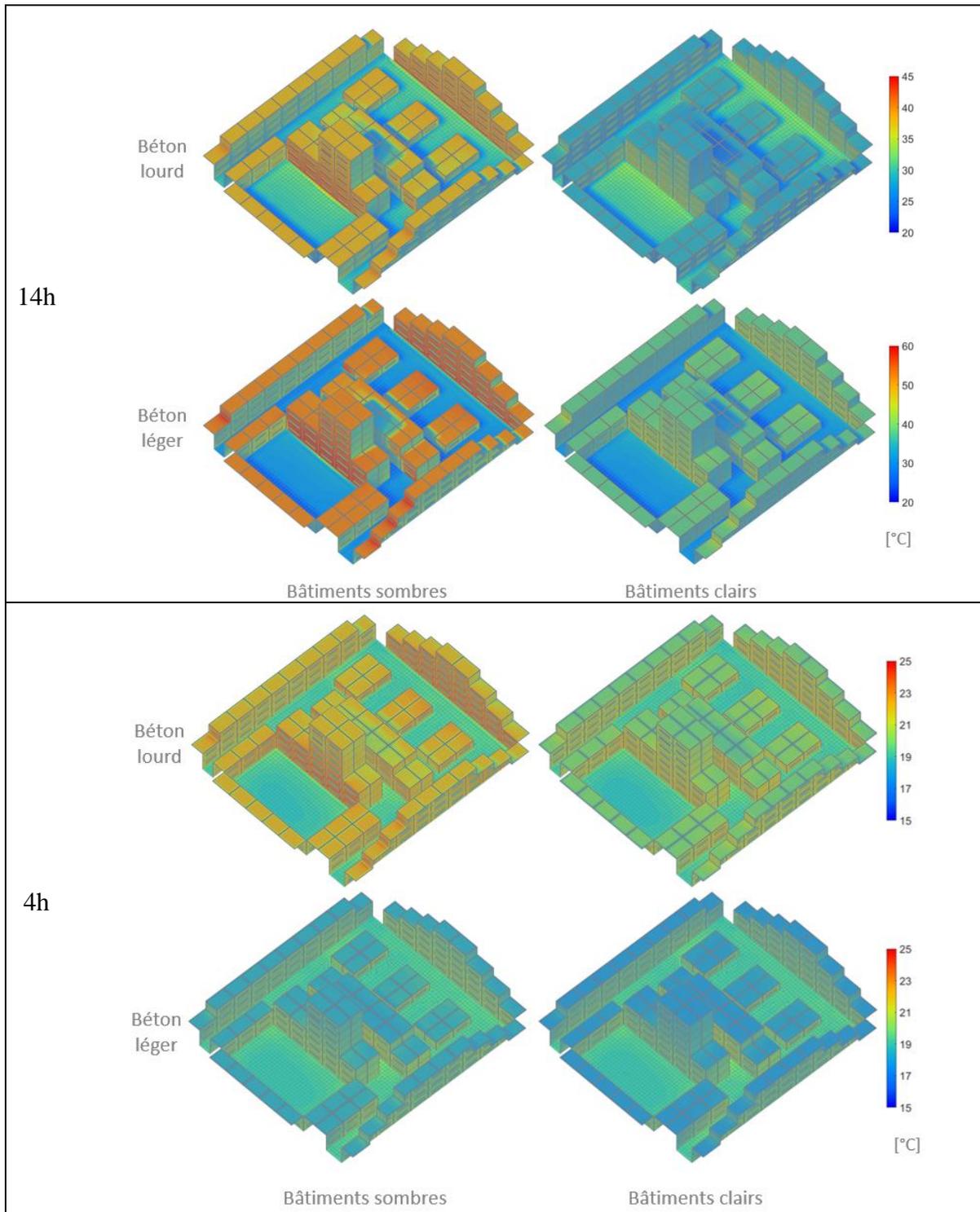


Figure 4.13 Températures de surface à 14 h et à 4 h pour chaque modèle.

La Figure 4.14 montre les températures de surface moyennes des quatre modèles à différentes heures. Pendant la journée, les bâtiments clairs et les bâtiments légers donnent des températures de surface plus élevées que les bâtiments sombres et les bâtiments lourds; pendant la nuit, c'est l'inverse. Pour chaque heure présentée, les valeurs de couleur verte indiquent la température de surface moyenne minimale et les valeurs de couleur rouge, la maximale. À 14 h, les bâtiments légers et sombres produisent une augmentation de 9.4 K par rapport aux bâtiments lourds et clairs. A 4 h, les bâtiments légers et clairs causent une diminution de 1.8 K par rapport aux bâtiments lourds et sombres.

Le changement de couleur influence davantage les bâtiments légers que les lourds pendant la journée (+6.8 K à 14 h entre les bâtiments légers et clairs et les bâtiments légers et sombres). En revanche, pendant la nuit, cela impacte plus les bâtiments lourds (+0.7 K à 4 h entre les bâtiments lourds et clairs et les bâtiments lourds et sombres).

Températures moyennes des surfaces (°C)

	10h	14h	18h	22h	4h
Béton léger clair	28.5	36.0	25.8	19.2	19.1
Béton léger sombre	33.0	42.8	27.6	19.6	19.3
Béton lourd clair	22.9	29.5	25.6	21.5	20.2
Béton lourd sombre	25.2	33.4	28.6	22.8	20.9

Figure 4.14 Températures moyennes des surfaces pour chaque modèle à différentes heures.

*

La Figure 4.15 montre la température de l'air intérieur des trois appartements étudiés (**I1**, **I2** et **I3**) selon les quatre modèles. Pour les trois appartements, la température de l'air est toujours plus élevée avec des bâtiments légers qu'avec des bâtiments lourds, indépendamment de la couleur des bâtiments (+2.7 K pour **I1**, +1.2 K pour **I2** et +1.5 K pour **I3** en moyenne).

Pour l'appartement **I1** situé dans la tour, la température de l'air des bâtiments sombres est plus élevée qu'avec des bâtiments clairs indépendamment du type d'inertie. Cela provient

du fait que la tour est exposée au rayonnement direct du soleil et qu'elle absorbe donc plus d'énergie quand les bâtiments sont sombres.

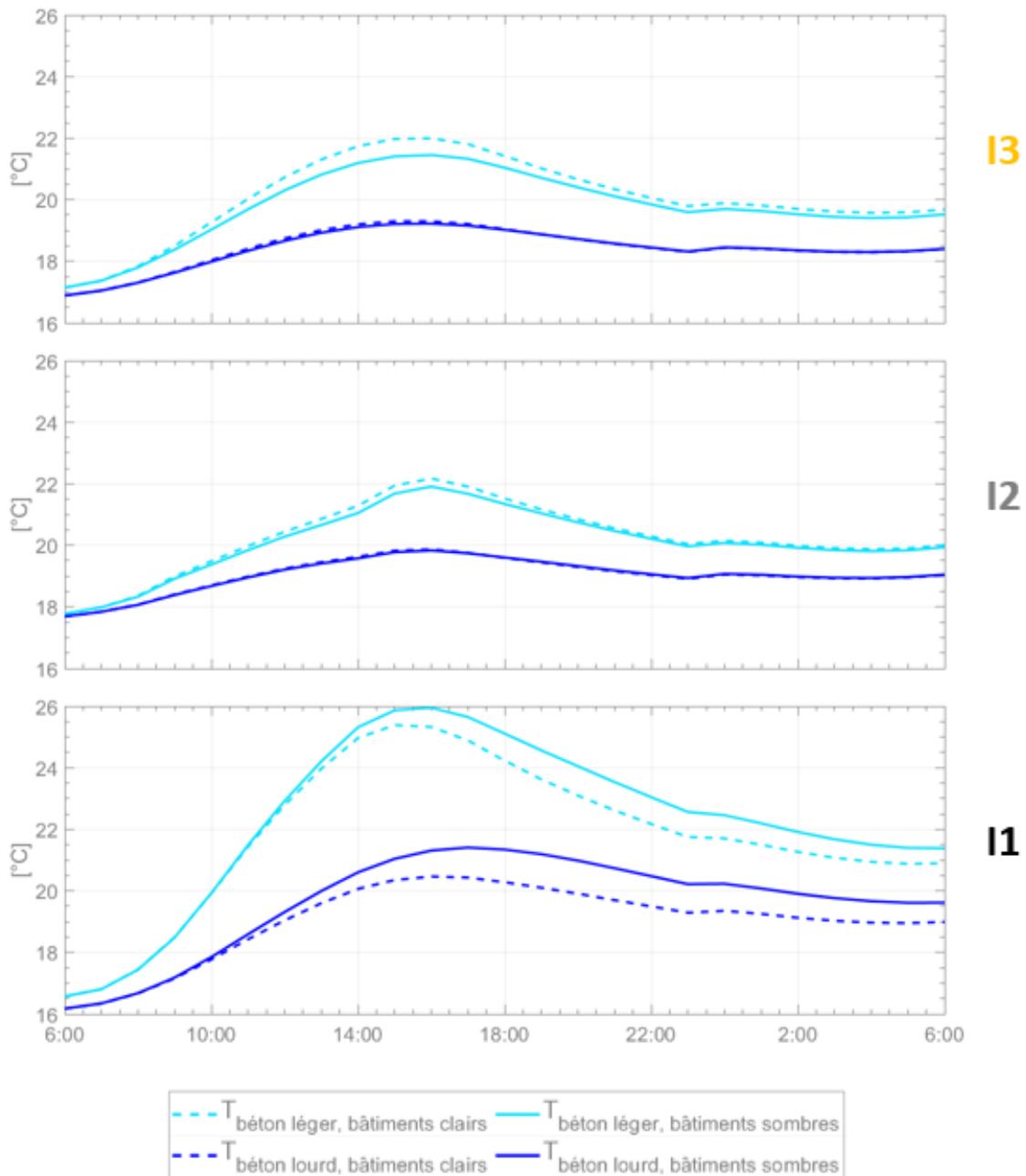


Figure 4.15 Température de l'air intérieur des trois appartements étudiés pour chaque modèle.

Pour les deux autres appartements (**I2** et **I3**), le changement de couleur n'a pas d'influence notable sur la température de l'air intérieur pour les bâtiments lourds. Pour les bâtiments légers, son influence est légère. Ce changement cause une diminution de la température de l'air des bâtiments légers de 0.3 K à 16 h pour **I2** et de 0.5 K à 17 h pour **I3**. On retrouve le même résultat que dans l'étude d'une rue théorique (chapitre 2 traitant de la méthode) avec des températures de l'air intérieur plus élevées lorsque les façades sont claires dans une rue canyon.

Finalement, pour un appartement exposé directement au soleil, les bâtiments sombres augmentent la température de l'air intérieur indépendamment de l'inertie thermique. En revanche, pour des appartements ombragés, leur influence est plutôt positive. Comme pour les températures de surface, la température de l'air intérieur des bâtiments légers est plus sensible au changement de couleur que celle des bâtiments lourds.

*

La Figure 4.16 montre la température moyenne radiante des trois points étudiés **P1**, **P2** et **P3** selon les quatre modèles. L'amplitude moyenne des quatre modèles est égale à **75 K**, **15.5 K** et **68 K** respectivement. Ces écarts proviennent du fait que les points **P1** et **P3** voient le soleil durant une partie de la journée alors que le point **P2** est toujours à l'ombre (Figure 4.17).

Pendant la journée, les bâtiments clairs causent des T_{mrt} plus élevées que les bâtiments sombres et les bâtiments légers donnent des T_{mrt} plus élevées que les bâtiments lourds pour les trois points. Cela provient du fait que les bâtiments clairs réfléchissent davantage le rayonnement en ondes courtes et que les bâtiments légers, ayant des températures de surface plus élevées que les bâtiments lourds, produisent un rayonnement en ondes longues plus important. Les trois points étudiés reçoivent respectivement **80 W**, **27 W** et **76 W** de plus avec des bâtiments clairs qu'avec des bâtiments sombres, à 14 h. Ils reçoivent **14 W**, **22 W** et **18 W** de plus avec des bâtiments légers qu'avec des bâtiments lourds. Pendant la journée, la T_{mrt} est

donc plus sensible au changement de couleur qu'au changement de propriétés thermiques des bâtiments.

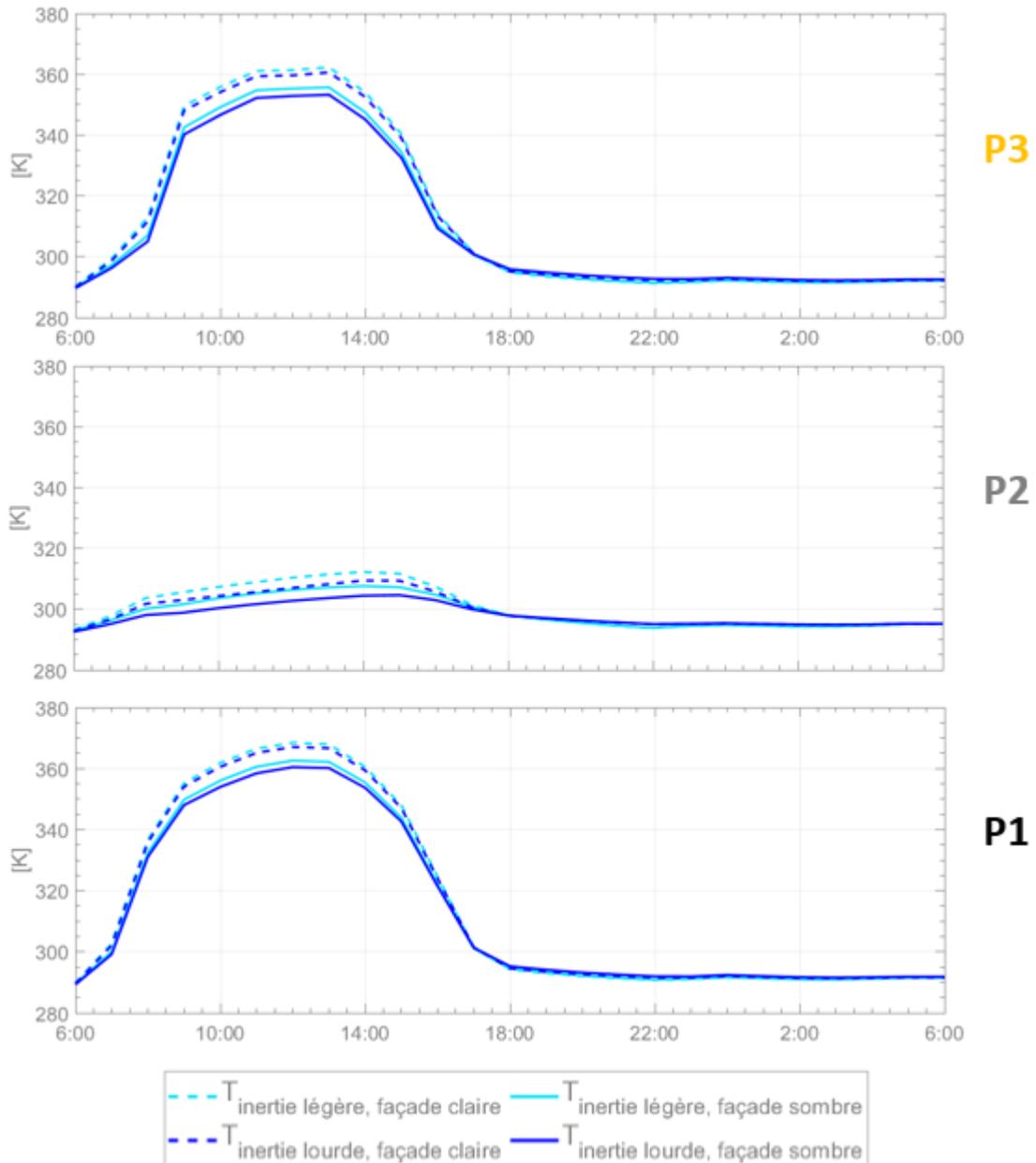


Figure 4.16 Température moyenne radiante des trois points étudiés pour chaque modèle.

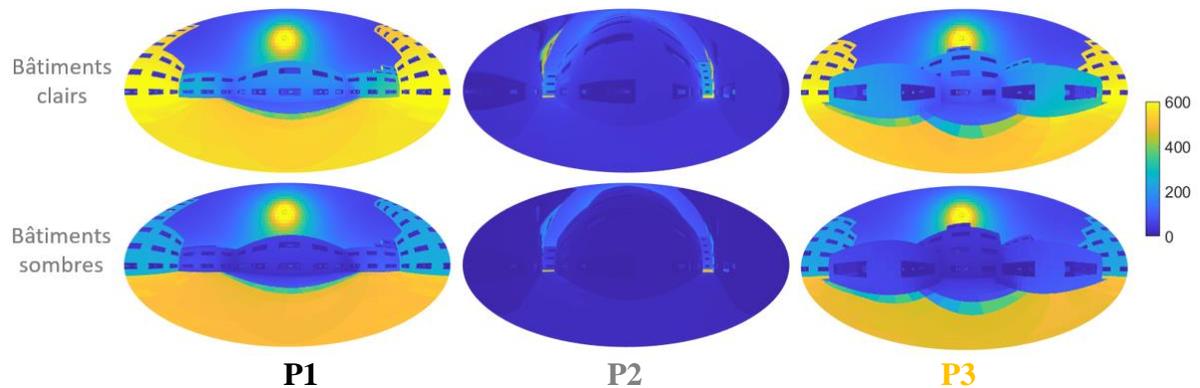


Figure 4.17 Irradiances en ondes courtes avec des bâtiments clairs (en haut) et sombres (en bas).

Pendant la nuit, les écarts de T_{mrt} diminuent entre les différents modèles. En fin de simulation, la T_{mrt} moyenne des modèles est égale à **291.6 K**, **295.2 K** et **292.2 K** pour les trois points. L'inconfort des piétons est donc plus grand dans la rue canyon que partout ailleurs dans le quartier avec, par exemple, une différence de 3 K entre la rue canyon et la place. Cela provient du fait que les surfaces de la rue canyon se rafraichissent moins par rayonnement en ondes longues vers le ciel que les autres surfaces du quartier.

La Figure 4.18 montre les différences maximales de la T_{mrt} entre les quatre modèles pour les trois points étudiés, pendant la journée et pendant la nuit.

Le changement d'inertie a plus d'influence dans la rue canyon (+ 3.4 K pendant la journée et - 1.2 K pendant la nuit pour **P2**) qu'ailleurs dans le quartier. Le changement de couleur a plus d'influence dans la zone des pavillons (en moyenne, + 7.2 K pendant la journée et - 0.55 K pendant la nuit pour **P3**) qu'ailleurs dans le quartier.

Finalement, la couleur des bâtiments a une plus grande influence sur la T_{mrt} que l'inertie thermique des bâtiments pendant la journée. En revanche pendant la nuit, c'est l'inertie thermique qui impacte plus la T_{mrt} .

Différences maximales de la T_{mrt} entre les quatre modèles

	P1	P2	P3	P1	P2	P3
	6h-18h			18h-6h		
Béton <i>léger clair</i> - Béton <i>lourd clair</i>	+ 1.4	+ 3.4	+ 1.7	- 0.7	- 1.2	- 1.0
Béton léger <i>clair</i> - Béton léger <i>sombre</i>	+ 5.9	+ 4.6	+ 7.0	- 0.3	- 0.1	- 0.4
Béton lourd <i>clair</i> - Béton lourd <i>sombre</i>	+ 6.7	+ 5.0	+ 7.4	- 0.7	- 0.1	- 0.7

Figure 4.18 Différences maximales de la T_{mrt} pour les trois points étudiés entre les modèles.

*

Discussion

L'influence de l'inertie thermique et de la couleur des bâtiments a été étudiée. L'inertie a plus d'influence sur le confort des habitants et la couleur a plus d'influence sur le confort des piétons.

Les résultats ont montré que, pour les appartements ensoleillés, les bâtiments lourds permettent de diminuer de 5 K la température de l'air intérieur et de 6.5 K la température des surfaces par rapport aux bâtiments légers. De plus, ils améliorent le confort des habitants de 2 K en moyenne par rapport aux bâtiments légers. Les bâtiments clairs pénalisent le confort des habitants dans les bâtiments de la rue canyon et de la zone des pavillons, alors qu'ils l'améliorent dans ceux de la tour.

Pendant la journée, les bâtiments clairs augmentent la T_{mrt} du quartier de 6 K en moyenne par rapport aux bâtiments sombres et les bâtiments légers l'augmentent de 2 K en moyenne par rapport aux bâtiments lourds. Pendant la nuit, les bâtiments sombres augmentent la T_{mrt} du quartier de 0.4 K en moyenne par rapport aux bâtiments clairs. Les bâtiments lourds l'augmentent de 1.4 K en moyenne par rapport aux bâtiments sombres.

Finalement, le confort des habitants est meilleur avec des bâtiments lourds et clairs dans la tour alors qu'il est meilleur avec des bâtiments lourds et sombres dans la rue canyon et dans la zone des pavillons. Le confort des piétons est quant à lui meilleur avec des bâtiments lourds et sombres partout dans le quartier. Les bâtiments légers et clairs donnent les plus mauvais résultats sur le confort des habitants et des piétons.

4.5 Réhabilitation énergétique du quartier

Dans cette section, on propose une réhabilitation énergétique du quartier idéalisé. Le modèle de référence est constitué de béton clair et léger. On propose d'augmenter l'inertie thermique dans des bâtiments choisis en fonction de l'ensoleillement. La couleur des bâtiments est modifiée en fonction de leur inertie thermique.

Les modifications sont faites en partant du rayonnement solaire reçu par les façades des bâtiments contenant les vitrages. La Figure 4.19 montre le rayonnement solaire absorbé dans le cas du quartier sombre, en cumulé sur toute la période d'étude. Les bâtiments sont classés en trois catégories. La première comprend les bâtiments qui absorbent plus de 2 000 Whm⁻² : les bâtiments de la place orientés au sud et du fond du quartier. La seconde contient les bâtiments qui absorbent entre 1 500 Whm⁻² et 2 000 Whm⁻² : les pavillons et les bâtiments aux extrémités est et ouest du quartier. La troisième comprend les bâtiments qui absorbent moins de 1 500 Whm⁻² : les bâtiments de la rue canyon.

D'après les résultats obtenus dans les études précédentes, l'inertie thermique élevée doit être placée en fonction de l'ensoleillement. Ainsi, les bâtiments les plus exposés au rayonnement en ondes courtes (première catégorie) sont changés en béton lourd. Lorsque ce béton lourd est exposé au rayonnement direct, la couleur sombre donne de meilleurs résultats sur le confort thermique des piétons car elle atténue les réflexions en ondes courtes. À l'inverse, elle pénalise le confort thermique des habitants. Néanmoins, le gain sur le confort des piétons est bien plus avantageux que la baisse du confort des habitants. Les bâtiments de la première catégorie sont donc modifiés avec du béton lourd et sombre. La couleur des bâtiments de la seconde catégorie est modifiée en mettant de la couleur sombre. Les bâtiments de la deuxième catégorie sont donc faits de béton léger de couleur sombre. Les bâtiments de la troisième catégorie sont inchangés et restent en béton léger et clair. La Figure 4.20 montre la composition de chaque bâtiment du quartier pour le nouveau modèle de simulation.

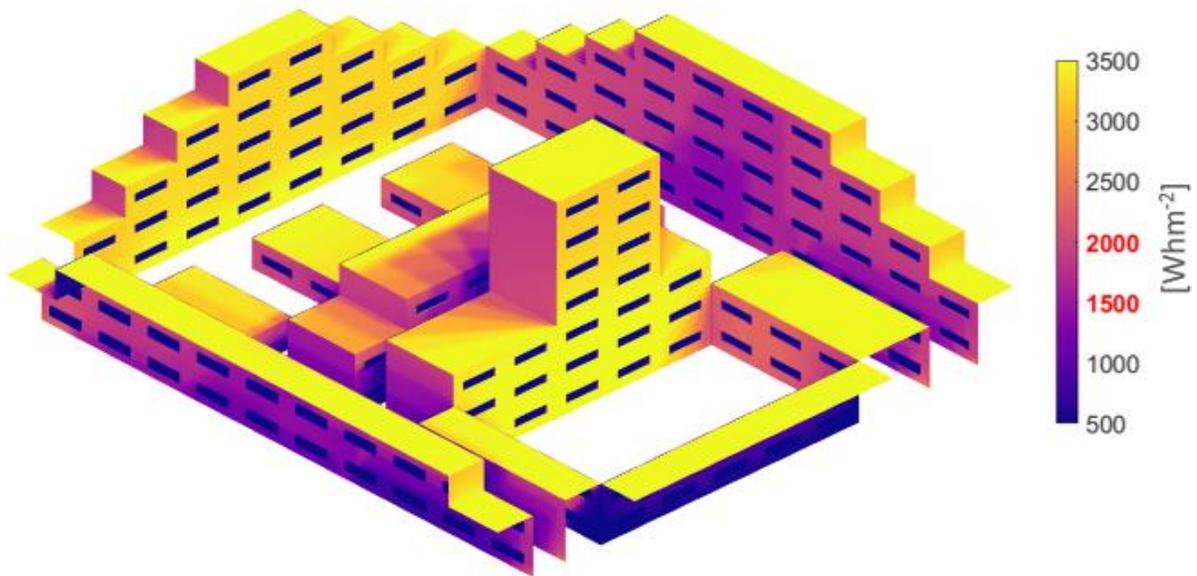


Figure 4.19 Irradiances absorbées cumulées en ondes courtes pour des bâtiments sombres.

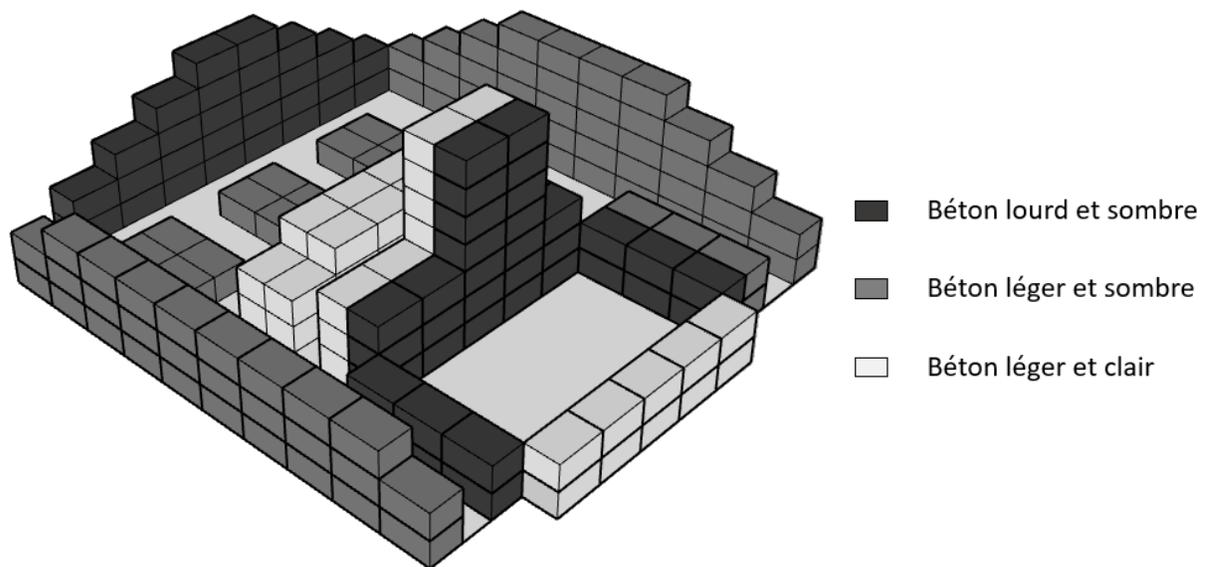


Figure 4.20 Composition des bâtiments du quartier pour le nouveau modèle.

La Figure 4.21 montre les irradiances absorbées en ondes courtes pour le modèle de référence et le nouveau modèle à 14 h. Les bâtiments les plus exposés au rayonnement direct du soleil absorbent plus d'énergie puisqu'ils sont de couleur sombre. On peut noter que le sol de la rue absorbe plus d'énergie dans le modèle de référence que dans le nouveau modèle, à cause des réflexions multiples entre les bâtiments clairs.

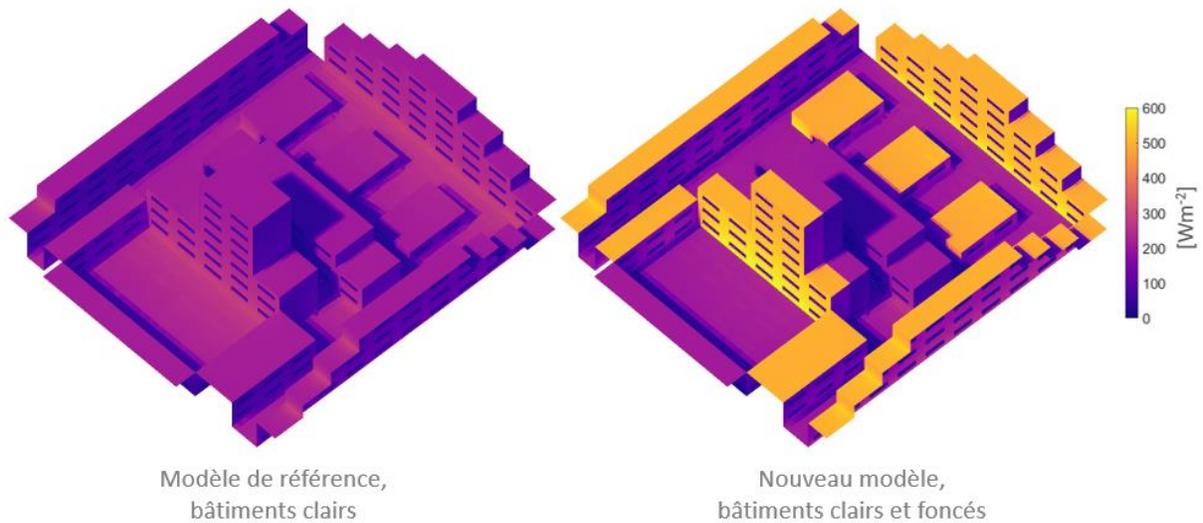


Figure 4.21 Irradiances absorbées en ondes courtes par le modèle de référence et le nouveau modèle à 14 h.

*

La Figure 4.22 montre les températures de surface des deux modèles à 14 h et à 4 h. Les bâtiments sont plus chauds avec le nouveau modèle qu'avec le modèle de référence. Cela provient du fait que les bâtiments sombres emmagasinent plus d'énergie que les bâtiments clairs pendant la journée et que les bâtiments lourds se rafraichissent moins vite que les bâtiments légers pendant la nuit. Pour les bâtiments ensoleillés, les bâtiments légers et clairs donnent des températures similaires aux bâtiments lourds et sombres pendant la journée. En

effet, les bâtiments de la tour orientée au sud sont 0.5 K plus chaud dans le nouveau modèle que dans le modèle de référence à 14 h. En revanche, pendant la nuit, les bâtiments lourds et sombres sont plus chauds de 4 K à 4 h que les bâtiments légers et clairs.

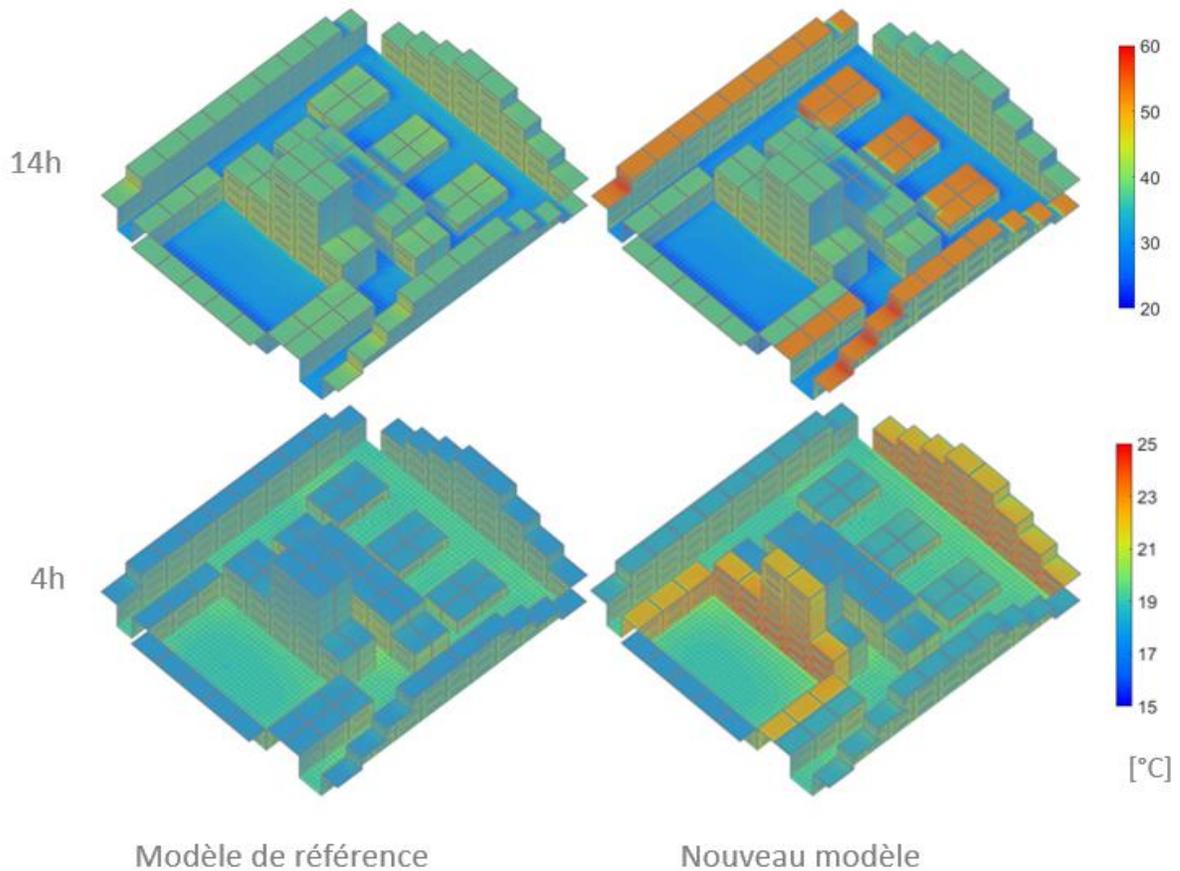


Figure 4.22 Températures des surfaces à 14 h et à 4h pour les deux modèles.

La Figure 4.23 montre les températures moyennes des surfaces des bâtiments pour l'ensemble des modèles étudiés. Par rapport au modèle de référence, la température moyenne des surfaces est plus élevée pendant la journée et plus basse pendant la nuit. Les écarts entre les deux restent limités avec une différence moyenne sur la période étudiée de 1.4 K. Le nouveau modèle permet d'avoir un équilibre entre les extremums de la journée et de la nuit.

Pendant la journée, la température moyenne des surfaces du nouveau modèle est plus faible que celle du modèle avec des bâtiments légers et sombres. Pendant la nuit, elle est plus faible que celle du modèle avec des bâtiments lourds et sombres.

Températures moyennes des surfaces (°C)

	10h	14h	18h	22h	4h
Béton léger clair (modèle de référence)	28.5	36.0	25.8	19.2	19.1
Béton léger sombre	33.0	42.8	27.6	19.6	19.3
Béton lourd clair	22.9	29.5	25.6	21.5	20.2
Béton lourd sombre	25.2	33.4	28.6	22.8	20.9
Mixte (nouveau modèle)	29.3	38.3	27.7	20.7	19.8

Figure 4.23 Températures moyennes des surfaces des bâtiments pour l'ensemble des modèles étudiés.

*

La Figure 4.24 montre les températures de l'air intérieur des trois appartements étudiés. Dans tous les cas, le nouveau modèle permet de diminuer la température de l'air intérieur. Pour l'appartement **I1** situé dans la tour, le passage du béton léger et clair au béton lourd et sombre diminue la température de l'air intérieur de 4.3 K au maximum. Pour l'appartement **I2**, il n'y a pas de changement, puisque les mêmes propriétés ont été utilisées pour les bâtiments de la rue canyon dans les deux modèles. Pour **I3**, le nouveau modèle permet de diminuer de 0.7 K au maximum la température de l'air intérieur, bien que les propriétés de l'appartement n'aient pas été modifiées entre les deux modèles. Cela provient du fait que la couleur des pavillons situés en face de cet appartement ainsi que les propriétés thermiques des bâtiments du fond du quartier orientés au sud ont été modifiées (passage du clair au sombre et du béton léger clair au béton lourd sombre respectivement).

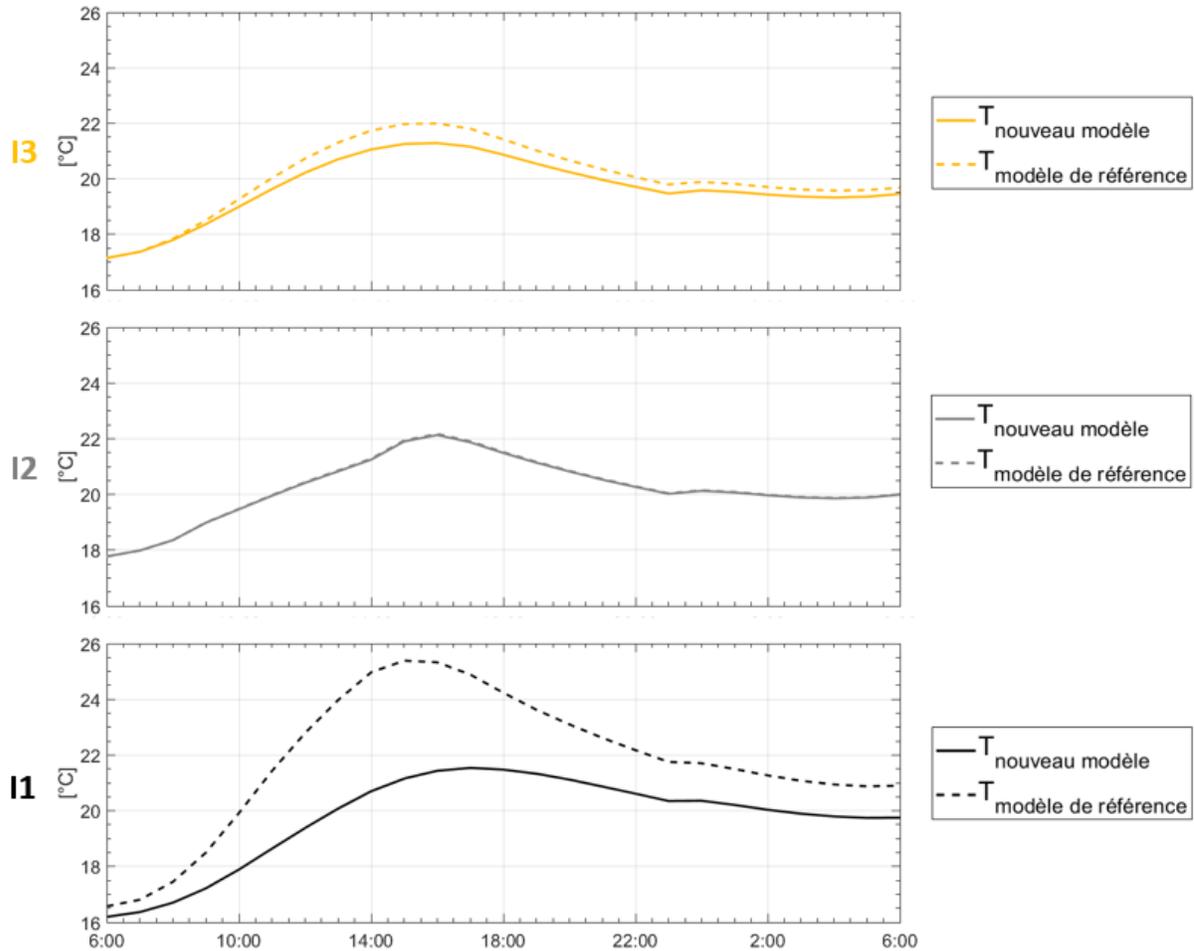


Figure 4.24 Températures de l'air intérieur des trois appartements étudiés.

*

La Figure 4.25 montre la T_{mrt} du quartier pour les deux modèles à 14 h. Le nouveau modèle permet de diminuer la T_{mrt} du quartier par rapport au modèle de référence. En effet, l'amplitude de la T_{mrt} du quartier est de 74 K dans le modèle de référence avec une $T_{mrt,max} = 383.6\text{ K}$ et une $T_{mrt,min} = 309.8\text{ K}$ alors qu'elle est de 65 K dans le nouveau modèle avec une

$T_{mrt,max} = 372.8 K$ et $T_{mrt,min} = 307.7 K$. Les zones les plus impactées sont les zones les plus ensoleillées avec une baisse de 11 K entre le modèle de référence et le nouveau modèle.

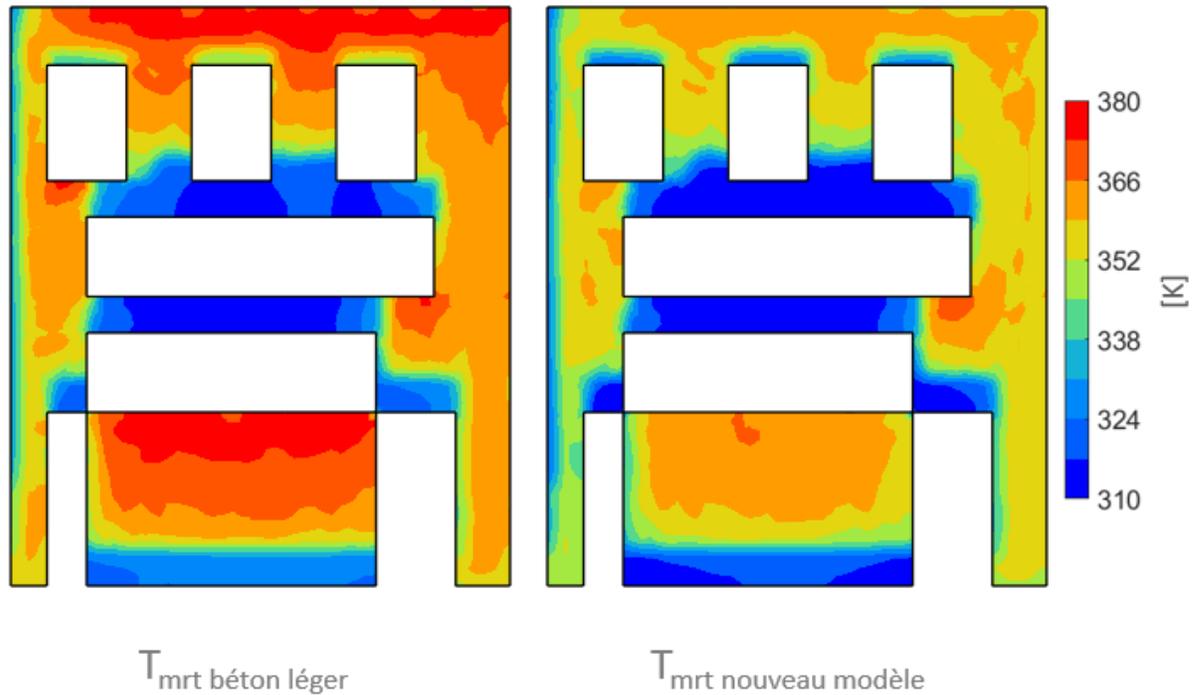


Figure 4.25 T_{mrt} du quartier pour les deux modèles à 14 h.

La Figure 4.26 montre la différence de T_{mrt} entre le nouveau modèle et le modèle de référence pour les trois points du quartier **P1**, **P2** et **P3**. Le nouveau modèle diminue la T_{mrt} pendant la journée et l'augmente pendant la nuit. Les plus grandes différences se trouvent pour les points ayant un facteur de vue du ciel plus grand. Pour les points **P1** et **P3**, la T_{mrt} baisse de 7 K pendant la journée et augmente de 1 K pendant la nuit. Pour le point **P2**, la T_{mrt} diminue légèrement entre les deux modèles, bien que les bâtiments de la rue canyon n'aient pas été modifiés. Cela provient du fait que le point **P2** voit une partie des bâtiments aux extrémités est et ouest du quartier qui eux ont changé de couleur et renvoient donc moins d'énergie sur ce point (Figure 4.3).

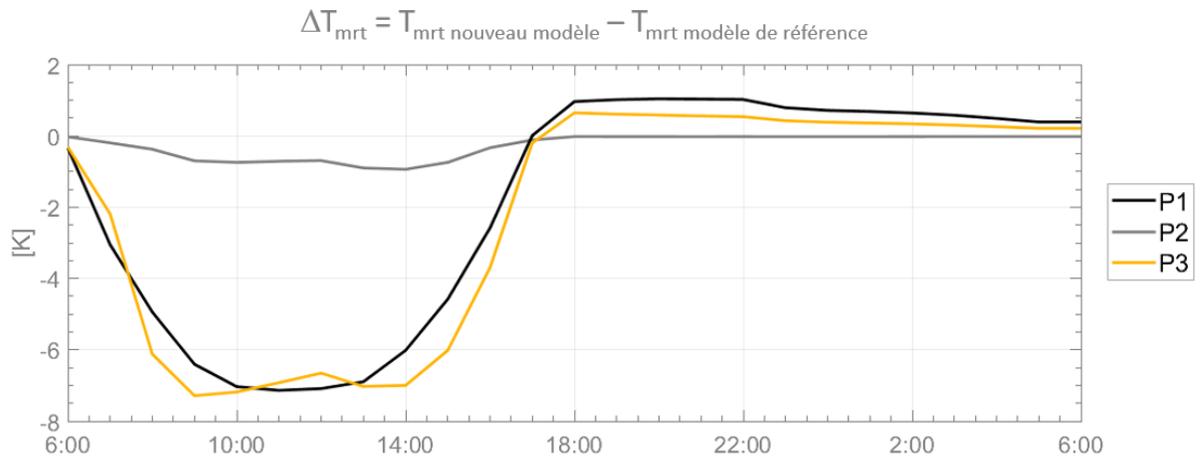


Figure 4.26 Différences de la T_{mrt} des points étudiés entre le nouveau modèle et le modèle de référence.

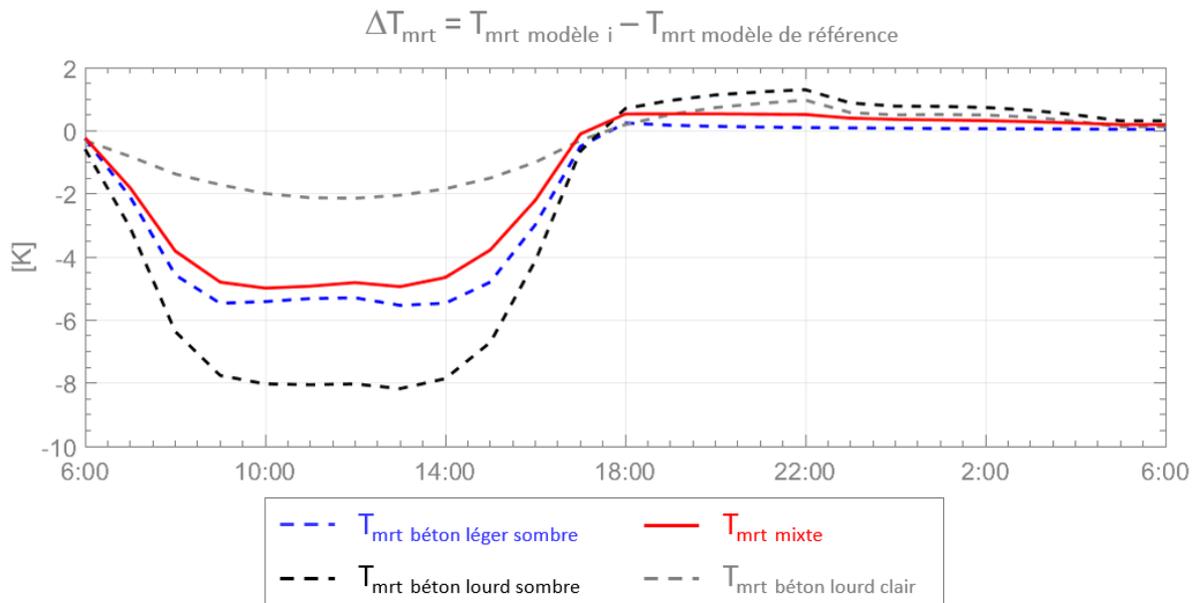


Figure 4.27 Différences de la T_{mrt} du quartier entre les différents modèles et le modèle de référence.

Enfin, la Figure 4.27 montre la différence de T_{mrt} moyenne du quartier entre les différents modèles étudiés et le modèle de référence. Pour l'ensemble des modèles, la T_{mrt} est plus faible que celle du modèle de référence pendant la journée et plus élevée pendant la nuit. Le modèle avec des bâtiments lourds et sombres est le modèle qui diminue le plus la T_{mrt} pendant la journée, mais c'est aussi le modèle qui l'augmente le plus pendant la nuit. Le nouveau modèle permet d'obtenir un équilibre entre amélioration du confort pendant la journée et limitation de l'inconfort pendant la nuit. Il permet d'avoir une T_{mrt} moyenne plus faible que les bâtiments sombres la journée et que les bâtiments lourds la nuit.

*

Discussion

Une réhabilitation énergétique du quartier idéalisé a été étudiée. Un nouveau modèle de simulation a été défini et comparé au modèle de référence. Ce dernier est composé de bâtiments légers et clairs. Le nouveau modèle est obtenu en modifiant le modèle de référence en augmentant l'inertie thermique des bâtiments avec des couleurs appropriées en fonction des trajets solaires.

Bien que les températures de surface du nouveau modèle soient supérieures à celles du modèle de référence, les indicateurs de confort sont améliorés. La température de l'air des trois appartements étudiés est diminuée de 0.7 K pour les appartements ombragés et de 4.3 K pour les appartements ensoleillés. La T_{mrt} est diminuée de 5 K pendant la journée et augmentée de 0.4 K pendant la nuit.

Parmi tous les modèles étudiés, ce nouveau modèle avec deux types d'inertie de deux couleurs différentes permet d'obtenir un équilibre : une T_{mrt} moyenne plus faible qu'avec les bâtiments sombres pendant la journée et qu'avec les bâtiments lourds pendant la nuit.

Répartir l'inertie thermique avec une couleur appropriée en fonction des trajets solaires permet donc de réduire les extremums des indicateurs de confort et ainsi d'améliorer simultanément le confort des habitants et des piétons.

4.6 Conclusions

Une étude thermique à l'échelle du quartier a été réalisée pour montrer l'influence de l'inertie thermique et de la couleur des bâtiments sur le confort des habitants et des piétons. Cette étude a été menée sur le modèle d'un quartier idéalisé de la ville de Cordoue comprenant un demi-million de degrés de liberté et 85 000 faces radiatives. Les temps de calcul sont raisonnables avec une demi-heure pour le calcul des facteurs de vue et une heure pour le calcul thermique.

La première étude comparative a montré l'influence de l'inertie thermique sur le comportement thermique du quartier. Le quartier composé de bâtiments lourds donne de meilleurs résultats que le quartier composé de bâtiments légers. Ils améliorent le confort des habitants pour l'ensemble du quartier, et encore plus pour les habitants des appartements exposés au rayonnement direct du soleil. Pendant la nuit, ils pénalisent le confort des piétons à cause de leur forte inertie thermique qui ne permet pas un rafraîchissement rapide lorsque les températures de l'air extérieur et du ciel diminuent. Le bilan entre l'amélioration du confort pendant la journée et sa diminution pendant la nuit est favorable aux bâtiments lourds.

La deuxième étude a montré l'influence de la couleur des bâtiments en relation avec l'inertie thermique. Cette dernière est plus importante pour le confort des habitants, alors que la couleur des bâtiments est plus importante pour le confort des piétons. Les bâtiments lourds et sombres donnent de meilleurs résultats pour les surfaces ensoleillées du quartier. Les bâtiments clairs pénalisent le confort des piétons à cause du rayonnement en ondes courtes réfléchi dans le quartier.

Après avoir mené ces deux études, une réhabilitation énergétique du quartier a été étudiée. Un nouveau modèle a été construit dans lequel l'inertie thermique avec une couleur appropriée a été positionnée en fonction de l'ensoleillement. Ce modèle a permis de trouver un

équilibre pour améliorer le confort des habitants et des piétons pendant la journée sans le pénaliser pendant la nuit.

Enfin, nos simulations ont permis de réaliser une étude de réhabilitation énergétique portant sur les aspects géométriques des phénomènes conductifs et radiatifs à une échelle plus grande que celle de la rue.

Conclusions et perspectives

Le confort thermique des piétons, l'îlot de chaleur urbain et les consommations énergétiques des bâtiments dépendent des interactions entre les bâtiments dues à l'action du soleil et de l'atmosphère : vent, ombrage, réflexions multiples, émission infrarouge. Leur étude nécessite de développer des outils pour quantifier précisément ces interactions en lien avec la géométrie de la scène.

Nous proposons un cadre de simulation basé sur la méthode des éléments finis pour le calcul précis des aspects conductifs et radiatifs. Il permet d'aborder différentes échelles (chambre, bâtiment, rue et quartier) et les principaux apports concernent la modélisation de la géométrie urbaine avec des maillages structurés, la prise en compte des transmissions directes et des réflexions spéculaires grâce aux facteurs de vue étendus, la représentation graphique des résultats et le calcul des quantités d'intérêt (température de l'air intérieur des bâtiments et température moyenne radiante).

Le maillage des modèles géométriques est conforme mais pas d'un seul tenant. Chaque bâtiment constitue un bloc conforme connecté aux autres par une méthode de collage de maillage. La modélisation des fenêtres est un élément clé de la définition des maillages du fait de leur faible épaisseur (6 mm). Des mailles de 5 cm de côté sont nécessaires pour obtenir une température de vitrage correcte et ainsi éviter les artefacts. Pour les autres éléments des bâtiments, des mailles de 50 cm de côté sont suffisantes et trois éléments dans les épaisseurs des parois sont nécessaires pour obtenir la convergence des résultats.

Les conditions aux limites du rayonnement en ondes courtes dont les sources sont le ciel et le soleil et en ondes longues du ciel sont déterminées en dehors du solveur éléments finis. Les irradiances de la peau du modèle sont calculées en utilisant la méthode de radiativité. Les facteurs de vue entre le maillage surfacique de l'environnement bâti et les carreaux de ciel sont remplacés par les facteurs de vue étendus qui permettent de prendre en compte la transmittance directe et la réflexion spéculaire. Pour l'ensemble du spectre, les faces opaques sont

considérées comme parfaitement diffuses et les vitrages comme parfaitement spéculaires. Le rayonnement en ondes longues des éléments de l'environnement bâti est calculé dans le solveur éléments finis à chaque pas de temps. Le modèle radiatif de Cast3M est modifié pour introduire sous forme de matrice creuse les facteurs de vue étendus calculés en amont. Cela permet de surmonter les limitations du nombre de faces et de prendre en compte la réflexion spéculaire dans le spectre ondes longues.

Les deux applications présentées ici, illustrent l'intérêt de notre méthode pour étudier des solutions basées sur les aspects conductifs et radiatifs et montrent bien la relation entre la géométrie, le rayonnement et l'inertie thermique.

La première application se concentre sur l'étude thermique d'une rue de Bayonne représentée par un modèle géométrique à haut niveau de détail. La comparaison des résultats simulés avec ceux d'une campagne de mesures a permis de valider le modèle, les hypothèses relatives aux usages des habitants (chauffage) et les propriétés thermiques des matériaux des bâtiments. Les thermographies mesurées et simulées ont donné des résultats cohérents avec des différences inférieures à 2 K pour toute la durée de l'étude (Figure 3.21). Le soin porté à la définition de la géométrie, aux conditions aux limites et au post-traitement des résultats, couplé avec les corrections apportées aux images thermographiques, aboutit à des analyses fines du comportement thermique de la rue. L'analyse de l'environnement intérieur des bâtiments a donné de très bons résultats. Grâce à la définition du nœud virtuel intérieur, les différences entre la température de l'air simulée et mesurée sont toujours inférieures à 0.2 K.

De plus, l'étude de l'influence du mode de réflexion des façades a montré qu'il serait intéressant d'introduire une troisième bande spectrale (infrarouge proche) dans les simulations. Il semble que dans cette bande spectrale la réflexion des matériaux de la rue soit plutôt spéculaire. En revanche, l'impact de la réflexion spéculaire en ondes longues est limité dans le cas de cette rue (matériaux proches d'un corps noir et piégeage du rayonnement).

Enfin, l'étude de l'influence d'une isolation par l'extérieur dans la rue a montré, comme attendu, qu'elle réduit les ponts thermiques en façade mais que sa faible inertie thermique

engendre une plus grande amplitude des températures de surface que les murs de façade (différence maximale de - 0.9 K pendant la nuit et 1.3 K pendant la journée). Cela entraîne une variation dans la température moyenne radiante et pénalise le confort des piétons (+ 0.4 K en milieu de journée).

La seconde application porte sur l'étude d'un quartier idéalisé de Cordoue. Elle a pour objectif de montrer l'influence de l'inertie thermique et de la couleur des bâtiments sur le confort des habitants et des piétons. Le quartier composé de bâtiments lourds améliore le confort des habitants pour l'ensemble du quartier et d'autant plus pour les appartements exposés au rayonnement direct du soleil. La couleur des bâtiments est plus importante pour le confort des piétons alors que l'inertie thermique est plus importante pour le confort des habitants. Les bâtiments clairs pénalisent le confort des piétons à cause du rayonnement en ondes courtes réfléchi dans le quartier.

L'étude d'une réhabilitation énergétique du quartier dans lequel l'inertie thermique avec une couleur appropriée a été placée en fonction de l'ensoleillement a montré que les bâtiments lourds et sombres devraient être placés dans les zones les plus exposées au rayonnement direct du soleil. Cela permet de trouver un équilibre afin d'améliorer le confort thermique du quartier pendant la journée sans le pénaliser pendant la nuit. Ce résultat montre tout l'intérêt de considérer la géométrie dans l'étude de différents scénarios (Figure 4.25).

Dans cette thèse, nous avons étudié des modèles de complexité géométrique croissante jusqu'à un modèle à plus de 500 000 degrés de liberté et 85 000 faces radiatives pour un quartier idéal. Les temps de calcul pour une simulation complète sont raisonnables (1 h 30 au maximum). Le cadre de simulation proposé permet de mener des études à différentes échelles en adaptant la finesse des modèles. Il est possible de modéliser différentes propriétés thermiques et optiques des matériaux indépendamment du spectre considéré.

L'étude couplée des phénomènes conductifs et radiatifs est indispensable pour comprendre les échanges dans l'environnement urbain. Le rayonnement solaire doit être calculé de manière

très précise car les quantités d'énergie mises en jeu ont une influence majeure sur le confort des habitants et des piétons. Le rayonnement en ondes longues entre l'environnement bâti et le ciel est primordial pour le rafraîchissement nocturne des bâtiments. Les échanges en ondes longues entre les éléments de l'environnement bâti doivent être pris en compte aussi bien à l'extérieur des bâtiments qu'à l'intérieur. Ces échanges homogénéisent l'ensemble des températures de surface. L'inertie thermique des bâtiments tient une place importante dans les échanges thermiques entre les bâtiments urbains. Sa répartition en fonction de l'ensoleillement permettrait d'améliorer le confort des scènes urbaines.

Les travaux de cette thèse montrent que la méthode des éléments finis permet d'appréhender les différents problèmes thermiques de la physique urbaine et conduit à une analyse fine des quantités d'intérêt liées aux phénomènes conductifs et radiatifs. Ils montrent aussi que les éléments finis peuvent être utilisés comme outils de conception dans les projets de constructions et de réhabilitations.

*

Perspectives

La perspective la plus intéressante serait de couvrir une année complète dans la simulation thermique d'un quartier de ville. Pour rendre une telle simulation possible, les tâches principales sont :

- 1) vérifier la structure de la chaîne de programmes : préprocesseur géométrique, lancer de rayons performant (Embree), Cast3M et post-traitement ;
- 2) vérifier l'utilisation optimale de la mémoire, en particulier les entrées/sorties de Cast3M (c'est toujours un problème en dynamique) ;
- 3) examiner la possibilité de condenser les parties linéaires par technique de super éléments ;
- 4) optimiser la finesse des maillages selon les endroits étudiés ;
- 5) vérifier que les paramètres d'exécution des programmes sont bien adaptés à la configuration du matériel informatique.

Ce sont des tâches habituelles pour la communauté des éléments finis, mais absolument nouvelles dans le domaine de la physique urbaine. Des simulations annuelles ainsi réalisées pourraient apporter des résultats extrêmement utiles pour réorienter la pensée urbaine. Partout dans le monde, il faut densifier les villes, car les espaces voués à l'agriculture et ceux de la vie sauvage doivent être préservés. Faut-il continuer à produire des bâtiments légers, de verre et d'acier, tels que les a promus le style international de la seconde moitié du siècle passé, ou vaudrait-il mieux revenir aux bâtiments un peu moins hauts, plus lourds et plus opaques de la période précédente ? Manhattan de verre ou Manhattan de brique ? Seules des études précises, avec des quantifications indiscutables, pourront convaincre les politiques et les futurs habitants de changer de paradigme urbain, et de repartir sur de meilleures fondations. Nous espérons avoir montré que les éléments finis pourront fournir l'outil nécessaire pour appuyer une telle démarche.

Bibliographie

A

- [Acuña Paz y Miño 2018] Acuña Paz y Miño J., Lefort, V., Lawrence, C. and Beckers, B., 2018. Maquette Numérique d'une rue du vieux Bayonne pour son étude thermique par éléments finis. In *À la pointe du BIM: Ingénierie et architecture, enseignement et recherche*, (ed. Eyrolles). p. 103–115.
- [Acuña Paz y Miño 2020a] Acuña Paz y Miño J., 2020. Application des méthodes d'imagerie au rayonnement dans les scènes urbaines. Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Soutenue le 4 décembre 2020.
- [Acuña Paz y Miño 2020b] Acuña Paz y Miño J., Lawrence, C. and Beckers, B., 2020. Visual metering of the urban radiative environment through 4π imagery. *Infrared Physics & Technology*, 110, p.103463.
- [Acuña Paz y Miño 2021] Acuña Paz y Miño J., Duport, N., Beckers, B. 2021. Pixel-by-pixel rectification of urban perspective thermography. *Remote Sensing of Environment*, 266, p112689.
- [Aguerre 2017] Aguerre J.P., Fernández E., Besuievsky G. and Beckers B., 2017. Computing urban radiation: A sparse matrix approach. *Graphical Models*, 91, pp.1-11.
- [Aguerre 2019] Aguerre J.P., Nahon, R., Garcia-Nevado, E., La Borderie, C., Fernández, E. and Beckers, B., 2019. A street in perspective: Thermography simulated by the finite element method. *Building and Environment*, 148, pp.225-239.
- [Aguerre 2020a] Aguerre J.P., 2020. Radiation techniques for urban thermal simulation with the Finite Element Method. PhD, Universidad de la Republica. Montevideo, Uruguay.
- [Aguerre 2020b] Aguerre J.P., García-Nevado E., Acuña Paz y Miño J., Fernández E. and Beckers B., 2020, September. Physically Based Simulation and Rendering of Urban Thermography. In *Computer Graphics Forum* (Vol. 39, No. 6, pp. 377-391).

- [Ångström 1915] Ångström A.K., 1915. A study of the radiation of the atmosphere: based upon observations of the nocturnal radiation during expeditions to Algeria and to California (Vol. 65). Smithsonian Institution.
- [ASHRAE 2001] ASHRAE, 2001. International Weather for Energy Calculations (IWEC Weather Files) User's Manual.
- [ASHRAE 2017] ASHRAE Fundamentals Handbook 2017, SI edition, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA.

B

- [Barreira 2012] Barreira E., De Freitas, V.P., Delgado, J.M.P.Q. and Ramos, N.M.M., 2012. Thermography applications in the study of buildings hygrothermal behaviour. Infrared thermography, pp.171-192.
- [Beckers 2009] Beckers B. and Masset L., 2009. Heliodon2TM software and user's guide, <http://heliodon.net/>, 2003- 2009.
- [Beckers 2010a] Beckers B. and Beckers, P., 2010. Les anomalies, l'équation de Kepler, la position du soleil. (http://www.heliodon.net/downloads/Beckers_2010_Helio_006_fr_2.pdf)
- [Beckers 2010b] Beckers B., Rodríguez, D., Antaluca, E. and Batoz, J.L., 2010, November. About solar energy simulation in the urban framework: The model of Compiegne. In 3rd International Congress Bauhaus SOLAR (pp. 10-11).
- [Beckers 2011] Beckers B. and Beckers, P., 2011. Calcul du rayonnement solaire atténué par l'atmosphère. Rapport Helio_008_fr.
- [Beckers 2012] 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.
- [Beckers 2013] Beckers B., 2013. Taking advantage of low radiative coupling in 3D urban models. In Proceedings of the Eurographics Workshop on Urban Data Modelling and Visualisation (pp. 17-20).

- [Beckers 2014] Beckers B. and Beckers P., 2014. Reconciliation of geometry and perception in radiation physics. Wiley-ISTE.
- [Beckers 2016] Beckers B., 2016. Multiscale analysis as a central component of urban physics modeling. In *Computational Methods for Solids and Fluids* (pp. 1-27). Springer, Cham.
- [Beckers 2019a] Beckers B., 2019. Five Lectures on Finite Element Method Applied to Heat Transfer. www.heliodon.net
- [Beckers 2019b] Beckers B., Aguerre, J.P., Besuievsky, G., Fernández, E., Nevado, E.G., Laborderie, C. and Nahon, R., 2019. Visualizing the infrared response of an urban canyon throughout a sunny day. In *Sustainable Building for a Cleaner Environment* (pp. 277-284). Springer, Cham.
- [Bedford 1934] Bedford T. and Warner, C.G., 1934. The globe thermometer in studies of heating and ventilation. *Epidemiology & Infection*, 34(4), pp.458-473.
- [Berdahl 1982] Berdahl P. and Fromberg, R., 1982. The thermal radiance of clear skies. *Solar energy*, 29(4), pp.299-314.
- [Berdahl 1984] Berdahl P. and Martin, M., 1984. Emissivity of clear skies. *Solar Energy*, 32(5), pp.663-664.
- [Bliss 1961] Bliss Jr R.W., 1961. Atmospheric radiation near the surface of the ground: a summary for engineers. *Solar Energy*, 5(3), pp.103-120.
- [Blocken 2015] Blocken B., 2015. Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. *Building and Environment*, 91, pp.219-245.
- [Bugeat 2020] Bugeat A., 2020. Développement d'une méthode de radiosité pour l'étude du rayonnement solaire en milieu urbain (Doctoral dissertation, Université de Pau et des Pays de l'Adour).
- [Bulik 1997] Bulik M., Coulon N. 1997. Modélisation du rayonnement thermique dans Castem2000. SEMT/TTMF/RT 97-142, CEA.

- [Christen 2012] Christen A., Meier, F. and Scherer, D., 2012. High-frequency fluctuations of surface temperatures in an urban environment. *Theoretical and Applied Climatology*, 108(1), pp.301-324.
- [Clark 1978] Clark G. and Allen, C., 1978, March. The estimation of atmospheric radiation for clear and cloudy skies. In *Proc. 2nd National Passive Solar Conference (AS/ISES)* (pp. 675-678).
- [Cohen 1985] Cohen M.F. and Greenberg D.P., 1985. The hemi-cube: A radiosity solution for complex environments. *ACM Siggraph Computer Graphics*, 19(3), pp.31-40.
- [Coons 1967] Coons S.A., 1967. Surfaces for computer-aided design of space forms. Report MIT MAC-TR-41.
- [Coulon 2006] Coulon N., 2006. Nouvel algorithme pour traiter le rayonnement thermique en milieu transparent dans CAST3M. Rapport DM2S SFME/LTMF/RT/06-009/A, 2006.
- [Crawley 1999] Crawley D.B., Hand J.W. and Lawrie L.K., 1999, September. Improving the weather information available to simulation programs. In *Proceedings of Building Simulation'99* (Vol. 2, pp. 529-536).
- [CSTB 2012] CSTB 2012. Règles Th-u – Fascicule 4 : Parois Opaques, CSTB Editions.

D

- [Dorer 2013] Dorer V., Allegrini, J., Orehounig, K., Moonen, P., Upadhyay, G., Kämpf, J. and Carmeliet, J., 2013. Modelling the urban microclimate and its impact on the energy demand of buildings and building clusters. *Proceedings of BS, 2013*, pp.3483-3489.
- [Duport 2019] Duport N., Acuña Paz y Miño, J., & Beckers, B., 2019. Handling 3D Model for Urban Thermal Study with the Finite Element Method. *In Proceedings of BS2019: 16th IBPSA Building Simulation Conference, Rome, Italy, 2 - 4 September*.

E

- [Erell 2014] Erell E., Pearlmutter, D., Boneh, D. and Kutiel, P.B., 2014. Effect of high-albedo materials on pedestrian heat stress in urban street canyons. *Urban Climate*, 10, pp.367-386.
- [Evangelisti 2019] Evangelisti L., Guattari, C. and Asdrubali, F., 2019. On the sky temperature models and their influence on buildings energy performance: A critical review. *Energy and Buildings*, 183, pp.607-625.
- [Evins 2014] Evins R., Dorer, V. and Carmeliet, J., 2014. Simulating external longwave radiation exchange for buildings. *Energy and Buildings*, 75, pp.472-482.

F

- [Fanger 1972] Fanger P.O., 1972. Thermal comfort, analysis and application in environmental engineering.
- [Fernández 2014] Fernández E. and Besuievsky, G., 2014. A sample-based method for computing the radiosity inverse matrix. *Computers & graphics*, 41, pp.1-12.

G

- [García-Nevado 2019a] García-Nevado E., Roura, H.C. and Beckers, B., 2019, November. The use of thermography to highlight the relationship between air and surface temperatures in urban scenes. In *Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1343, No. 1, p. 012018)*. IOP Publishing.
- [García-Nevado 2019b] García-Nevado E., 2019. Termografía del cañón urbano: uso de la perspectiva para una evaluación térmica global de la calle. *Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña*.
- [García-Nevado 2021] García-Nevado E., Duport N., Bugeat A. and Beckers B., 2021. Benefits of street sun sails to limit building cooling needs in a Mediterranean city. *Building and Environment*, 187, p.107403.

- [Gebhart 1961] Gebhart B., 1961. Surface temperature calculations in radiant surroundings of arbitrary complexity—for gray, diffuse radiation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 3(4), pp.341-346.
- [Ghandehari 2018] Ghandehari M., Emig, T. and Aghamohamadnia, M., 2018. Surface temperatures in New York City: Geospatial data enables the accurate prediction of radiative heat transfer. *Scientific reports*, 8(1), pp.1-10.
- [Givoni 1985] Givoni B. and Katz L., 1985. Earth temperatures and underground buildings. *Energy and Buildings*, 8(1), pp.15-25.
- [Goral 1984] 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.

H

- [Ho-Le 1988] Ho-Le K., 1988. Finite element mesh generation methods: a review and classification. *Computer-aided design*, 20(1), pp.27-38.
- [Howard 1833] Howard L., 1833: *The Climate of London*, Vols.I-III, Harvey and Dalton, London.
- [Howell 1969] Howell J.R., Siegel, R. and Mengüç, M.P., 1969. Thermal radiation heat transfer. National Aeronautics and Space Administration.

K

- [Kajiya 1986] Kajiya J.T., 1986, August. The rendering equation. In *Proceedings of the 13th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (pp. 143-150).
- [Kawai 2014] Kawai H., Asawa, T., Saito, R. and Sato, R., 2014. Numerical study: How does a high-rise building affect the surrounding thermal environment by its shading. In *30th International PLEA Conference*, CEPT University, Ahmedabad.

[Kylili 2014] Kylili A., Fokaides, P.A., Christou, P. and Kalogirou, S.A., 2014. Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review. *Applied Energy*, 134, pp.531-549.

L

[Lagouarde 2010] Lagouarde J.P., Hénon, A., Kurz, B., Moreau, P., Irvine, M., Voogt, J. and Mestayer, P., 2010. Modelling daytime thermal infrared directional anisotropy over Toulouse city centre. *Remote Sensing of Environment*, 114(1), pp.87-105.

[Lapaine 2011] Lapaine M., 2011. Mollweide map projection. *KoG*, 15(15.), pp.7-16.

[Le Fichoux 2011] Le Fichoux E., 2011. Présentation et utilisation de cast3m. ENSTA-LME (<http://www.cast3m.cea.fr>).

[Lee 1971] Lee H.P., 1971. Structural-Thermal-Optical Program (STOP), NASA-GSFC 1970 Science and Technology Review. NASA-Goddard Space Flight Center, January, pp.13-14.

[Lee 1972] Lee H.P., 1972, April. Application of finite-element method in the computation of temperature with emphasis on radiative exchanges. In 7th Thermophysics Conference (p. 274).

[Lee 1975] Lee H.P. and Jackson Jr, C.E., 1975. Finite-element solution for a combined radiative-conductive analysis with mixed diffuse-specular surface characteristics.[of spaceborne telescope].

[Lewis 2004] Lewis R.W., Nithiarasu, P. and Seetharamu, K.N., 2004. Fundamentals of the finite element method for heat and fluid flow. John Wiley & Sons.

[Lindberg 2008] Lindberg F., Holmer, B. and Thorsson, S., 2008. SOLWEIG 1.0—Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. *International journal of biometeorology*, 52(7), pp.697-713.

[Liu and Jordan 1960] Liu B.Y. and Jordan, R.C., 1960. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar energy*, 4(3), pp.1-19.

[Lo 2014] Lo D.S., 2014. Finite element mesh generation. CRC Press.

M

- [Martin 1984a] Martin M. and Berdahl P., 1984. Summary of results for the spectral and angular sky radiation measurement program. *Solar Energy*, 33(3), pp.241-252.
- [Martin 1984b] Martin M. and Berdahl P., 1984. Characteristics of infrared sky radiation in the United States. *Solar energy*, 33(3-4), pp.321-336.
- [Merlier 2017] Merlier L., Frayssinet, L., Kuznik, F., Rusaouën, G., Johannes, K., Hubert, J.L. and Milliez, M., 2017. Analysis of the (urban) microclimate effects on the building energy behaviour. In *Proceedings of the 15th IBPSA Conference San Francisco, CA, USA*.
- [Mirsadeghi 2013] Mirsadeghi M., Costola D., Blocken B. and Hensen J.L., 2013. Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy simulation programs: Implementation and uncertainty. *Applied Thermal Engineering*, 56(1-2), pp.134-151.
- [Morrison 2021] Morrison W., Kotthaus, S. and Grimmond, S., 2021. Urban surface temperature observations from ground-based thermography: intra-and inter-facet variability. *Urban Climate*, 35, p.100748.

N

- [Nicodemus 1965] Nicodemus F.E., 1965. Directional reflectance and emissivity of an opaque surface. *Applied optics*, 4(7), pp.767-775.
- [Nikolopoulou 2004] Nikolopoulou M., 2004. Outdoor comfort. *Environmental diversity in architecture*, 101.
- [Nishita 1985] Nishita T. and Nakamae, E., 1985. Continuous tone representation of three-dimensional objects taking account of shadows and interreflection. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 19(3), pp.23-30.

O

[Oke 1982] Oke T.R., 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), pp.1-24.

P

[Péniguel 2004] Péniguel C. and Rupp, A., 2004. *Syrthes 3.4—manuel théorique*. EDF R&D, Paris, France.

[Perez 1993] 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.

Q

[Quiroz 1995] Quiroz L. and Beckers P., 1995. Non-conforming mesh gluing in the finite elements method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 38(13), pp.2165-2184.

R

[Richardson 1969] Richardson P.D. and Shum, Y.M., 1969. Use of finite element methods in solution of transient heat conduction problems. *American Society of Mechanical Engineers*.

[Rupp 1997] Rupp I. and Péniguel C., 1997. Coupling heat conduction and radiation and convection phenomena in complex 2D and 3D geometries. UK Swansea.

S

- [Saad 2003] Saad Y., 2003. Iterative methods for sparse linear systems. SIAM.
- [Sarralde 2015] Sarralde J.J., Quinn, D.J., Wiesmann, D. and Steemers, K., 2015. Solar energy and urban morphology: Scenarios for increasing the renewable energy potential of neighborhoods in London. *Renewable energy*, 73, pp.10-17.
- [Schlick 1994] 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 1989] 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).
- [Sillion 1994] Sillion F.X. and Puech C., 1994. Radiosity and global illumination. San Francisco: Morgan Kaufmann.
- [Sobstyl 2018] Sobstyl J.M., Emig, T., Qomi, M.A., Ulm, F.J. and Pellenq, R.M., 2018. Role of city texture in urban heat islands at night-time. *Physical review letters*, 120(10), p.108701.

T

- [Taleghani 2015] Taleghani M., Kleerekoper, L., Tenpierik, M. and Van Den Dobbelsteen, A., 2015. Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands. *Building and environment*, 83, pp.65-78.
- [Tamura 2001] Tamura T., Hoyano, A., Aoki, H. and Asano, K., 2001, March. Developing the capturing system of spherical thermograph and applications to built environment. In *Thermosense XXIII* (Vol. 4360, pp. 169-176). International Society for Optics and Photonics.
- [Thomas 2014] Thomas D., Miller, C., Kämpf, J. and Schlueter, A., 2014. Multiscale co-simulation of EnergyPlus and CitySim models derived from a building information model. In *Bausim 2014: Fifth German-Austrian IBPSA Conference* (pp. 469-476).

[Thorsson 2007] Thorsson S., Lindberg, F., Eliasson, I. and Holmer, B., 2007. Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 27(14), pp.1983-1993.

V

[van Eekelen 2013] van Eekelen T., 2013. Radiation modeling using the finite element method. *Solar Energy at Urban Scale*, pp.237-257.

[Vernon 1932] Vernon H.M., 1932. The measurement of radiant heat in relation to human comfort. *Journal of Industrial Hygiene*, 14, pp.95-111.

W

[Wald 2014] Wald I., Woop S., Benthin C., Johnson G.S. and Ernst M., 2014. Embree: a kernel framework for efficient CPU ray tracing. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 33(4), pp.1-8.

[Ward 1994] Ward G.J., 1994, July. The RADIANCE lighting simulation and rendering system. In *Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (pp. 459-472).

Y

[Yang 2012] Yang X., Zhao, L., Bruse, M. and Meng, Q., 2012. An integrated simulation method for building energy performance assessment in urban environments. *Energy and buildings*, 54, pp.243-251.

Z

[Zeyghami 2018] Zeyghami M., Goswami, D.Y. and Stefanakos, E., 2018. A review of clear sky radiative cooling developments and applications in renewable power systems and passive building cooling. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 178, pp.115-128.

[Zienkiewicz 1965] Zienkiewicz O.C. and Cheung, Y.K., 1965. Finite elements in the solution of field problems, *The Engineer*, 220, 507-510.

Listes des figures et tableaux

Liste des figures

Figure 1.1 Globe noir [Bedford 1934].	9
Figure 2.1 Numérotation des nœuds et des éléments du maillage.	12
Figure 2.2 Températures imposées produisant un gradient vertical constant.	13
Figure 2.3 Température imposée sur une partie des bords horizontaux.	15
Figure 2.4 Pont thermique.	16
Figure 2.5 Isolant thermique.	17
Figure 2.6 Flux imposé sur le bord vertical de gauche et température imposée sur le bord horizontal inférieur.	18
Figure 2.7 Numérotation des nœuds et des éléments du maillage d'une cavité 2D.	19
Figure 2.8 Échanges convectifs sur les bords verticaux extérieurs.	20
Figure 2.9 Échanges convectifs avec température de l'air et coefficient h variables.	21
Figure 2.10 Représentation des éléments convectifs intérieurs.	23
Figure 2.11 Échanges convectifs avec température de l'air imposée partout.	23
Figure 2.12 Échanges convectifs avec température de l'air imposée à l'extérieur et libre à l'intérieur.	24
Figure 2.13 Maillage d'une cavité fermée avec des éléments de 0.5 m de côté à gauche et de 0.2 m à droite.	31
Figure 2.14 Échanges radiatifs intérieurs en ondes longues.	32
Figure 2.15 Échanges radiatifs en ondes longues dans un corps noir et un corps gris.	33
Figure 2.16 Influence de la réflexion spéculaire des faces radiatives en ondes longues.	35
Figure 2.17 Éléments convectifs en trois dimensions.	39
Figure 2.18 Régime transitoire avec flux convectifs sur la peau extérieure.	42
Figure 2.19 Trois partitions de l'hémisphère en 145, 2000 et 5000 carreaux [Beckers 2012].	45

Figure 2.20 Flux unidirectionnel à travers le vitrage.	49
Figure 2.21 Étude de la taille du maillage du vitrage.	50
Figure 2.22 Projections stéréographiques des modèles géométriques et des trajets solaires à Cordoue.	52
Figure 2.23 Distribution des radiances du ciel au midi solaire pour les trois jours étudiés à Cordoue.	53
Figure 2.24 Irradiances absorbées au midi solaire pour les trois jours étudiés.	54
Figure 2.25 Températures de surface au midi solaire pour les trois jours étudiés.	55
Figure 2.26 Températures de surface à différentes heures le 21 septembre.	56
Figure 2.27 Données d'entrée du rayonnement en ondes courtes et en ondes longues.	62
Figure 2.28 Températures de surface à trois heures différentes de la journée et températures des vitrages et du ciel (horizon et zénith) pour toute la journée.	63
Figure 2.29 Bilan des flux pour la fenêtre de toit et la fenêtre sud tout au long de la journée.	64
Figure 2.30 Maillage conforme à gauche (20 cm de largeur) et non conforme à droite (50 cm et 20 cm de largeur).	67
Figure 2.31 À gauche : maillage conforme et à droite : maillage non conforme.	69
Figure 2.32 Modèle géométrique des bâtiments et dimensions de la rue.	70
Figure 2.33 Modèle géométrique et maillage de la rue canyon.	72
Figure 2.34 Maillage surfacique de la peau du modèle.	75
Figure 2.35 Propriétés thermiques des matériaux.	75
Figure 2.36 Propriétés radiatives des faces de la peau du modèle.	76
Figure 2.37 Données d'entrée radiatives.	77
Figure 2.38 Température de surface pour les trois tailles de mailles à 14 h.	79
Figure 2.39 Position du point NE à gauche et nombre d'éléments et de nœuds selon le modèle à droite.	81
Figure 2.40 Température des noeuds NE, NI et de l'air intérieur.	82
Figure 2.41 Température sur le mur de façade pour quatre moments de la journée en fonction du nombre d'éléments.	83

Figure 2.42 Maillage conforme de la sphère avec 50 carreaux par anneau, soit 1 250 carreaux au total.	86
Figure 2.43 a) Température de surface et T_{mrt} pour trois moments de la journée. b) T_{mrt} des trois points étudiés pendant toute la journée.	88
Figure 2.44 Sphère composée de 490 éléments (gauche) et leurs 490 rayons aléatoires (droites).	91
Figure 2.45 Calcul des irradiances en fonction du type de face rencontrée par le rayon.	92
Figure 2.46 Projection de Mollweide (600 000 pixels) de la rue selon deux orientations. Irradiances en ondes courtes à 14 h.	94
Figure 2.47 Irradiances pour trois moments de la journée.	95
Figure 2.48 Résultats des simulations : Température de surfaces à 14 h, Irradiances en ondes courtes, ondes longues et totales à 14 h, Température de l'air des derniers étages des bâtiments au centre de la rue.	96
Figure 2.49 T_{mrt} de la rue à 14 h.	98
Figure 2.50 T_{mrt} de la rue à 14 h pour différentes tailles de grilles.	98
Figure 2.51 T_{mrt} pour les modèles avec des façades claires et sombres à 12 h et 20 h.	99
Figure 3.1 Thermographie (à gauche) et thermographie corrigée (à droite) à 8 h le 20 février [Acuña Paz y Miño 2020a].	106
Figure 3.2 Vue aérienne et vue en perspective de la rue des Tonneliers (Bayonne, France).	108
Figure 3.3 Maillage et description géométrique d'un bâtiment, A) Description géométrique B) Maillage C) Identification des éléments structuraux.	110
Figure 3.4 A) et B) peau intérieure, C) peau extérieure et D) description géométrique des deux peaux.	110
Figure 3.5 Maillages de l'isolation intérieure (rose) et extérieure (bleu).	111
Figure 3.6 Maillage de la rue.	112
Figure 3.7 Maillage du modèle de la rue des Tonneliers.	113
Figure 3.8 Identification des faces aveugles de la peau extérieure.	114
Figure 3.9 Peau extérieure du modèle de la rue (en haut) et sa description géométrique (en bas).	115

Figure 3.10 Emplacements des appareils de mesures dans la rue.	116
Figure 3.11 Température de l'air à l'intérieur de la rue à différentes hauteurs.	117
Figure 3.12 Température de l'air et des surfaces à l'intérieur d'un appartement au 2 ^{ème} étage en bas et au 3 ^{ème} étage en haut.	118
Figure 3.13 Propriétés des matériaux.	120
Figure 3.14 Irradiances en ondes courtes.	123
Figure 3.15 Irradiances absorbées le 20 février en ondes courtes.	124
Figure 3.16 Température du ciel à l'horizon et au zénith pour toute la durée de l'étude.	125
Figure 3.17 Exitances (en haut) et températures (en bas) du ciel.	125
Figure 3.18 Irradiances absorbées en ondes longues.	127
Figure 3.19 Températures initiales des points de comparaison.	128
Figure 3.20 Synthèse des données d'entrée de la simulation.	129
Figure 3.21 Séquence de thermographies simulées et mesurées.	131
Figure 3.22 Emplacement et dénomination des points de comparaison.	132
Figure 3.23 Températures des points de comparaison des façades et du sol de la rue.	133
Figure 3.24 Températures des piliers.	135
Figure 3.25 Températures de l'environnement intérieur des deux appartements.	136
Figure 3.26 Température de surfaces de la rue des Tonneliers, relativement à la température de l'air.	138
Figure 3.27 Réflexion des surfaces en fonction de la bande spectrale pour les deux modèles de simulation.	139
Figure 3.28 Propriétés des surfaces en ondes longues : faces spéculaires en gris clair et faces diffuses en gris foncé.	140
Figure 3.29 Facteur de vue (FV) et facteur de vue étendu (FVE) d'une face (en vert) en fonction du type de réflexion.	141
Figure 3.30 Irradiances absorbées en fonction du type de réflexion à 13 h.	143
Figure 3.31 Températures de surface avec réflexions diffuses (à gauche), spéculaires (au milieu) et différences des deux (à droite).	144

Figure 3.32 Différences des températures de surface entre les modèles spéculaires et diffus.	144
Figure 3.33 Isolation intérieure en rouge et extérieure en bleu.	146
Figure 3.34 Températures de surface avec l'isolation intérieure à gauche et extérieure à droite.	147
Figure 3.35 Températures de surface avec isolation intérieure à gauche et extérieure à droite à 13h.	148
Figure 3.36 Températures du point P1 selon les deux modèles.	149
Figure 3.37 Bilan des flux nodaux du noeud P1 avec isolant extérieur en haut et intérieur en bas.	150
Figure 3.38 Flux conductifs du nez de plancher avec isolant intérieur et extérieur.	151
Figure 3.39 Irradiances en ondes courtes et en ondes longues pour les deux modèles.	153
Figure 3.40 Différence de températures moyennes radiantes entre les deux modèles.	154
Figure 4.1 Modèle du quartier idéalisé.	159
Figure 4.2 Peau du modèle du quartier.	160
Figure 4.3 Position des trois appartements étudiés.	161
Figure 4.4 Projection stéréographique de trois points du quartier, vue de dessus et vue 3D (Heliodon2 TM).	163
Figure 4.5 Propriétés thermiques des matériaux du quartier.	164
Figure 4.6 Propriétés radiatives des surfaces en ondes courtes et en ondes longues.	165
Figure 4.7 Données d'entrée radiatives de l'étude.	166
Figure 4.8 Températures de surface du quartier.	168
Figure 4.9 Températures de l'air intérieur des trois appartements étudiés.	170
Figure 4.10 Carte de T_{mrt} du quartier à 14 h pour des bâtiments légers à gauche et différences de T_{mrt} à droite entre les deux modèles.	171
Figure 4.11 Irradiances totales de trois points du quartier pour chaque modèle à 14 h.	172
Figure 4.12 T_{mrt} moyenne du quartier pour chaque modèle.	173
Figure 4.13 Températures de surface à 14 h et à 4 h pour chaque modèle.	176

Figure 4.14 Températures moyennes des surfaces pour chaque modèle à différentes heures.	177
Figure 4.15 Température de l'air intérieur des trois appartements étudiés pour chaque modèle.	178
Figure 4.16 Température moyenne radiante des trois points étudiés pour chaque modèle.	180
Figure 4.17 Irradiances en ondes courtes avec des bâtiments clairs (en haut) et sombres (en bas).	181
Figure 4.18 Différences maximales de la T_{mrt} pour les trois points étudiés entre les modèles.	182
Figure 4.19 Irradiances absorbées cumulées en ondes courtes pour des bâtiments sombres.	185
Figure 4.20 Composition des bâtiments du quartier pour le nouveau modèle.	185
Figure 4.21 Irradiances absorbées en ondes courtes par le modèle de référence et le nouveau modèle à 14 h.	186
Figure 4.22 Températures des surfaces à 14 h et à 4h pour les deux modèles.	187
Figure 4.23 Températures moyennes des surfaces des bâtiments pour l'ensemble des modèles étudiés.	188
Figure 4.24 Températures de l'air intérieur des trois appartements étudiés.	189
Figure 4.25 T_{mrt} du quartier pour les deux modèles à 14 h.	190
Figure 4.26 Différences de la T_{mrt} des points étudiés entre le nouveau modèle et le modèle de référence.	191
Figure 4.27 Différences de la T_{mrt} du quartier entre les différents modèles et le modèle de référence.	191

Liste des tableaux

Tableau 2.1 Paramètres d'évaluation des trois modèles.	78
Tableau 2.2 Contribution de chaque type de rayonnement à 14 h sur les trois globes simulés.	88
Tableau 3.1 Propriétés des surfaces en ondes courtes.	123
Tableau 3.2 Propriétés des surfaces en ondes longues.	126
Tableau 3.3 Température moyenne des points de comparaison selon la méthode d'acquisition.	134
Tableau 3-4 Propriétés des surfaces pour chaque modèle.	142

Nomenclature

α	-	Absorptivité <i>ou</i> coefficient d'absorption
	-	Diffusivité
A	m^2	Aire d'une surface
ω	sr	Angle solide
c_p	$Jkg^{-1}K^{-1}$	Capacité thermique massique
h	$Wm^{-2}K^{-1}$	Coefficient d'échange convectif
h_{rad}	$Wm^{-2}K^{-1}$	Coefficient d'échange radiatif
R_a	WK^{-1}	Coefficient de déperdition par renouvellement d'air
k	$Wm^{-1}K^{-1}$	Conductivité thermique
σ	$Wm^{-2}K^{-4}$	Constante de Stefan-Boltzmann ($5.67032 \cdot 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$)
Vi	m^3h^{-1}	Débit volumique de l'air
ρ	Kgm^{-3}	Densité massique
ε	-	Émissivité
e	m	Épaisseur
M	Wm^{-2}	Exitance énergétique <i>ou</i> émission
F	-	Facteur de vue <i>ou</i> Facteur de forme
F^{ext}	-	Facteur de vue étendu
ΦV	W	Flux de déperdition thermique par renouvellement d'air
ϕ	$W.m^{-2}$	Flux énergétique
β	-	Fonction de forme (Rayleigh-Ritz)
S	-	Fraction de la radiosité après une ou plusieurs réflexions
E	Wm^{-2}	Irradiance <i>ou</i> éclairement énergétique
λ	μm	Longueur d'onde
C	JK^{-1}	Matrice de capacité
	WK^{-1}	Matrice de conductivité
K	WK^{-1}	Matrice de conductivité en conduction

K_{cond}	WK^{-1}	Matrice de conductivité en convection
K_{conv}	WK^{-1}	Matrice de conductivité en rayonnement
K_{rad}		
K_h	WK^{-1}	Matrice de conductivité du nœud virtuel de convection
R	-	Matrice des réflectances diffuses
L	$Wm^{-2}sr^{-1}$	Radiance <i>ou luminance énergétique</i>
B	Wm^{-2}	Radiosité
ρ_r	-	Réflectance spéculaire
ρ_d	-	Réflectance diffuse
r	-	Réfectivité
R_{tot}	m^2KW^{-1}	Résistance thermique équivalente
η	$volh^{-1}$	Taux de renouvellement d'air
T	K	Température
T_{mrt}	K	Température moyenne radiante
τ_r	-	Transmittance régulière
τ_d	-	Transmittance diffuse
Q	W	Vecteur des flux nodaux <i>ou flux généralisés</i> (second membre)
V	m^{-3}	Volume

Publications de l'auteur

Revue internationale avec comité de lecture

Acuña Paz y Miño, J., Duport, N., Beckers, B., 2021. Pixel-by-pixel rectification of urban perspective thermography. *Remote Sensing of Environment*. 266, p112689.

García-Nevado, E., **Duport, N.**, Bugeat, A. and Beckers, B., 2021. Benefits of street sun sails to limit building cooling needs in a mediterranean city. *Building and Environment*, 187, p.107403.

Congrès internationaux avec actes

Duport, N., Acuña Paz y Miño, J., & Beckers, B., 2019. Handling 3D Model for Urban Thermal Study with the Finite Element Method. In *Proceedings of BS2019: 16th IBPSA Building Simulation Conference, Rome, Italy, 2 - 4 September*.

Colloques internationaux sans actes

Duport, N., 2019. Handling 3D model of a street for its thermal study with the finite element method. *Architecture and Urban Physics III, Girona, Spain, February 14-15*.

Duport, N., 2020. Multi-scale thermal study of an urban site using finite element method. *Architecture and Urban Physics IV, Turin, Italy, January 29 – February 8*.

Colloques nationaux sans actes

Duport, N., 2020. Paramètres d'une simulation thermique avec la méthode des éléments finis. *Conférence IBPSA France, 12 et 13 Novembre*.

Duport, N., 2020. Description du modèle géométrique d'une rue pour son étude thermique par éléments finis. *Club Cast3M, 27 Novembre*.