



Application des méthodes d'imagerie au rayonnement dans les scènes urbaines

Jairo Acuña Paz y Miño

► To cite this version:

Jairo Acuña Paz y Miño. Application des méthodes d'imagerie au rayonnement dans les scènes urbaines. Géotechnique. Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2020. Français. <NNT : 2020PAUU3023>. <tel-03123919>

HAL Id: tel-03123919

<https://theses.hal.science/tel-03123919v1>

Submitted on 28 Jan 2021

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.



HAL Authorization

Université de Pau et des Pays de l'Adour

Urban Physics Joint Laboratory

Application des méthodes d'imagerie au rayonnement dans les scènes urbaines

Thèse de doctorat

Présentée et soutenue par

Jairo Acuña Paz y Miño

Le 4 décembre 2020 à Université de Pau et des Pays de l'Adour

Anglet, France

Membres du jury :

Alain Clappier, Professeur à l'Université de Strasbourg (Rapporteur)

Dominique Dumortier, Professeur à l'École Nationale des Travaux Publics de l'État

Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry, Professeur à l'Université Paul Sabatier - Toulouse III (Rapporteur)

Benoit Beckers, Professeur à l'Université de Pau et des Pays de l'Adour (Directeur de thèse)

Claire Lawrence, Maître de conférences à l'Université de Pau et des Pays de l'Adour (Co-directeur de thèse)

Table des matières

Nomenclature	ix
Glossaire	xi
Résumé	
Français	xv
Español	xvii
English	xix
Introduction Générale	xxiii
1. État de l'art	
1.1. Les températures de surface et le bilan énergétique de surface.	1
1.2. Thermographie et thermométrie	2
1.3. Facteurs qui limitent la thermométrie par télédétection	4
1.4. Les différentes échelles de mesure	6
1.5. La mesure et la simulation numérique	7
1.6. Les échanges radiatifs dans la scène urbaine	8
2. Méthodes et montage du dispositif	
2.1. Conventions de représentation	15
2.2. Matériel	18
2.3. Bases de la radiométrie par imagerie	19
2.4. Modèle physique de mesure	23
2.5. Radiance d'une scène	25
2.6. Radiance du ciel	30
2.7. Distorsions géométriques	41
2.8. Post-traitement des données	46

3. Mesure visuelle de l'environnement radiatif : Imagerie 4π	
3.1. Contexte	53
3.2. Représentation graphique	55
3.3. Cas d'étude	60
3.4. Analyse des résultats	66
3.5. Discussion	85
3.6. Conclusion	88
 4. Mesures à l'échelle urbaine : La scène urbaine en perspective	
4.1. Introduction	91
4.2. Contexte	93
4.3. Cas d'étude : Rue des Tonneliers	94
4.4. Installation expérimentale	95
4.5. Résultats préliminaires	101
4.6. Correction des températures mesurées par thermographie	107
4.7. Application à la thermographie en perspective	113
4.8. Discussion sur l'application	128
4.9. Conclusion	135
 5. Conclusions générales et perspectives	
Conclusions	139
Perspectives	141
 Références	144
 Annexe : Procédures MATLAB©	169

Nomenclature

Q	Énergie rayonnante	Quantité d'énergie qui se propage vers, à travers ou en partant d'une surface donnée dans un laps de temps donné Δt .	J
ϕ	Flux rayonnant	Énergie rayonnante par unité de temps.	W
E_e	Irradiance	Flux rayonnant reçu par unité de surface.	W m ⁻²
M	Exitance	Flux rayonnant émis par unité de surface.	W m ⁻²
J	Radiosité	Flux rayonnant sortant (émis, réfléchi ou transmis) par unité de surface.	W m ⁻²
I	Intensité	Flux rayonnant émis par une source ponctuelle par unité d'angle solide.	W sr ⁻¹
L_e	Radiance	Flux rayonnant émis, réfléchi, transmis ou reçu par unité de surface projetée et par unité d'angle solide.	W m ⁻² sr ⁻¹
E_{sph}	Irradiance sphérique	Flux rayonnant reçu par une sphère élémentaire.	W m ⁻²
Ω	Angle solide	En un point X donné, l'angle solide d'un objet est l'aire de sa projection sur la sphère unitaire qui entoure le point.	sr
ρ	Réflectance	Capacité d'une surface à réfléchir l'énergie incidente. Elle est définie comme le rapport entre le flux rayonnant réfléchi et incident.	-
τ	Transmittance	Capacité d'une surface à transmettre l'énergie incidente. Elle est définie comme le rapport entre le flux rayonnant transmis et incident.	-
α	Absorptance	Capacité d'une surface à absorber l'énergie incidente. Elle est définie comme le rapport entre le flux rayonnant transmis et incident.	-

ε	Émissivité	Capacité d'une surface à émettre de l'énergie sous forme de rayonnement. Elle est définie comme le rapport entre le flux rayonnant émis par la surface et le flux rayonnant émis par un corps noir à la même température.	-
λ	Longueur d'onde	Distance entre deux cycles consécutifs d'une onde.	μm
ω	Humidité relative	Saturation de l'air en humidité.	%

Glossaire

Corps noir	Corps physique idéal qui absorbe tout le rayonnement électromagnétique incident, indépendamment de l'angle d'incidence.
Corps gris	Corps physique idéal qui absorbe une fraction constante du rayonnement électromagnétique incident, indépendamment de l'angle d'incidence.
Corps naturel	Corps réel qui absorbe une fraction du rayonnement électromagnétique incident, dépendamment de l'angle d'incidence et de la longueur d'onde.
Température apparente ou température de brillance	Température obtenue par inversion de la loi de Planck, en considérant que l'objet observé est un corps noir.
Température de surface (T_s)	Température de l'interface entre deux milieux de nature différente.
Température rayonnante moyenne (T_{mrt})	Température uniforme d'une enceinte imaginaire dans laquelle le transfert de chaleur rayonnante du corps humain est égal au transfert de chaleur rayonnante dans l'enceinte non-uniforme réelle.
Température réfléchie (T_{amb})	Température calculée à partir du flux rayonnante réfléchi.
Température de point de rosée (T_{dp})	Température à laquelle l'humidité d'un gaz, se condense par effet de saturation.

Projection équivalente	Projection cartographique qui conserve les surfaces.
Projection conforme	Projection cartographique qui conserve les angles.
Dynamic Range	La « plage dynamique » en français est le rapport entre la plus grande et la plus petite valeur qu'une certaine quantité peut assumer. En photographie fait référence à la plage d'intensité lumineuse mesurable.
High Dynamic Range (HDR)	Technique utilisée en imagerie photographique pour reproduire une plus grande plage des intensités lumineuses en combinant plusieurs expositions.
Ondes longues (Lw)	Rayonnement électromagnétique pour des longueurs d'ondes plus grandes 4 μm
Ondes courtes (sw)	Rayonnement électromagnétique pour des longueurs d'ondes plus petites que 4 μm

Résumé

Ce travail repose sur les techniques d'imagerie photographique et thermographique qui permettent de mieux comprendre les échanges radiatifs d'une scène urbaine en donnant des résultats visuels et quantitatifs. Deux types d'image sont construits et exploités : des panoramas sphériques, couvrant un angle solide de 4π stéradians, et des perspectives urbaines.

Les études de scènes urbaines effectuées dans des conditions différentes, Bayonne en hiver et Cordoue en été, sont présentées à travers deux applications. La première est centrée sur le confort thermique urbain et la seconde sur les échanges thermiques entre les surfaces d'une rue.

Dans la première application, l'étude se concentre sur le rayonnement incident en un point provenant de toutes les directions. Le rayonnement est mesuré dans les spectres visible et infrarouge, puis extrapolé à l'ensemble du spectre. L'image 4π qui en résulte représente la distribution spatiale du rayonnement et sert à calculer la température moyenne de rayonnement. Ce résultat est validé par des comparaisons avec les mesures utilisant le globe noir, considéré comme la méthode de référence.

La méthode 4π offre une mesure rapide, indépendante des effets de convection, avec une discrimination spectrale en deux bandes. Elle sert à jauger une ville à partir de peu de points de mesure, mais aussi à obtenir des informations spatialisées précises. Ainsi, l'étude réalisée à Cordoue montre que la rugosité du sol dans deux scènes analysées dans des conditions similaires influence le confort thermique du piéton.

Pour la deuxième application, l'étude est concentrée sur les températures de surface. Un modèle 3D simplifié est combiné à du lancer de rayons pour corriger la thermographie en filtrant les flux parasites. Le résultat est validé sur une rue en perspective par comparaison avec le résultat de plusieurs thermomètres de contact. Cette comparaison, qui ne peut être que ponctuelle et limitée à certaines surfaces, donne des résultats satisfaisants qui permettent d'étendre la correction à l'ensemble de l'image.

Les thermographies corrigées révèlent des phénomènes qui n'étaient pas visibles auparavant, les écarts de température des fenêtres étant les plus remarquables. En effet, le verre, matériau à haute transmittance thermique, met en évidence d'importantes pertes d'énergie lors de sa traversée. Ces pertes sont particulièrement visibles lors d'une froide journée d'hiver, lorsque le chauffage est en fonctionnement.

Dans une rue de type canyon, l'étude qualitative du rayonnement séparément dans deux bandes spectrales montre l'intérêt d'en inclure une troisième pour mieux comprendre le passage de la réflexion diffuse à la réflexion spéculaire. Cette bande serait celle de l'infrarouge proche.

Les deux applications apportent des connaissances fondamentales sur le paysage radiatif de la ville et montrent bien la relation entre la géométrie et le rayonnement. Ce n'est qu'à travers cette relation qu'il est possible d'identifier les phénomènes physiques qui doivent être pris en compte pour la simulation thermique urbaine.

Resumen

Este trabajo se basa en el uso de la imagen: fotográfica y termográfica. Esta permite una mejor comprensión de los intercambios radiativos de la escena urbana al proporcionar un resultado tanto visual como cuantitativo mediante la construcción y manipulación de dos tipos de imágenes: las panorámicas esféricas, llamadas 4π porque cubren un ángulo sólido de 4π estereorradianes, y las perspectivas urbanas.

El estudio de escenas urbanas bajo diferentes condiciones ambientales, Bayona en invierno y Córdoba en verano, se presenta a través de dos aplicaciones. La primera se centra en el confort térmico urbano y la segunda en los intercambios térmicos entre las superficies de una calle.

En la primera aplicación, el estudio se enfoca en la radiación incidente en un punto proveniente de todas las direcciones. La radiación se mide en dos rangos del espectro, el visible y el infrarrojo, y se extrapola a todo el espectro. La imagen 4π resultante representa la distribución espacial de la radiación y se utiliza para calcular la temperatura media radiante. Este resultado se valida mediante comparaciones con mediciones utilizando el globo negro, considerado como método de referencia.

El método 4π ofrece una medición rápida e independiente de la convección con una discriminación espectral en dos bandas. Ésta sirve para evaluar una ciudad a partir de pocos puntos de medición, pero también para obtener información espacializada precisa. El estudio realizado en Córdoba muestra que la rugosidad del suelo en dos escenas evaluadas en condiciones similares influye en el confort térmico del peatón.

En la segunda aplicación, el estudio se concentra en las temperaturas de la superficie. Nos servimos de un modelo 3D simplificado en combinación con el trazado de rayos para corregir la termografía filtrando los flujos parásitos. El resultado se valida en la perspectiva de una calle comparándolo con el resultado de varios termómetros de contacto. Esta comparación, que sólo puede ser puntual y limitada a ciertas superficies, da resultados satisfactorios que permiten extender la corrección a toda la imagen.

Una termografía corregida revela fenómenos que antes no eran visibles, destacándose la diferencia de temperatura de las ventanas. Efectivamente, el vidrio, un material con una alta transmitancia térmica, pone en evidencia la energía que se pierde a través de su superficie. Esto es particularmente visible en un día frío de invierno, cuando la calefacción está en funcionamiento.

En el caso de una calle tipo cañón, el estudio cualitativo de la radiación discriminada en dos bandas espectrales muestra el interés de incluir una tercera para comprender mejor el paso de la reflexión difusa a la especular, la del infrarrojo cercano.

Las dos aplicaciones proporcionan conocimientos fundamentales sobre el paisaje radiativo de la ciudad y muestran el vínculo entre la geometría y la radiación. Es sólo a través de esta relación que es posible identificar los fenómenos físicos que deben ser tenidos en cuenta para una simulación térmica urbana.

Summary

This work relies on imagery, photographic and thermographic, allowing a better understanding of the radiative exchanges of an urban scene by giving both visual and quantitative results. Two types of images are constructed and exploited: spherical panoramas, referred to as 4π as they cover a solid angle of 4π steradians, and urban perspectives.

The study of urban scenes in different places and conditions, Bayonne in winter and Cordoba in summer, are presented through two applications. The first focuses on urban thermal comfort and the second on heat exchanges between the surfaces of a street.

In the first application, the study focuses on the incident radiation coming from all directions at a single point. The radiation is measured in both the visible and infrared range and then extrapolated to the whole spectrum. The resulting image 4π represents the radiative spatial distribution and is used to calculate the mean radiant temperature. This result is validated by comparisons with measurements performed using the black globe, accepted as the reference method.

The 4π method offers a fast, convection-independent measurement with spectral discrimination in two bands. It serves to evaluate a city from few measurement points, but also to obtain precise spatialized information. The study carried out in Cordoba shows that the roughness of the ground in two scenes evaluated under similar conditions influences the thermal comfort of the pedestrian.

For the second application, the study focuses on surface temperatures. We use a simplified 3D model combined with ray tracing to correct the thermography by filtering parasitic fluxes. The result is validated on a perspective street by comparison with the result of several contact thermometers. This comparison, which can only be punctual and limited to certain surfaces, gives satisfactory results that allow us to extend the correction to the entire image.

A corrected thermogram reveals phenomena that were formerly not visible, the temperature difference of the windows being the most remarkable. Indeed, glass, a material with high heat transmission, exhibits the heat loss that occurs through its surface. This is particularly noticeable on a cold winter's day when the heating is in operation.

In a canyon-type street, the qualitative study of the radiation discriminated in two spectral bands shows the interest of including a third one, that of the near infrared, to better understand the passage from diffuse to specular reflection.

These two applications provide fundamental knowledge on the radiative landscape of the city and show the relationship between geometry and radiation. Only through this relationship is it possible to identify the physical phenomena that must be accounted in an urban thermal simulation.

Introduction Générale

La compréhension du comportement radiatif et du bilan énergétique des surfaces est essentielle pour étudier le fonctionnement des scènes urbaines. Pour observer ces phénomènes par des moyens de télédétection, la prise en compte de la géométrie de la ville est indispensable.

De nombreuses disciplines s'intéressent à la mesure des paramètres environnementaux en milieu urbain.

Parmi celles-ci figurent la géographie et la climatologie, qui utilisent des mesures comme base pour générer des modèles [Masson 2000]. À plus grande échelle la physique statistique utilise ces mesures pour étudier l'influence de la forme urbaine sur le climat [Sobstyl 2018]. À une échelle plus réduite, ces mesures permettent d'étudier l'influence de la couleur d'une façade sur le confort thermique d'un piéton [Erell 2014] [Blocken 2004].

Cependant, toutes ces disciplines sont confrontées au grand défi de la mesure dans un milieu urbain. Les villes sont des systèmes complexes avec des difficultés inhérentes : une grande variété d'agents qui interagissent entre eux, une grande variété d'échelles temporelles et spatiales et un grand nombre de processus qui modifient leur structure et leur organisation spatiale [Barthelemy 2019].

Certains de ces aspects peuvent être étudiés quantitativement, comme l'a identifié [Oke 1982] lorsqu'il a défini l'îlot de chaleur urbain (*UHI* selon son acronyme anglais, *Urban Heat Island*), qui est causé en partie par une augmentation de facteurs tels que : l'absorption solaire, le rayonnement ondes longues provenant du ciel et le

stockage de la chaleur sensible ; et une diminution de facteurs tels que : la perte nette de rayonnement ondes longues, l'évapotranspiration et la perte totale de chaleur turbulente due à la réduction de la vitesse du vent. Cette étude est une première tentative pour relier ces causes énergétiques à leurs effets thermiques sur la base de conditions assez simplifiées [Yap 1974], [Nunez 1977].

Bien que les modèles de bilan énergétique de surface contribuent à l'étude du stockage de la chaleur urbaine, la plupart des modèles de couche limite de l'époque utilisent simplement les valeurs des propriétés thermiques des matériaux de construction et une équation de conduction de la chaleur unidimensionnelle basée sur un plan de "surface" urbain supposé. Ils n'ont donc pas favorisé la compréhension du processus complexe de stockage de la chaleur urbaine [Oke 1987].

Tous ceux qui ont mis en place des méthodes de mesure des flux de chaleur turbulents de surface provenant de la couche superficielle urbaine ont dû faire face à des décisions difficiles concernant le choix de la hauteur de l'appareil et de la période de temps à analyser. L'observation trop proche de la surface place les capteurs dans le sillage des éléments individuels, ce qui ne permet pas une représentativité spatiale suffisante.

Puisque tous les flux énergétiques thermiques de surface (à l'exception des termes solaires) peuvent être mathématiquement exprimés en termes de température de surface [Carlson 1981], il est possible, par analyse inverse, de fournir des informations sur les flux énergétiques de surface et/ou les caractéristiques thermiques de surface à partir de la connaissance du régime thermique de surface [Oke 1988]. La disponibilité relativement récente de données radiométriques à haute résolution provenant d'avions ou de satellites a permis d'étudier des modèles spatiaux des flux énergétiques et les caractéristiques de surface.

Mais, cette approche a apporté avec elle de nouvelles inconnues. L'émissivité moyenne d'une zone urbaine est difficile à évaluer et cela peut conduire à une fausse représentation des températures cartographiées par thermographie. [Artis 1982] a étudié les effets de la variation de l'émissivité du toit sur les images thermographiques aériennes. Il a présenté ses résultats sous forme d'histogrammes, illustrant la fréquence de la distribution de l'émissivité observée dans l'étude des toits, les valeurs les plus observées étant celles comprises entre 0,87 et 0,97 (Figure 1). Une étude similaire a été menée par [Arnfield 1982] qui a intégré les émissivités tabulées d'une série de surfaces dans son modèle géométrique de rayonnement urbain.

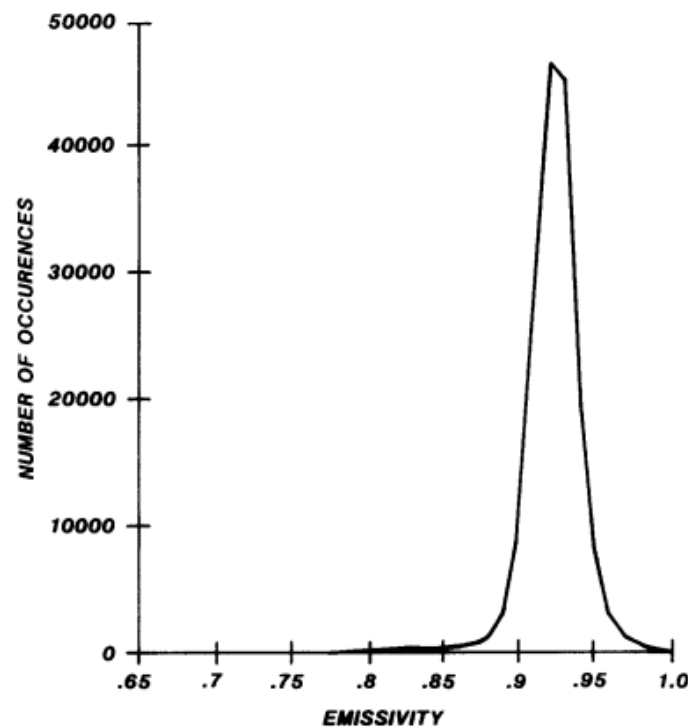


Figure 1. Histogramme de tous les pixels d'image d'émissivité contenus dans les toits
[Artis 1982]

Lorsque l'échelle spatiale augmente, la variabilité spatiale est susceptible de diminuer, c'est-à-dire qu'il y a probablement moins de différence entre deux zones d'utilisation des sols dans une ville qu'entre les murs nord et sud d'un bâtiment individuel dans l'une d'elles [Schmid 1992].

Les mesures à distance de la température apparente de la surface sont souvent comparées aux mesures de la température de l'air de la couche superficielle dans le but de générer des estimations de la température de l'air à partir de l'imagerie thermique [Voogt 1997]. Même si certaines études ont fait état de similitudes entre les tendances spatiales de la température de l'air et la température de surface mesurée par télédétection [Nichol 1994], la plupart suggèrent des différences significatives.

[Roth 1994] a suggéré que ces différences ont leur origine dans la nature de la surface urbaine *vue* par un capteur satellite, en particulier un capteur à un angle d'élévation important, donnant une vue en plan ou vue aérienne de la ville. Dans ce cas, les toits, les cimes d'arbres, les routes et les zones horizontales ouvertes sont suréchantillonnées et les surfaces verticales et les zones situées sous la cime des arbres sont négligées.

Cette question a été traitée par [Voogt 1997], qui a utilisé la thermographie combinée à la thermométrie portable IR pour définir une *température de surface urbaine complète* (Figure 2). Il a montré que la température peut présenter des écarts importants selon les angles d'observation.

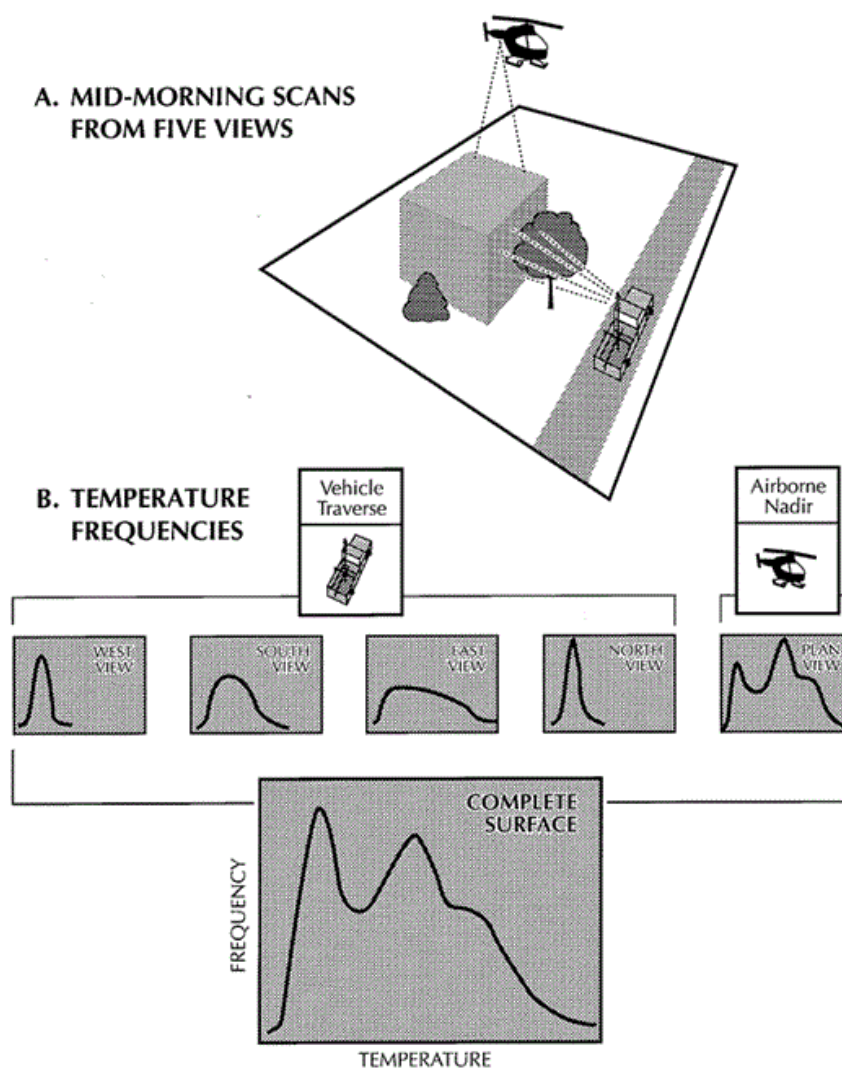


Figure 2. Représentation conceptuelle de la procédure permettant de calculer la distribution complète de la température de surface pour une zone urbaine en combinant les distributions de température des facettes.
[Voogt 1997]

Plusieurs campagnes de mesure à grande échelle comme ESCOMPTE¹ à Marseille, CAPITOU² à Toulouse et BUBBLE³ à Bâle, ont cherché à approfondir l'étude du climat urbain. Celles-ci ont combiné des mesures à différentes échelles permettant une comparaison entre les conditions locales et celles au niveau de la ville.

L'Expérience sur Site pour COntreindre les Modèles de Pollution atmosphérique et de Transport d'Émissions (ESCOMPTE) visait à documenter la structure quadridimensionnelle de la couche limite urbaine en relation avec la thermodynamique de la canopée urbaine pendant une période estivale de vents faibles, du 5 juin au 15 juillet 2001. L'objectif était principalement de construire une base de données permettant de tester des schémas d'échange d'énergie en milieu urbain et des modèles météorologiques et chimiques de transport à haute résolution [Mestayer 2005] [Cros 2004].

L'expérience CAPITOU (Canopy and Aerosol Particles Interactions in TOulouse Urban Layer) est un étude expérimental conjoint sur le climat urbain, incluant les échanges énergétiques entre la surface et l'atmosphère [Hénon 2012], la dynamique de la couche limite au-dessus de la ville et ses interactions avec la chimie des aérosols. La campagne s'est déroulée dans la ville de Toulouse, pendant un an, de février 2004 à février 2005 [Masson 2008].

La Basel UrBan Boundary Layer Experiment (BUBBLE) est une expérience qui s'est déroulée sur une année, de 2001 à 2002, pour étudier en détail la structure de la couche limite dans la ville de Bâle, en Suisse. Des tours atteignant au moins deux fois la hauteur de l'obstacle majeur ont permis d'observer les turbulences à de nombreux niveaux sur plusieurs sites répartis sur différents types de surface (urbaine, suburbaine et rurale). De plus, un profileur de vent et un Lidar près du centre-ville ont permis de profiler l'ensemble de la basse troposphère. Pendant une période d'observation intensive d'un mois, plusieurs sous-études sur l'énergie des canyons urbains, ainsi que sur la turbulence urbaine et le profilage (sodar, RASS, ballon captif) ont été réalisées [Rotach 2005].

La mise en place d'appareils de mesure pour ces campagnes a été intensive. BUBBLE se distingue, en mesurant plusieurs paramètres environnementaux par au moins deux méthodes différentes. Le diagramme de la (Figure 3) montre la répartition des appareils de mesure utilisés pendant la campagne.

¹ <http://medias.obs-mip.fr/escompte>

² <http://capitoul.aeris-data.fr/>

³ <https://www.mcr.unibas.ch/dolueg2/projects/campaigns/BUBBLE/index.htm>

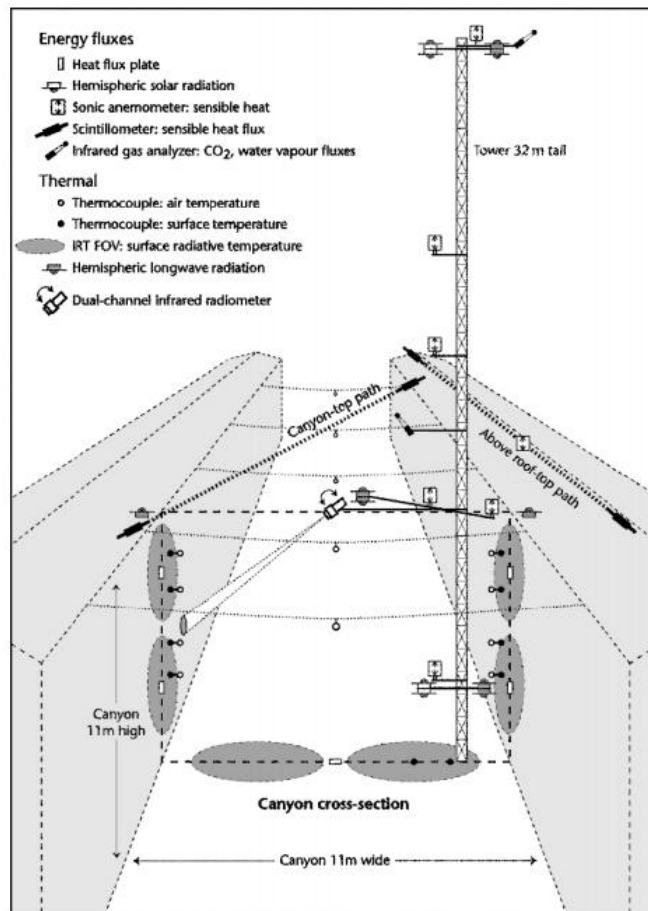


Figure 3. Représentation conceptuelle du canyon de la Sperrstrasse montrant l'instrumentation pour mesurer les caractéristiques thermiques et les flux d'énergie sur la section transversale près de la tour.
[Rotach 2005]

Ces travaux d'observation urbaine ont favorisé la recherche dans différentes disciplines. Les observations des conditions et des processus atmosphériques dans les villes constituent la pierre angulaire des progrès dans la compréhension des climats urbains et sont essentielles pour améliorer les performances des modèles atmosphériques urbains [Monks 2009] [Salamanca 2010]. De plus en plus, les programmes d'observation en milieu urbain sont des initiatives de collaboration, multi-institutionnelles, multinationales et interdisciplinaires [Grimmond 2010] [Chen 2011] [Souch 2006] [Offerle 2007] [Lindberg 2011] [Mauree 2017] [Henon 2012] [Hogan 2019]. Cela a des implications importantes pour les questions de recherche abordées et la possibilité d'étudier les processus et les effets à de multiples échelles spatiales et temporelles. Les progrès technologiques ont fourni aux climatologues urbains de nouveaux instruments améliorés et souvent plus

abordables, [Masson 2006] [Martili 2003] [Grau 2013] ainsi que la capacité de traiter et d'analyser les données plus rapidement [Qi 2019], [Lagouarde 2013].

Les nouvelles technologies de télédétection thermique ont ouvert de nouvelles voies pour l'observation de l'îlot de chaleur urbain et l'étude de leur cause grâce à la combinaison de la télédétection thermique et de la micrométéorologie urbaine.

Pour étudier ce phénomène de la climatologie urbaine, [Voogt 2003] souligne que la température de surface est de première importance. Elle module la température de l'air des couches les plus basses de l'atmosphère urbaine, elle est au centre du bilan énergétique de la surface, elle contribue à déterminer les climats internes des bâtiments et elle influence les échanges énergétiques qui affectent le confort des habitants. Pourtant, les grandes campagnes urbaines comme BUBBLE où les mesures à différentes échelles combinent la télédétection et la thermométrie de contact sont rares. Cela les rend particulièrement intéressantes pour l'étude du climat urbain. L'utilisation de la thermographie en milieu urbain (Figure 4) [Rotach 2005] est l'un des résultats de ce type de mesure à une échelle intermédiaire et soulève des nouvelles questions.

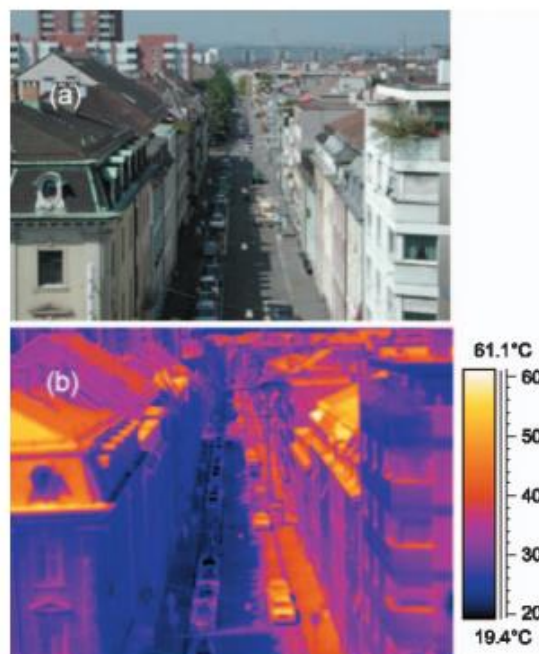


Figure 4. a) Photographie du canyon urbain du site Ue1 en regardant vers l'ouest.
b) Image thermique du site Ue1 prise à 11:20 CET avec un scanner thermique FLIR SC500
[Rotach 2005]

Selon [Voogt 1997], le biais trouvé à partir de la vue en perspective peut être attribué à un ou plusieurs des éléments suivants : la vue préférentielle de la partie supérieure (entièrement irradiée) des murs, l'impossibilité de voir en dessous du niveau des auvents (qui ombragent les parties les plus basses des murs du bâtiment), l'obscurcissement du mur inférieur lorsque la géométrie du canyon (le rapport d'aspect H/L) est importante, et la réflexion spéculaire du rayonnement des surfaces chaudes des rues et des façades des canyons. Il a souligné que d'autres erreurs dues à la présence de surfaces *émettant* de manière spéculaire sont possibles, en particulier dans les environnements de centre-ville.

« Actuellement, nos conclusions servent principalement à mettre en garde contre les risques liés à l'utilisation de températures de surface télé-détectées sans tenir compte de la nature géométrique de la surface observée et des conditions d'observation ».

J.A. Voogt et T.R. Oke

Complete Urban Surface Temperatures - 1997

À la suite de cette observation des deux pionniers de la Physique Urbaine, nous nous intéressons dans ce travail à la mesure des températures et à l'élaboration de thermographies sur le détail du relief de la ville. Ceci implique de disposer d'une description précise de la géométrie de la scène.

Pour réaliser ce travail, il faut en premier lieu disposer d'appareils de mesure précis, faciles à utiliser et bien adaptés aux opérations à effectuer. (Chapitre 2).

En se plaçant au centre de la scène analysée, on est conduit tout naturellement à créer des images omnidirectionnelles, c'est-à-dire représentées sur la sphère, qui est une surface non développable. Cette contrainte incite à utiliser les projections planes de l'objet sphérique. Parmi les représentations possibles, les projections équivalentes s'imposent, car toute image créée sur la sphère est transformée en une image de même aire dans le plan. Autrement dit, un objet de la sphère comportant n pixels est transformé en objet plan comportant le même nombre de pixels. Les tests réalisant des intégrations par comptage de pixels sur les représentations planes donnent des résultats rapides et précis. Ce chapitre répond à la question : que se passe-t-il au point de mesure en tenant compte de l'environnement visible complet ? (Chapitre 3).

Le second aspect de ce travail est basé sur les projections perspectives de la scène urbaine qui posent le problème de la distorsion des images et nécessitent par conséquent des corrections des cartes de température. Un grand soin est apporté à l'identification de ces distorsions et à leur correction. Ce chapitre répond à la question : que se passe-t-il dans la rue où est placé le dispositif de mesure ? (Chapitre 4).

En résumé, on analyse des thermographies dans deux situations bien différentes avec des représentations et des objectifs différents, mais avec le même matériel de mesure. Ces deux types d'étude font appel à des projections classiques dans le but d'analyser la ville à hauteur d'homme.

1. État de l'art

1.1. Les températures de surface et le bilan énergétique de surface.

Le bilan énergétique d'une surface décrit la répartition des flux énergétiques entrant et sortant ; ce processus se traduit physiquement par le changement de la température de surface [Christen 2012]. À partir de celle-ci, il est possible de tirer des informations sur d'autres termes du bilan énergétique, tels que la grandeur de certains flux énergétiques qui ont lieu sur la surface ou des informations sur les propriétés des matériaux. En milieu urbain, l'étude des températures de surface peut contribuer à améliorer les connaissances sur les processus énergétiques et les caractéristiques des matériaux de l'environnement [Christen 2004].

Pour les études de la couche limite urbaine, des facteurs tels que le flux de chaleur sensible sont essentiels. Celui-ci représente la quantité d'énergie échangée par convection entre une surface et l'air en contact avec elle, en raison de la différence de température entre les deux. La magnitude de ce flux est directement proportionnelle à ce différentiel de température.

Pour les études sur le confort urbain extérieur, le flux radiatif des surfaces est essentiel et est calculé comme le bilan du rayonnement ondes courtes et ondes longues. Le flux ondes courtes dépend du rayonnement solaire incident, soit la somme de la contribution directe du soleil et de la contribution diffuse du ciel, et du coefficient de réflexion de la surface. Le flux ondes longues dépend à la fois du

rayonnement (ondes longues) reçu de l'environnement et du rayonnement émis par les surfaces. Ce dernier dépend de leur température et de leur émissivité

[Voogt 2003] souligne que la température de surface est de première importance pour étudier la climatologie urbaine, car elle module la température de l'air des couches les plus basses de l'atmosphère urbaine. Cette température est au centre du bilan énergétique de la surface et contribue à déterminer les climats internes des bâtiments, et influence les échanges énergétiques qui affectent le confort des habitants.

Dans la pratique, la température de surface à l'échelle urbaine est difficile à mesurer et est souvent remplacée par une autre température, telle que la température de surface terrestre observée par satellite, la température rayonnante de surface calculée à partir de mesures du rayonnement ondes longues sortant vers le ciel, les températures complètes de surface pondérées en fonction de la surface à partir d'une combinaison de mesures [Voogt 2000] ou de modèles de température de surface 3D [Morrison 2018] [Yin 2015][Wang 2018] .

Puisque ce bilan énergétique varie au sein d'une même surface surtout à l'échelle urbaine, les corps étudiés présentent des gradients de température. Ceux-ci peuvent être étudiés par différentes techniques de mesure. Cependant, la thermographie infrarouge se démarque. Elle permet sa quantification ainsi que la visualisation de sa distribution spatiale. Ses applications et ses limites sont décrites dans les sections qui suivent.

1.2. Thermographie et thermométrie

La thermographie est une technique de mesure qui permet la représentation graphique de la température de surface à partir de la mesure du rayonnement infrarouge. « La thermographie est la technique permettant d'obtenir, au moyen d'un appareillage approprié, l'image thermique d'une scène observée dans un domaine spectral de l'infrarouge »⁴

La technique thermographique a été largement utilisée pour les mesures à microéchelle car les observations par télédétection offrent la seule possibilité d'*observer* la température de surface avec une résolution spatiale et une fréquence temporelle élevées, assurant ainsi une couverture de la zone [Grinzato 1998].

⁴ Extrait de l'Association française de normalisation

Plusieurs études présentent un aperçu des applications. [Gade 2014] montre les avantages de la thermographie de manière générale et classe les applications en trois catégories : animaux et agriculture, objets inanimés et humains. Il met l'accent sur la fusion d'images et examine les avantages et les inconvénients qu'elle présente pour les applications de vision par ordinateur. [Balaras 2002] se concentre sur la thermographie pour le diagnostic des bâtiments, en mettant l'accent sur la détection des défauts d'humidité, ainsi que sur les inspections électriques et mécaniques. [Kylili 2014] approfondit la revue bibliographique sur les différentes applications de la thermographie dans le génie civil et l'étend aux applications industrielles, environnementales et biomédicales. En outre, il présente les avantages et les restrictions de la thermographie infrarouge. [Cao 2019] présente la revue la plus récente. Il affirme que le rayonnement infrarouge thermique présente clairement un comportement anisotrope, similaire à la réflectance bidirectionnelle dans les domaines spectraux du visible et de l'infrarouge proche. Cet article passe en revue l'évolution historique et l'état actuel de l'observation de la directionnalité du rayonnement thermique en laboratoire, *in situ*, à partir de plateformes en hauteur ou de satellites. Il présente trois applications potentielles, notamment la normalisation de la température superficielle terrestre, l'estimation du rayonnement hémisphérique ascendant ondes longues en utilisant des observations du rayonnement infrarouge thermique multi-angulaire et la séparation des températures des composants de surface (les masses d'eau, la glace, la mer, la neige et la végétation).

Les études qui utilisent une caméra thermique se concentrent sur deux types de résultats. Ils peuvent être quantitatifs ou qualitatifs [Hart 1991]. Dans cette étude, les premiers sont définis comme thermométriques et les seconds comme thermographiques. Les analyses thermométriques se basent sur la mesure de la température en un point ou une zone donnée, soit par des valeurs ponctuelles, des moyennes, ou par l'établissement de plages de mesure. Les analyses thermographiques sont basées sur l'évaluation visuelle des distributions de couleur des thermographies qui représentent graphiquement les différents rayonnements reçus par chaque capteur de la caméra. L'évaluation des résultats permet la détection d'anomalies basée sur l'expérience ou la comparaison de modèles qui devraient théoriquement se comporter de manière similaire.

Dans le milieu de la recherche, l'approche quantitative prédomine sur l'analyse qualitative. Cette situation contraste avec la pratique professionnelle quotidienne du thermographe, où l'interprétation qualitative domine.

1.3. Facteurs qui limitent la thermométrie par télédétection

La thermométrie par télédétection permet d'évaluer la température de surface des objets en fonction du rayonnement infrarouge mesuré dans une bande spectrale donnée. Lorsque le rayonnement atteint une surface ou lorsqu'il traverse l'atmosphère, il peut être absorbé, réfléchi ou transmis et la proportion dans laquelle chaque phénomène se produit est exprimée par les coefficients d'absorptance (α), de transmission (τ) et de réflexion (ρ). Or, la capacité d'absorption est équivalente à la capacité d'émission (ϵ). La valeur de ces coefficients dépend de la longueur d'onde analysée. Toutefois, le principe de conservation de l'énergie doit être respecté dans tous les cas.

Toutes ces interactions doivent être prises en compte pour obtenir la température d'une surface étudiée.

Certains chercheurs ont identifié les facteurs qui limitent la thermométrie par télédétection [Minkina 2009] [Lehmann 2013]. [Fokaides 2011] a constaté que la variable la plus sensible lors de la quantification d'une thermographie est la température apparente réfléchie ainsi que l'émissivité supposée. [Datcu 2005] a présenté une méthode pour quantifier le flux réfléchi en utilisant un miroir infrarouge. [Albatici 2013] a évalué la valeur de l'émissivité thermique des matériaux de construction à l'aide d'un émissomètre portable. [Porrás-Amores 2013] a développé un système d'écran de mesure portable et peu coûteux pour obtenir des mesures quantitatives de la répartition de la température de l'air.

En général, la détermination de la température de surface à partir de la télédétection est un processus très délicat. Cela est dû à la nécessité de définir les paramètres pour calibrer les images dans des scènes matérielles et géométriques très complexes [Hammerle 2017].

C'est pourquoi certaines études choisissent d'utiliser la thermographie pour analyser les températures de la scène, en supposant que tous les objets de la scène se comportent comme des corps noirs [Clausing 2007] [Holst 2000]. Cette température représente la température apparente. Elle est également connue sous le nom de température de brillance, température rayonnante ou de température effective du corps noir [Vollmer 2017]. Cette approche est couramment utilisée dans les travaux où des scènes comportant de multiples matériaux sont analysées ou lorsque les matériaux sont vus sous différents angles, par exemple à l'échelle de la rue ou de la ville [Lagouarde 2010] [Voogt 1997]. Ce type d'approche permet une analyse mixte

quantitative-qualitative. Dans cette hypothèse, la température est le résultat direct du rayonnement incident sur le capteur de la caméra. Par conséquent, il présente un résultat brut, et exprimé en $W\ m^{-2}$, C'est un résultat quantitatif fiable de la radiosité de la scène.

Les travaux comme celui de [Meier 2011] ont donné une importance particulière à l'étude de facteurs environnementaux puisqu'ils affectent les résultats lors des campagnes de mesure en milieu urbain. Il quantifie et examine les effets atmosphériques qui modifient le rayonnement observé par un système infrarouge thermique monté sur un mât. La combinaison d'un modèle 3D et des techniques de visualisation par ordinateur permet une détermination pixel par pixel des paramètres nécessaires pour la correction atmosphérique. D'autres facteurs tels que la réflexion des radiations ou l'émissivité des matériaux de la scène n'ont pas été étudiés.

Dans des environnements contrôlés, ces facteurs qui distinguent la thermométrie de la télédétection peuvent être analysés aisément [Maroy 2017], en revanche dans un environnement urbain, ce n'est pas facile [Avdelidis 2003]. Ainsi, les études qui prennent en compte tous ces facteurs se retrouvent généralement à une échelle plus réduite.

Pour obtenir une température de surface, il est nécessaire de déterminer l'émittance de la surface étudiée. Cela signifie qu'il est nécessaire de connaître en détail une grande partie de la scène où la mesure est effectuée. Dans un environnement uniforme, certaines simplifications donnent de bons résultats ($T_{atm}=T_{amb}$) [Vollmer 2017]. Dans un environnement non uniforme, le passage de la température apparente à la température de surface nécessite un travail supplémentaire.

De plus, lors d'études dans un cadre urbain, une attention particulière doit être portée à l'aspect logistique de la campagne de mesure. Cela concerne un positionnement sûr et sécurisé des équipements. Les principaux défis sont liés à la surveillance des conditions environnementales (vent, pluie, couverture nuageuse), au maintien de l'alimentation électrique des équipements pendant toute la période de relevé, à l'équilibre entre la résolution spatiale et le champ de vue (FOV pour son acronyme anglais, *Field Of View*) et à la réduction au minimum des objets non désirés (comme des voitures ou des piétons) [Fox 2015].

1.4. Les différentes échelles de mesure

Lorsqu'on s'intéresse à la physique urbaine, un conflit d'échelle se présente. La plupart des études se concentrent sur les deux échelles extrêmes pour des raisons de facilité d'acquisition et de traitement des données obtenues.

Dans les environnements bâtis, les études de température basées sur la télédétection couvrent une large échelle spatiale, allant de l'analyse d'un échantillon étudié en laboratoire [Fox 2012], ou *in situ* [Doulos 2004] [O'Grady 2017] à des villes entières, étudiées à partir des images satellite [Weng 2009] [Sobrino 2011] [Chrysoulakis 2018]. Il existe aussi des études à des échelles intermédiaires du bâtiment individuel [González-Aguilera 2013] [Lagüela 2012] ou de la rue [Asano 1996]. Les grandes campagnes urbaines comme BUBBLE, où des mesures à différentes échelles combinent télédétection et thermométrie de contact, restent rares. Cela les rend particulièrement intéressantes pour l'étude du climat urbain.

Dans la ville, la thermographie est généralement utilisée, de manière ponctuelle, pour déterminer des pathologies [Titman 2001] telles que des défauts dus à l'humidité [Barreira 2012] [Kominsky 2007], en relation avec l'efficacité énergétique ou réaliser des contrôles tout au long du développement d'un projet [Taylor 2013]. Ces analyses sont généralement dérivées de résultats qualitatifs. Dans la pratique professionnelle, les résultats qualitatifs ont une grande importance pour la communication avec l'habitant. Selon [Goodhew 2015], les ménages étaient près de cinq fois plus susceptibles d'installer des mesures de protection contre les courants d'air après avoir vu une thermographie. L'effet était particulièrement prononcé pour les mesures visant à résoudre un problème visible sur les images.

Dans la recherche, les mêmes sujets sont souvent abordés avec une approche quantitative [Fox 2015] [Brown 1981]. [Asdrubali 2012] a présenté une méthode quantitative pour l'évaluation de ponts thermiques et [Grinzato 2010] a proposé une méthode pour construire des cartes d'humidité en utilisant une caméra thermique. Des études statiques à petite échelle permettent d'évaluer les propriétés des matériaux *in situ*, comme le coefficient total de transfert de chaleur (U-value). Certaines recherches ont été menées dans ce domaine, chacune présentant une procédure différente vérifiée par l'application sur des études de cas simples [Tejedor 2017] [Fokaides 2011] [Lehman 2013] [Albatici 2015]. D'autres études quantitatives dynamiques, cherchent à couvrir une plus grande zone avec une série de captures [Brown 2013] [Lee 2018]. Un avantage de cette approche est un meilleur échantillonnage spatial par rapport aux variations de température à micro-échelle qui se produisent sur une façade individuelle du bâtiment. [Voogt 1997]. D'autres

ont cherché à étendre le champ de vision en assemblant plusieurs captures afin de se rapprocher de l'échelle urbaine [Brady 2010] [Chandler 2011] [Adderley 2015].

Il existe peu d'études urbaines basées sur la thermographie qui se concentrent sur les phénomènes thermiques au niveau de la rue, alors que c'est la première échelle urbaine avec une réelle possibilité d'intervention. Le développement de méthodes pour les études thermographiques à cette échelle intermédiaire peut aider à comprendre les échanges radiatifs [Lindberg 2008], avec une influence sur le confort des piétons et le climat radiatif urbain [Errel 2014].

1.5. La mesure et la simulation numérique

L'utilisation combinée de la mesure en milieu urbain et de la simulation a deux intérêts : calibrer la simulation et obtenir des résultats impossibles à mesurer *in situ*.

Une option intermédiaire consiste à analyser et traiter les mesures sur des modèles numériques 3D. [Offerle 2007] a montré que la géométrie est un facteur crucial pour déterminer non seulement le flux mais aussi la distribution des températures dans les canyons urbains.

Cela a conduit à de nouvelles techniques comme la génération de modèles thermographiques 3D et d'ortho-images à l'aide de techniques de modélisation automatisées basées sur l'image sans avoir besoin d'utiliser un autre type de géotechnologie comme le scanner laser ou l'équipement topographique [González-Aguilera 2013]. [Martinez-De Dios 2006] a présenté un ensemble de techniques de perception infrarouge pour la détection automatique des pertes de chaleur par les fenêtres en utilisant des drones.

[Choi 2007] a mis au point une méthode d'évaluation des performances thermiques sur site combinant la mesure et la simulation.

[Krayenhoff 2007] a développé un modèle de bilan énergétique urbain tridimensionnel à micro-échelle, pour prédire les températures de surface urbaine pour une variété de géométries et de propriétés de surface, de conditions météorologiques et d'angles solaires. [Harman 2004] montre que l'influence de la géométrie des bâtiments sur les termes de rayonnement du bilan énergétique de surface est l'une des principales raisons des différences de température de surface entre les zones rurales et urbaines.

[Ghandehari 2018] présente une nouvelle approche hybride mesure – simulation pour une meilleure compréhension du transfert de chaleur radiative dans les environnements urbains complexes.

[Morrison 2018] a développé une nouvelle méthode pour déterminer les phénomènes d'anisotropie thermique apparente observés par les caméras LWIR sur le site d'essai COSMO (Comprehensive Outdoor Scale MOdel). Il a utilisé le modèle DART (Discrete Anisotropic Radiative Transfer) [Gastellu-Etchegorry 2012] et utilise un logiciel de rendu tridimensionnel pour visualiser la variation de l'orientation et de l'ombrage des surfaces. Plus tard, [Morrison 2020] a développé une méthode pour retrouver la température des surfaces urbaines à partir d'observations de télédétection à l'échelle des sous-bâtiments. Les corrections tiennent compte de l'émission et de l'absorption du rayonnement par l'air entre la surface et l'instrument (correction atmosphérique), et du rayonnement infrarouge réfléchi.

Pour des analyses quantitatives à l'échelle urbaine, les observations sont souvent simplifiées en raison de la résolution spatiale. Par conséquent, la connaissance des différentes composantes du bilan énergétique à l'échelle locale reste encore limitée [Al Bitar 2017].

1.6. Les échanges radiatifs dans la scène urbaine

Les scientifiques et les praticiens d'un vaste nombre de disciplines, dont l'urbanisme [Ren 2011], la physique urbaine [Beckers 2013], la climatologie [Eliasson 1996], la géographie [Grimmond 2002] et la biométéorologie [Lindberg 2018], abordent l'étude des échanges radiatifs dans la scène urbaine. Historiquement, ces études s'inscrivent dans deux manières d'aborder l'environnement radiatif.

La première concerne l'îlot de chaleur urbain, causé en partie par une augmentation de facteurs tels que l'absorption solaire, le rayonnement ondes longues du ciel et le stockage de la chaleur sensible, et une diminution de facteurs tels que la perte nette de rayonnement ondes longues, l'évapotranspiration et la perte totale de chaleur turbulente [Oke 1982]. La seconde s'oriente vers le confort thermique extérieur en cherchant à évaluer le stress thermique. À cette fin, des indicateurs tels que la température physiologiquement équivalente (PET pour son acronyme anglais, *Physiologically Equivalent Temperature*) [Höppe 1999] ou l'indice thermique universel du climat (UTCI pour son acronyme anglais, *Universal Thermal Climate Index*) [Fiala 2012] sont utilisés, tous deux prenant en compte l'environnement radiatif.

Aujourd'hui, le changement climatique augmente la charge thermique dans les zones urbaines, accentuant les effets de l'îlot de chaleur urbain comme prévu par [Voogt 2002]. Cette hausse des températures dans les villes n'affecte pas seulement le confort thermique extérieur [Oke 1987] [Givoni 1998] [Pearlmutter 2006] [Chen 2012] mais elle peut également avoir un impact important sur la consommation énergétique des bâtiments [Santamouris 2001]. Cela a conduit à la recherche de méthodes portant principalement sur l'environnement radiatif. Certaines d'entre elles visent à atténuer l'impact de l'îlot de chaleur urbain sur le confort thermique extérieur, en partant de l'hypothèse que la modification du microclimat de la scène a un impact sur la ville à plus grande échelle également [Santamouris 2014] [Takebayashi 2007] [Akbari 2016].

Ce regain d'intérêt pour les échanges radiatifs dans la ville nécessite des mesures plus fines pour représenter la complexité réelle de la scène étudiée.

La température rayonnante moyenne, MRT pour son acronyme anglais *Mean Radiant Temperature* ou encore T_{mrt} est le paramètre météorologique le plus utilisé pour caractériser l'effet de l'environnement rayonnant sur le confort thermique [Fanger 1972]. La T_{mrt} est définie comme la "température uniforme d'une enceinte imaginaire dans laquelle le transfert de chaleur rayonnant du corps humain est égal au transfert de chaleur rayonnant dans une enceinte réelle non uniforme " [ASHRAE, 2001]. Bien que cet indicateur soit conceptuellement simple, il rompt le lien avec la géométrie urbaine qui est importante pour le concepteur [Givoni 1998] [Nikolopoulou 2007] et le mesurer comporte plusieurs contraintes [Kántor 2011] [Teitelbaum 2020].

L'un des moyens les plus répandus pour mesurer la T_{mrt} est le thermomètre à globe noir (Figure 5). Introduit par Vernon en 1930, il est considéré comme le premier et le plus simple des radiomètres *passifs*. Cependant, sa réponse est affectée par un autre phénomène : la convection [Bedford 1934]. Ainsi, il est difficile de quantifier le rayonnement lorsque les conditions environnementales évoluent rapidement. Puisqu'il s'agit d'une mesure intégrale du rayonnement, il combine l'effet de tout le spectre. Par conséquent, il doit être modifié pour prendre en compte les effets du rayonnement ondes courtes et ondes longues sur des corps qui ne sont pas des corps noirs [Thorsson 2007]. De plus, l'extrapolation à d'autres géométries comme le corps humain, par exemple, est problématique.

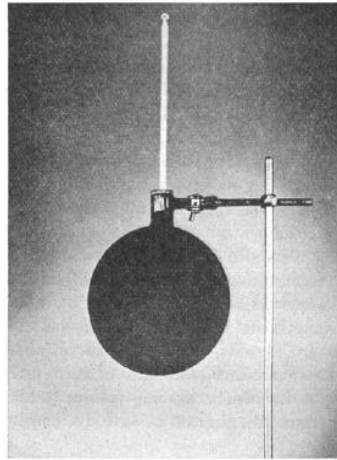


Figure 5. Thermomètre de globe noir. [Bedford 1934]

Des recherches ont été menées pour tenter de répondre à certaines de ces questions. [Richards 1951], [Koch 1961], [Gagge 1967] ont exclu l'influence du vent en utilisant des radiomètres. [Asano 1996] et [Tamura 2001] se sont concentrés sur la visualisation de la composante ondes longues à l'aide d'un scanner infrarouge. Asano a proposé d'installer l'équipement à l'intérieur d'un camion d'observation où un mât de 7 m de haut porte le scanner (Figure 6).

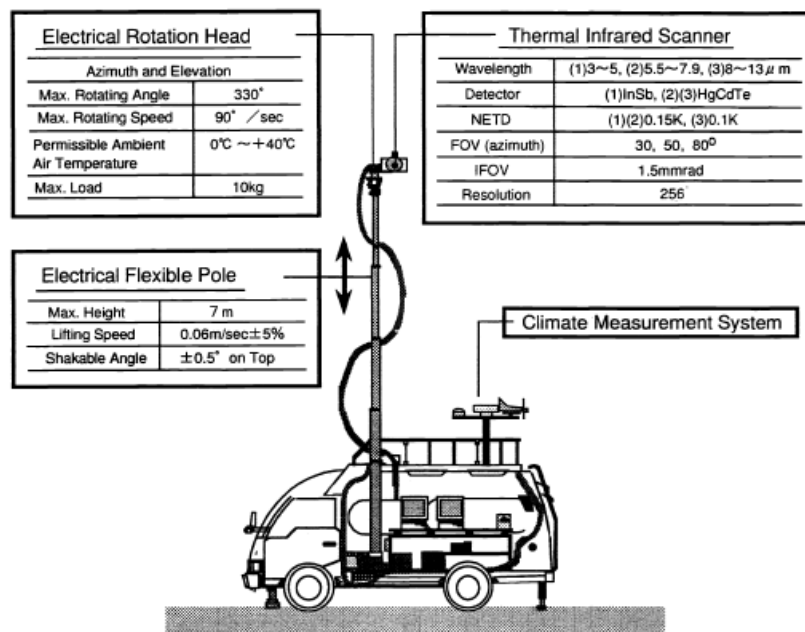


Figure 6. Spécifications du scanner infrarouge et du camion d'observation [Asano 1996]

Le travail a été poursuivi et [Tamura 2001] a proposé de réduire le temps de capture à 90 secondes et de diminuer la distorsion de l'image au moment de la capture. Il place le scanner sur un trépied et effectue deux mesures distinctes, une par hémisphère, qu'il assemble ensuite en une thermographie sphérique composite représentée par une projection cylindrique équivalente de Lambert (Figure 7).

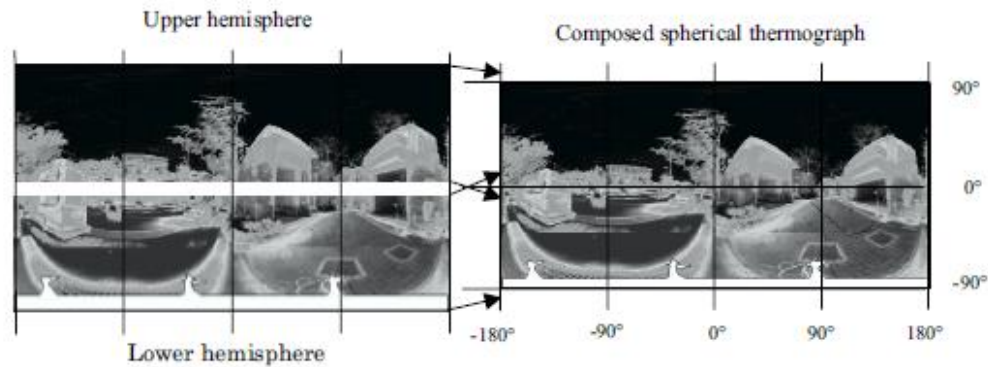


Figure 7. Thermographie sphérique Composée [Tamura 2001]

[Thorsson 2007 ; Lindberg 2008] ont effectué des mesures séparées pour les deux parties du spectre (ondes courtes et ondes longues) et ont pris en compte la distribution des flux radiatifs sur les objets non sphériques en combinant les mesures dans six directions différentes et en pondérant les valeurs (Figure 8).



Figure 8. Trois radiomètres nets (Kipp et Zonen, CNR 1), chacun mesurant séparément les quatre composantes du rayonnement : les flux de rayonnement entrant et sortant en ondes courtes et en ondes longues [Thorsson 2007]

2. Méthodes et montage du dispositif

2.1. Conventions de représentation

Pour l'affichage des images, en se basant par exemple sur la caméra thermique, la capacité à différencier les variations de température dépend largement de la sensibilité thermique de la caméra et de sa résolution spatiale. Celle-ci est définie par l'angle formé par un seul capteur sur l'axe du système optique, IFOV pour son acronyme anglais *Instantaneous Field Of View*. La sensibilité thermique et de la résolution spatiale sont toutes deux des caractéristiques spécifiques à chaque appareil. Toutefois, la capacité à reconnaître ces variations dépend fortement de la capacité de l'observateur à différencier les couleurs qui les représentent. En conséquence, elle dépend essentiellement de la palette de couleurs avec laquelle l'image est représentée.

Même si l'interprétation d'une image peut être subjective, la présentation de l'image peut affecter la capacité d'un observateur à en identifier certaines particularités. La sélection minutieuse d'une palette de couleurs facilite son analyse en mettant en évidence des caractéristiques importantes ou en cachant des informations qui pourraient distraire l'observateur. Dans cette étude, trois catégories d'informations différentes sont identifiées et chacune est associée à une palette de couleurs : La température apparente de la scène ; L'énergie (radiance ou irradiance) mesurée sur la scène ; Le résultat d'un bilan.

Lors de l'étude de la température, la perception de l'observateur est importante. Pour maximiser la résolution perceptuelle d'une image, il est souhaitable de la représenter

à travers une palette de couleurs dont la luminosité varie entre l'absence totale de luminosité (noir) et la luminosité maximale possible (blanc). Une gradation perceptiblement uniforme est nécessaire pour apprécier les détails dans les zones peu contrastées de l'image. Bien que l'échelle de gris satisfasse à cette condition, la vue humaine ne peut distinguer qu'environ 128 nuances de gris et la combinaison de plusieurs nuances de gris entraîne des contrastes simultanés qui nuisent à la perception de l'observateur. Pour faciliter son travail, il est nécessaire d'inclure une variation chromatique. La progression de couleurs noire, violette, orange, jaune est identifiée avec la température et c'est l'une des plus utilisées pour représenter les thermographies (Figure 9).

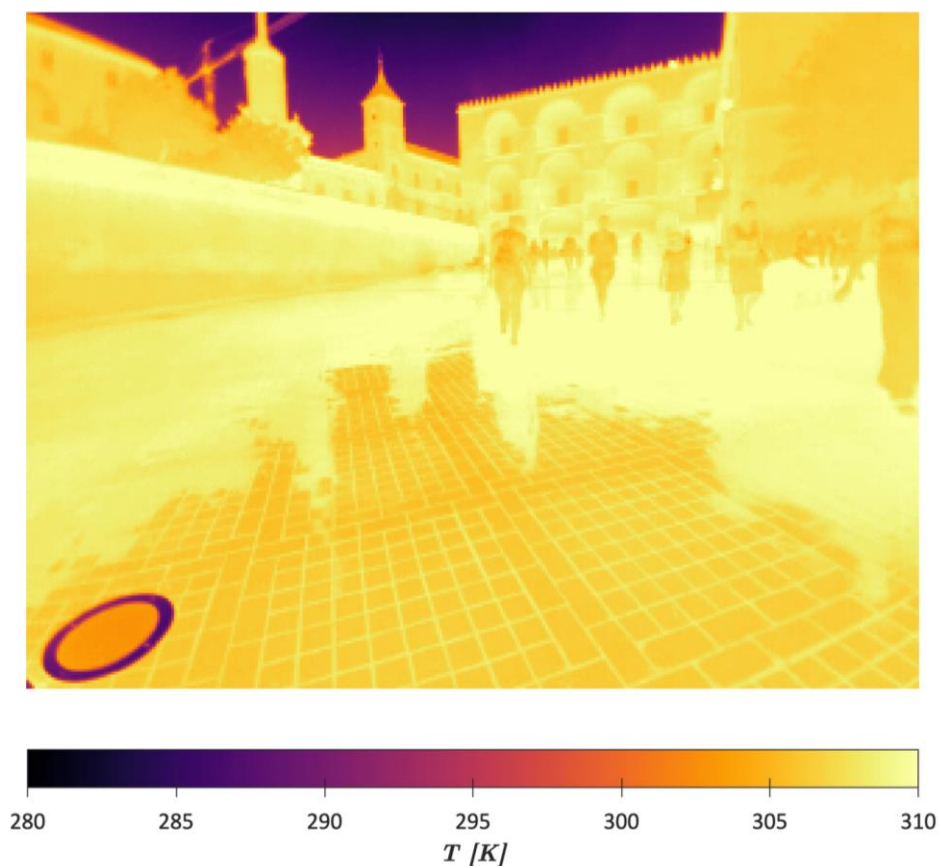


Figure 9. Exemple d'une carte des températures apparentes.
(avec échelle de couleurs noire, violette, orange, jaune)

Quand on observe les radiances ou l'énergie de la scène, il est nécessaire d'identifier clairement les différentes régions de l'image. La progression : bleu, vert, jaune, rouge permet de le faire facilement (Figure 10). Cette palette de couleurs, qui est particulièrement utilisée par la communauté qui étudie le climat, est basée sur les

relations entre le bleu - froid (valeurs basses) et le rouge - chaud (valeurs élevées). De plus, la familiarité de la palette permet à l'observateur de relier rapidement les couleurs de l'image aux valeurs scalaires.

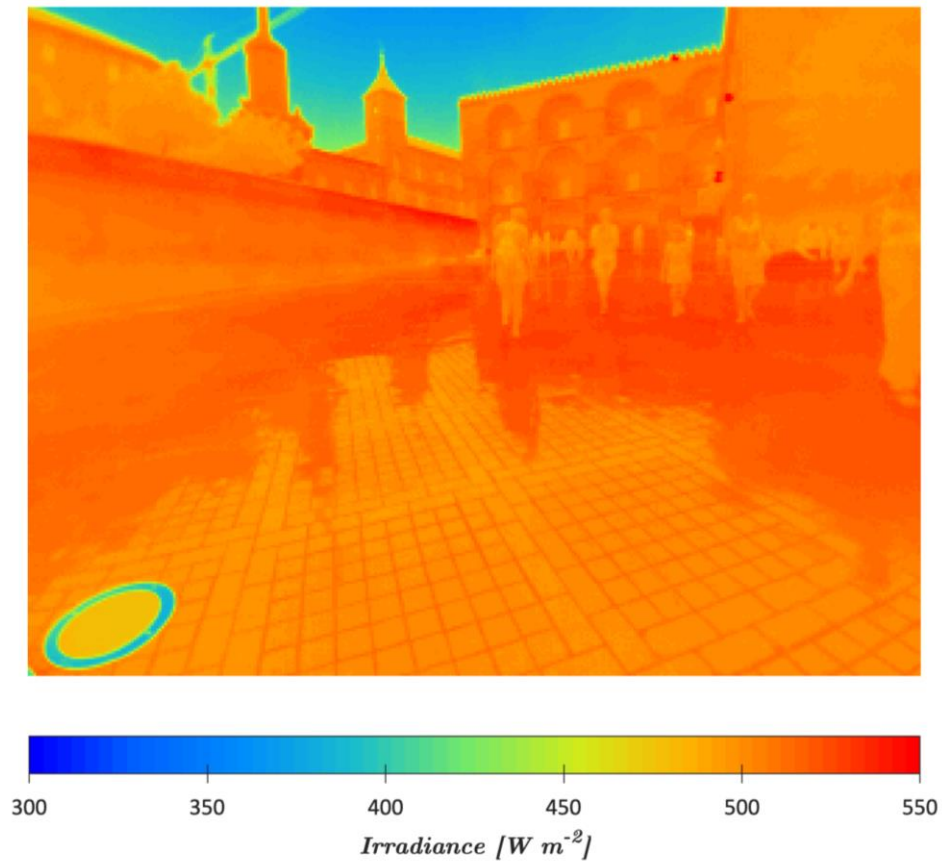


Figure 10. Exemple d'une carte des irradiances.
(avec échelle de couleurs bleu, vert, jaune, rouge)

Pour apprécier le résultat d'un bilan, il est nécessaire de centrer la palette de couleurs sur l'objet d'intérêt. C'est pourquoi une palette de couleurs divergentes est utilisée, bleu, blanc, rouge (Figure 11). Cela divise visuellement les valeurs scalaires en trois groupes : faible, moyen et élevé. En partant de la couleur blanche, la connotation bleue - froide et rouge - chaude permet d'identifier les gains et les pertes par rapport à l'objet d'intérêt.

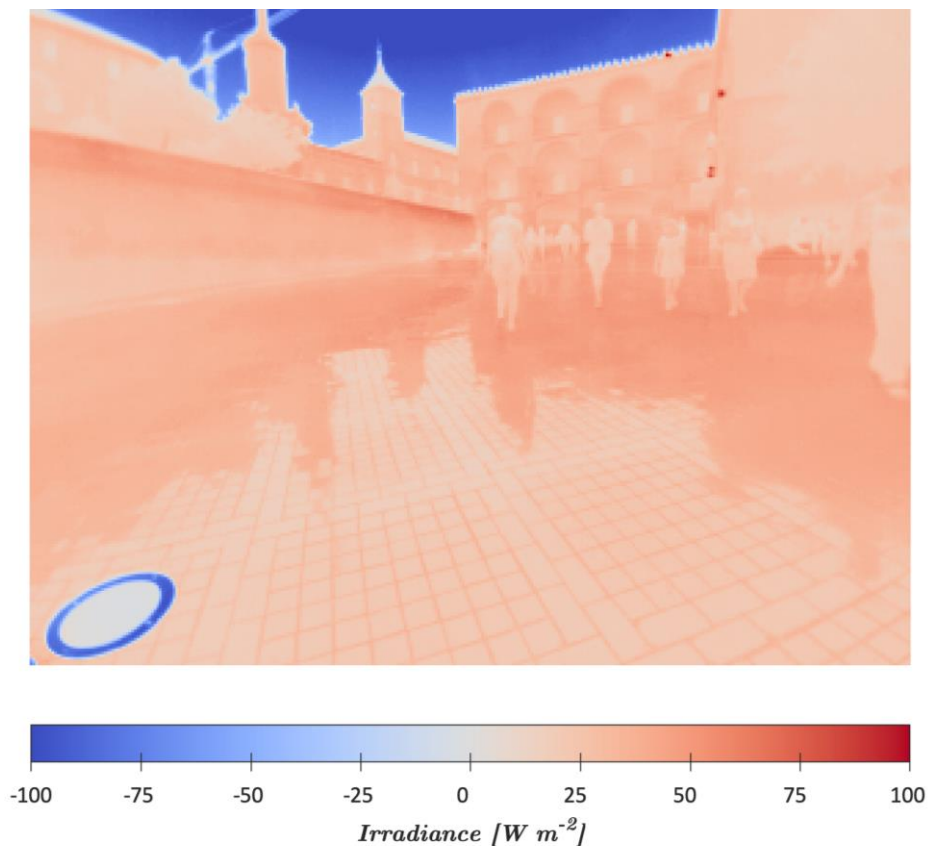


Figure 11. Exemple d'une carte des irradiances relatives à un observateur à 303 K (avec échelle de couleurs bleu, blanc, rouge)

En ce qui concerne l'orientation, lorsqu'une image représente toute la sphère, les images sont orientées Sud. Cela facilite l'observation de la trajectoire solaire et permet d'analyser l'influence du soleil sur la scène indépendamment de l'heure à laquelle la mesure est effectuée. En outre, pour l'orientation locale dans l'image, il est possible de superposer des axes gradués sur la latitude 0 et la longitude 0, ce qui permet à l'observateur de naviguer dans l'image selon deux angles. L'angle d'élévation, par rapport à l'horizon (latitude 0) et l'azimut par rapport au sud.

2.2. Matériel

Le dispositif monté pour cette étude consiste en un trépied équipé d'une tête panoramique programmable sur laquelle est placée une caméra, thermographique ou photographique.

La caméra thermique utilisée est une caméra thermique FLIR T460 équipée d'un objectif grand angle FLIR T197412. Son champ de vision est de $73^\circ \times 90^\circ$. Il s'agit d'une caméra LWIR. Son spectre de mesure est compris entre $7,5 \mu\text{m}$ et $13 \mu\text{m}$.

L'appareil photographique est un Canon PowerShot SX40 HS avec un kit de développement Canon Hack pour assurer le contrôle et l'exécution complète de la séquence de commande. Son champ de vision est de $75,3^\circ \times 59,3^\circ$. Comme la plupart des appareils photographiques numériques, il est équipé d'un filtre (*hot mirror*) placé devant le capteur qui bloque la plupart des infrarouges et une partie des ultraviolets. Son spectre de mesure est compris entre 380 nm à 780 nm.

Ces deux caméras sont montées, individuellement, sur un trépied équipé d'une tête panoramique programmable CLAUSS RODEON piXplorer qui les fait tourner verticalement et horizontalement, avec une résolution angulaire de $0,015^\circ$.

Ce dispositif léger et portable assure la répétabilité pour chaque prise en contrôlant la position de la caméra. Cela permet aussi d'identifier la direction de chaque pixel de l'image.

2.3. Bases de la radiométrie par imagerie

Les caméras thermiques et photographiques ont des composants optiques et électroniques capables de détecter et de mesurer l'énergie électromagnétique (énergie rayonnante) qui est ensuite affichée sous forme de couleurs (valeurs tristimulus) températures [Jensen 2009].

La visualisation de l'énergie rayonnante permet de comprendre facilement la scène car les couleurs et les températures sont liées à la perception. Néanmoins, elles sont la conséquence d'un post-traitement basé sur des hypothèses prises par l'opérateur lors de la mise en place du dispositif avant la capture. Certains de ces paramètres sont l'émissivité, la distance, la balance des blancs et le temps d'exposition.

La grandeur étudiée par la radiométrie d'imagerie est la radiance. Celle-ci est définie comme le flux radiant d'un émetteur dont la surface passe à travers une surface normale à la direction d'émission. Puisque cette surface définit un angle solide dans cette direction, la radiance est une véritable mesure de la quantité de rayonnement qui est émise, réfléchi ou transmise dans une certaine direction et avec un certain angle solide. La radiance est simplement le flux énergétique qui se propage selon une direction par unité de surface perpendiculaire et par unité d'angle solide.

$$L = \frac{d^2P}{\cos \theta d\Omega dA} \quad (1)$$

Où dP représente le flux énergétique, θ la direction, $d\Omega$ l'angle solide élémentaire et dA la surface élémentaire.

L'analyse de la radiance présente certains avantages. En raison de la linéarité du capteur, la réponse mesurée est linéaire avec l'énergie incidente (radiance) alors que la température est non linéaire. En outre, la comparaison radiométrique entre différents objets a tendance à présenter moins d'incertitude car moins d'hypothèses sont prises, et la conversion en température effective du corps noir est simple.

Les caméras thermiques et photographiques mesurent la radiance d'une scène, chacune dans une bande spectrale différente, car l'atténuation dépend fortement de la longueur d'onde. Les appareils d'imagerie ont des plages spectrales de mesure, qui comprennent le visible ($\sim 0.4 - 0.7 \mu\text{m}$), l'infrarouge ondes courtes (SWIR $\sim 1 - 2 \mu\text{m}$), l'infrarouge ondes moyennes (MWIR $\sim 3 - 5 \mu\text{m}$) et l'infrarouge ondes longues (LWIR $\sim 8 - 14 \mu\text{m}$).

Alors que l'atmosphère est semi-transparente pour le domaine visible (la diffusion des gaz et des aérosols n'est pas négligeable), pour l'infrarouge, il est nécessaire de mesurer à travers les "fenêtres atmosphériques" (Figure 12). Puisque l'étude se concentre sur les températures de la scène, une caméra thermique LWIR est utilisée.

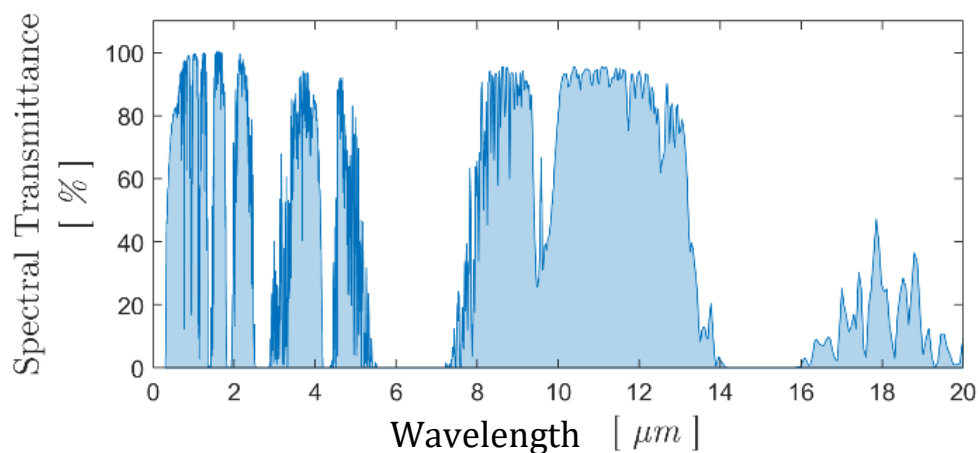


Figure 12. Transmission atmosphérique [Berk 1989]

La loi de Planck stipule que tout objet peut émettre de la radiation sur toutes les longueurs d'onde. Cependant, il ne le fait pas de façon uniforme sur l'ensemble du spectre.

Pour cette étude, les échanges radiatifs impliquent deux corps noirs, le soleil et la terre (Figure 13). Le soleil avec une température de 5778 K émet principalement en ondes courtes ($\lambda < 4 \mu\text{m}$). Le maximum de son émission λ_{max} se situe à 500 nm,

soit à proximité du centre du spectre visible. Ceci peut être retrouvé grâce à la loi de Wien où T est la température absolue [K] et b la constante de déplacement de Wien, égale à $2,897771955 \times 10^{-3}$ [m K].

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad (2)$$

La température moyenne de la terre est de 288 K, elle émet donc ondes longues ($\lambda > 4 \mu\text{m}$). Le maximum de rayonnement d'un corps noir à cette température se produit à environ $10 \mu\text{m}$, s'approchant du centre de la plage de la caméra thermique LWIR, qui va de $7,5 \mu\text{m}$ à $13 \mu\text{m}$.

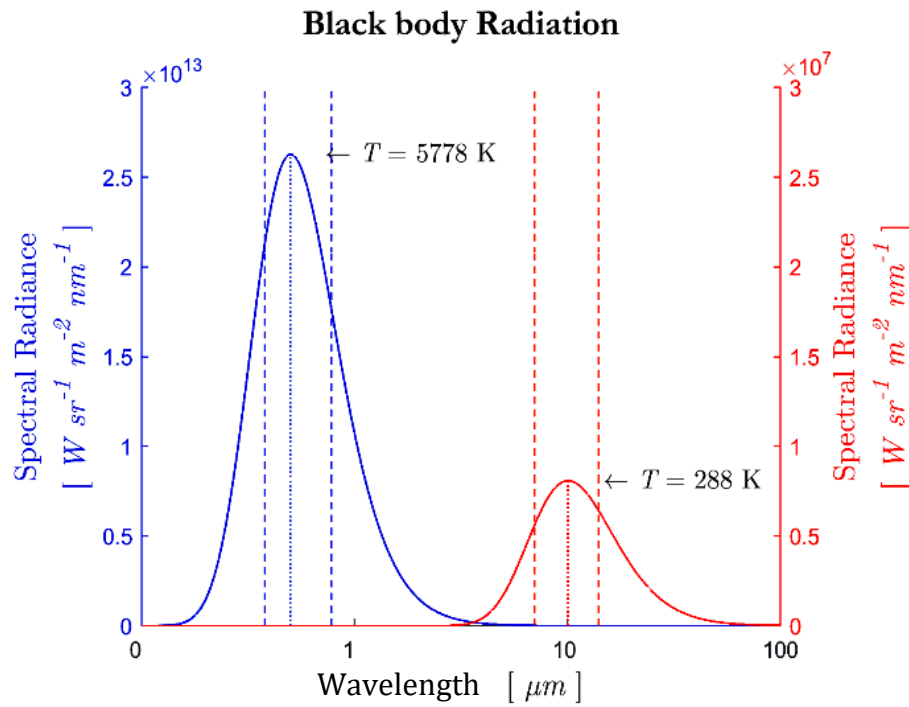


Figure 13. Domaine spectral mesuré par photographie (bleu) et par thermographie (rouge) : 380 nm - 780 nm et $7,5 \mu\text{m}$ à $13 \mu\text{m}$

La radiance spectrale du corps noir est isotrope et suit la loi de Planck. Elle est donnée par l'équation suivante, où $c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$ est la vitesse de la lumière dans le vide, $h = 6,626176 \times 10^{-34} \text{ W s}^2$ est la constante de Planck, k est la constante de Boltzmann égale à $1,380662 \times 10^{-23} \text{ W s K}^{-1}$.

$$L_e(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (3)$$

Par intégration angulaire de la luminance de Planck pondérée par la section efficace directionnelle du corps noir, on obtient la loi de Stefan Boltzmann. Elle donne l'exitance d'un corps noir en fonction de sa température.

$$M = \left(\frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} \right) T^4 \quad (4)$$

où :

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} \approx 5,67032 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4} \quad (5)$$

est la constante de Stefan-Boltzmann.

Pour un corps lambertien, ce qui est le cas du corps noir, la radiance L et l'exitance M sont liées :

$$M(T) = \pi L(T) \quad (6)$$

En considérant cette relation l'exitance peut être exprimée par la loi de Planck :

$$M = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 [e^{hc/\lambda kT} - 1]} \quad (7)$$

En regroupant les constantes de cette équation dans les deux constantes de rayonnement :

$$c_1 = 2\pi hc^2 = 3,741832 \times 10^{-16} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4} \quad (8)$$

$$c_2 = \frac{hc}{k} = 1,438786 \times 10^{-2} \text{ m K} \quad (9)$$

L'équation (7), celle-ci peut alors être simplifiée en utilisant les constantes de rayonnement :

$$M = \frac{c_1}{\lambda^5 [e^{c_2/\lambda T} - 1]} \quad (10)$$

La loi Planck est utile dans de nombreux calculs radiométriques, en effet elle permet de calculer l'exitance spectrale. Cependant, lorsque son exitance est connue, il peut s'avérer nécessaire de déterminer la température du corps noir. Cela peut être calculée par inversion de la loi de Planck sur un intervalle spectral $\Delta\lambda$.

$$T = \frac{c_2}{\ln \left[\frac{c_1 + \lambda^5 M(\lambda)}{\lambda^5 M(\lambda)} \right]} \quad (11)$$

2.4. Modèle physique de mesure *

Comme l'intégration dans tout le spectre est impossible pour une caméra thermique, il est nécessaire de trouver une réponse numérique. La méthode la plus courante est d'utiliser un modèle mathématique pour prédire la quantité de radiation thermique émise pour un corps noir et reçue par un capteur. L'équation proposée par [Sakuma 1982], dans sa forme planckienne, donne le signal électromagnétique correspondant au rayonnement thermique en fonction de la température d'un objet. Le signal peut être un flux électromagnétique ou un signal produit par un détecteur mesurant ce rayonnement.

$$s = \frac{R_1}{R_2 [e^{B/T} - F]} - O \quad (12)$$

Dans sa forme inverse, cette équation permet de calculer la température.

$$T = \frac{B}{\ln \left[\frac{R_1}{R_2(s + O)} + F \right]} \quad (13)$$

* Le code MATLAB® correspondant à cette section se trouve dans les annexes.

B , R_1 , R_2 , F et O sont des constantes déterminées pour obtenir le meilleur ajustement de la fonction (12) aux points de calibration. Sur la base de l'équation (13), la caméra infrarouge convertit le signal du capteur s en température T pour une plage spécifiée de longueurs d'onde de rayonnement (λ_1 , λ_2). Ainsi, B correspond à c_2/λ' , avec $\lambda' = 10\mu m$ compris dans l'intervalle spectral de la caméra.

Ces constantes sont stockées dans la mémoire du microcontrôleur de la caméra, qui calcule à chaque fois la température mesurée T sur la base des signaux numérisés s du détecteur.

Ce signal correspond aux flux thermiques qui atteignent le capteur. Dans un schéma simplifié (Figure 14), ceux-ci proviennent de trois éléments de la scène : L'objet de l'étude, la réflexion de l'environnement sur celui-ci et l'atmosphère.

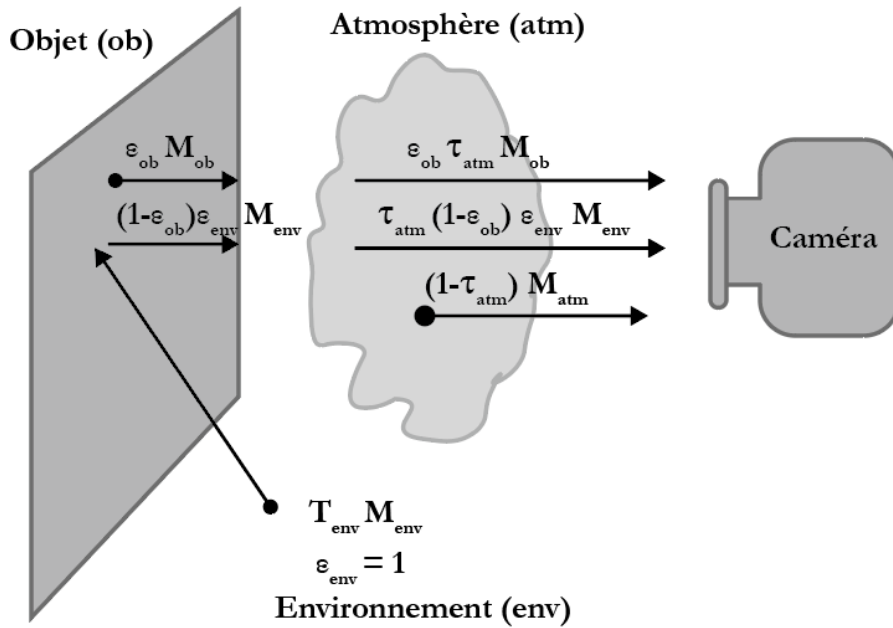


Figure 14. Interaction des flux radiatifs lors de la mesure avec une caméra infrarouge d'après [Minkina 2009]

Par conséquent, le modèle physique de la mesure peut être exprimé comme suit :

$$s = \varepsilon_{ob} \tau_{atm} s_{ob} + \tau_{atm} (1 - \varepsilon_{ob}) s_{env} + (1 - \tau_{atm}) s_{atm} \quad (14)$$

où : s est le signal du détecteur correspondant à l'intensité totale du rayonnement thermique arrivant au capteur ; s_{ob} est le signal que mesurerait la caméra si l'objet observé était un corps noir de même température que l'objet observé et s'il n'y avait pas d'atmosphère entre l'objet observé et la caméra. De même, $(1 - \tau_{atm})s_{atm}$ est le signal dû à l'émission thermique de l'atmosphère entre la caméra et l'objet observé sachant que τ_{atm} est la transmittance de l'atmosphère entre la caméra et l'objet observé. $(1 - \tau_{atm})$ est donc une émissivité atmosphérique dans la mesure où la diffusion est négligée. $(1 - \varepsilon_{ob})s_{env}$ est le signal correspondant à l'intensité du rayonnement thermique provenant d'autres éléments de la scène réfléchi sur l'objet observé. Grâce à cette dernière hypothèse, il est possible de dériver le signal du capteur correspondant exclusivement au flux radiatif de l'objet d'étude s_{ob} en utilisant les équations (12) et (14) :

$$s_{ob} = s \frac{1}{\varepsilon_{ob}\tau_{atm}} - \left[\frac{1 - \varepsilon_{ob}}{\varepsilon_{ob}} \frac{R_1}{R_2 [e^{B/T_{env}} - F]} - O + \frac{1 - \tau_{atm}}{\varepsilon_{ob}\tau_{atm}} \frac{R_1}{R_2 [e^{B/T_{atm}} - F]} - O \right] \quad (15)$$

et sa température T_{ob} en résolvant l'équation (13) pour s_{ob} .

Ainsi, la température mesurée avec la caméra thermique est une fonction de six variables : le signal s et des valeurs fixées d'émissivité de l'objet ε , la température atmosphérique T_{atm} , la température ambiante T_{env} , la distance caméra-objet d et humidité relative atmosphérique $\omega\%$.

2.5. Radiance d'une scène

La grandeur étudiée par la radiométrie d'imagerie est la radiance. Pour retrouver les radiances, ondes longues, à partir de l'image capturée avec la caméra thermique LWIR, le processus est simple. En considérant que l'émissivité de l'ensemble de la scène est celle d'un corps noir et que l'atmosphère est parfaitement transparente, l'image affiche une température équivalente à celle du corps noir et il est alors possible de calculer la radiance en utilisant les équations (4) et (5). Ces relations montrent que le rapport entre l'émittance et la radiance d'une surface lambertienne est le facteur de π . Pour une telle surface, l'énergie émise diminue avec le $\cos \theta$, tout comme la surface projetée de l'hémisphère lorsque la direction d'observation s'écarte de la normale à la surface. Ainsi, la radiance est définie par unité de surface visible. Pour un point au centre d'une sphère, cette surface visible est la sphère entière, soit un facteur de 4π .

Pour retrouver les radiances ondes courtes il est nécessaire de capturer des photographies à grande plage dynamique (HDR).

Les photographies HDR sont faites en combinant plusieurs images d'une même scène et en modifiant seulement leur exposition [Debevec 2008]. Elle peut être modifiée en faisant varier trois paramètres : l'ouverture, la sensibilité du capteur à la lumière et la vitesse d'obturation. Le premier a un impact sur la profondeur de champ, le deuxième, la sensibilité ISO, a un effet sur le bruit de la photographie tandis que la vitesse d'obturation ou temps d'exposition influence la manière dont les objets en mouvement sont capturés. L'objectif de cette étude est d'observer l'environnement radiatif dans les scènes architecturales et urbaines, lorsque celles-ci sont considérées comme statiques. Pour cette étude, le seul paramètre qui varie est le temps d'exposition, tout en maintenant une balance des blancs constante.

L'utilisation de temps d'exposition différents permet d'échantillonner la fonction de réponse de la caméra (dite courbe de Hurter-Driffield ou fonction g) à différents points de fonctionnement, évitant ainsi la saturation pour certaines des expositions et permettant d'observer les détails dans les zones sombres et claires. La Figure 15 est la représentation graphique de la densité optique de l'image en fonction du logarithme de l'exposition [Hurter-Driffield 1890]. Grâce à cela, il est possible de récupérer les valeurs de luminance.

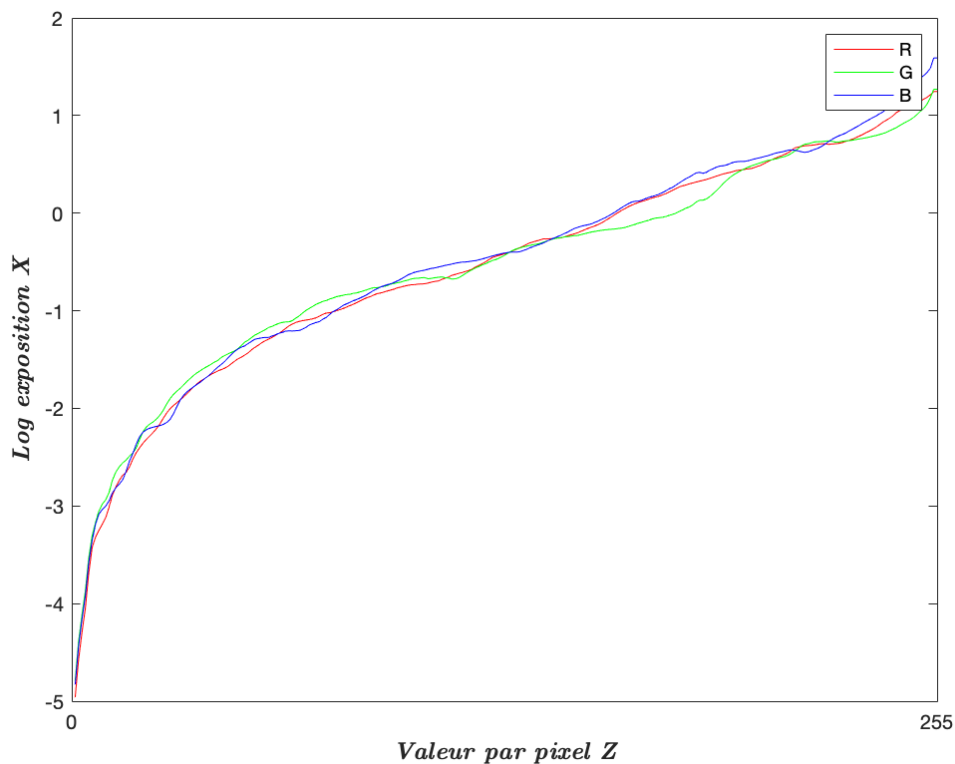


Figure 15. Courbe de réponse pour l'appareil photographique Canon PowerShot SX40 HS

Pour obtenir cette courbe, il est nécessaire de calibrer la caméra. Puisque le processus d'étalonnage est indépendant il peut être réalisé avant ou après la prise de mesure, cependant, il est nécessaire d'avoir balayé la plage dynamique correspondant à la scène d'intérêt avec un nombre suffisant de photographies. Ce nombre a été discuté dans la littérature et en général, il a été établi que 3 images sont suffisantes pour reconstruire la fonction de réponse de la caméra [Grossberg 2003]. Toutefois, ce nombre ne peut pas être considéré comme définitif et doit correspondre aux conditions présentes sur chaque scène.

Pour reconstruire la courbe de réponse de la caméra, il faut partir de l'exposition de chaque image. L'exposition X est définie comme le produit de l'irradiance E reçue sur le capteur et du temps d'exposition Δt . Lors de la capture d'une image avec un appareil photographique numérique chaque pixel correspond à une valeur Z . Ceci est le résultat d'une fonction non linéaire de l'exposition du capteur respectif.

$$X = E \Delta t \quad (16)$$

[Debevec 2008] inverse cette fonction et applique le logarithme népérien aux deux côtés de l'équation. Il faut ensuite la résoudre pour chaque valeur de Z_{ij} où i correspond à l'indice du pixel et j à l'indice de temps d'exposition. Pour simplifier la notation, cette fonction est exprimée comme suit :

$$g(Z_{ij}) = \ln E_i + \ln \Delta t_j \quad (17)$$

Il existe plusieurs algorithmes [Aguerreberre 2014] pour combiner différentes images LDR (P) dans une seule image HDR. Ils suivent tous la même approximation, où l'éclairement énergétique est estimé sous la forme d'une moyenne pondérée puisqu'il existe une relation directe entre la luminance d'un objet observé et l'illuminance de l'image obtenue sur le capteur.

$$\ln E_i = \frac{\sum_{j=1}^P w(Z_{ij})(g(Z_{ij}) - \ln \Delta t_j)}{\sum_{j=1}^P w(Z_{ij})} \quad (18)$$

La luminance est ensuite calculée en utilisant toutes les expositions disponibles pour chaque pixel. Toutefois, chacun des algorithmes a une fonction de pondération w différente (Figure 16).

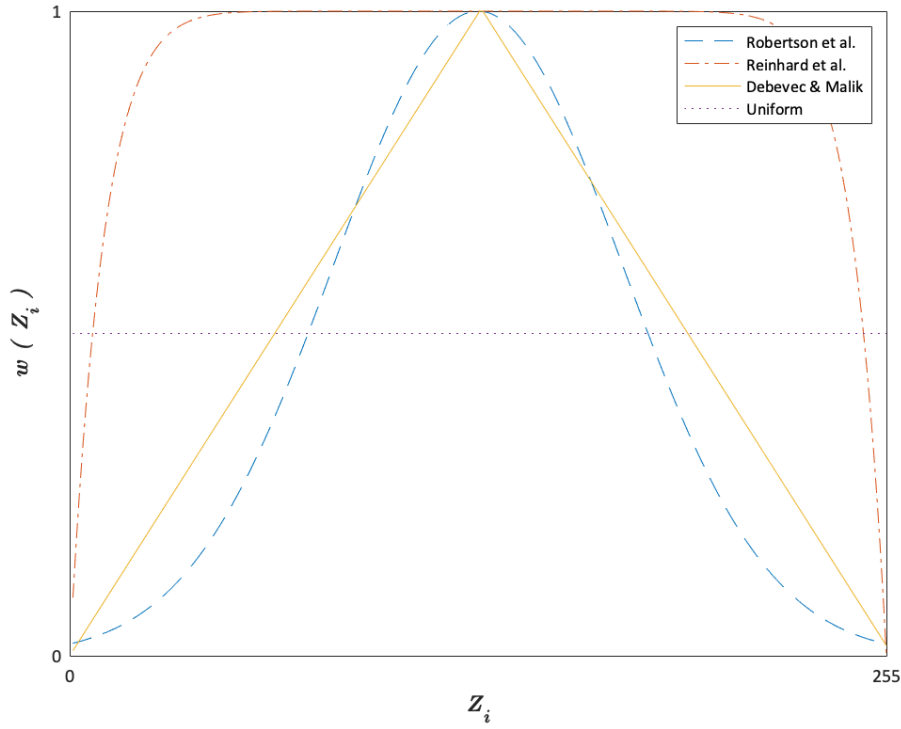


Figure 16. Différentes fonctions de pondération w [Robertson 2003], [Reinhard 2010] et [Debevec 2008]

Tout le monde convient que la fonction de réponse de la caméra est plus prononcée dans les valeurs moyennes, [Robertson 2003] propose une fonction de type Gaussien. Celle-ci est ajustée de façon à ce que $w_0 = 0$, $w_{255} = 0$ et $w_{127.5} = 1$. De plus, il inclut le paramètre W qui détermine un niveau de confiance dans les observations.

$$w = e^{-W \frac{(z_{ij} - 127.5)^2}{127.5^2}} \quad (19)$$

Cette étude utilise la pondération proposée par Robertson en raison de la flexibilité qu'elle offre et de sa facilité de mise en œuvre.

Pour capturer le rayonnement de la scène ondes courtes, des images à grande plage dynamique (HDR) sont produites en combinant plusieurs expositions de la même photographie (Figure 17) [Debevec 2008]. Le temps de capture est faible et, par

conséquent, la scène est considérée comme statique. Le résultat s'évalue avec un luminancemètre pour assurer un calibrage correct. Ensuite, pour supprimer la correction due à la perception du flux lumineux introduit pour la vision humaine, il est nécessaire de multiplier chaque composante RGB par son coefficient correspondant [Poynton 2003].

$$L_e = 0.2126 R + 0.7152 G + 0.0722 B \quad (20)$$

À travers ce processus, l'énergie mesurée entre $7,5 \mu\text{m}$ à $13 \mu\text{m}$ pour la thermographie et 380 nm - 780 nm pour la photographie permet d'estimer les radiances des scènes ondes longues et ondes courtes pour l'ensemble du spectre. Cependant, le processus n'est pas le même pour le ciel. Il présente des caractéristiques particulières, qui nécessitent une approche différente.

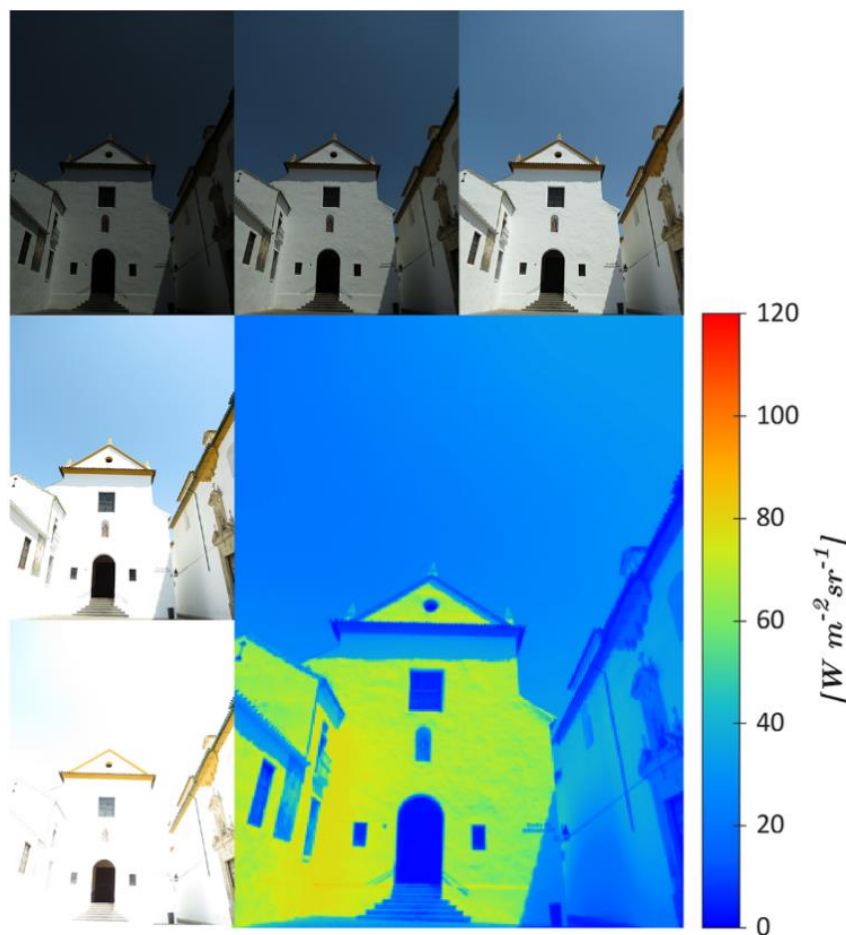


Figure 17. Photographies à plusieurs expositions et leur carte de radiance correspondante.

2.6. Radiance du ciel

Le ciel est impliqué dans l'échange radiatif de la plupart des scènes urbaines. En ondes longues, sa contribution est faible. Cependant, son influence est importante et est due à sa température faible mais avec beaucoup de fluctuations. En ondes courtes, le ciel contient les deux principales sources de rayonnement : la voûte céleste (diffuse) et le soleil (direct).

Observation de l'atmosphère en ondes longues

Contrairement aux autres éléments de la scène, l'atmosphère mérite un traitement différent en ondes longues, où elle ne peut être assimilée à un corps noir.

Un calcul de l'émission atmosphérique utilisant le modèle MODTRAN [Berk 1989] illustre la relation entre un ciel clair et un ciel couvert en les comparant tous deux à un corps noir à la température de l'air (Figure 18). La radiance spectrale de l'atmosphère peut être considérée comme une relation entre la radiance d'un corps noir à la température de l'air et la transmittance atmosphérique. Par conséquent, son émissivité n'est équivalente à celle d'un corps noir que lorsque la transmission est faible.

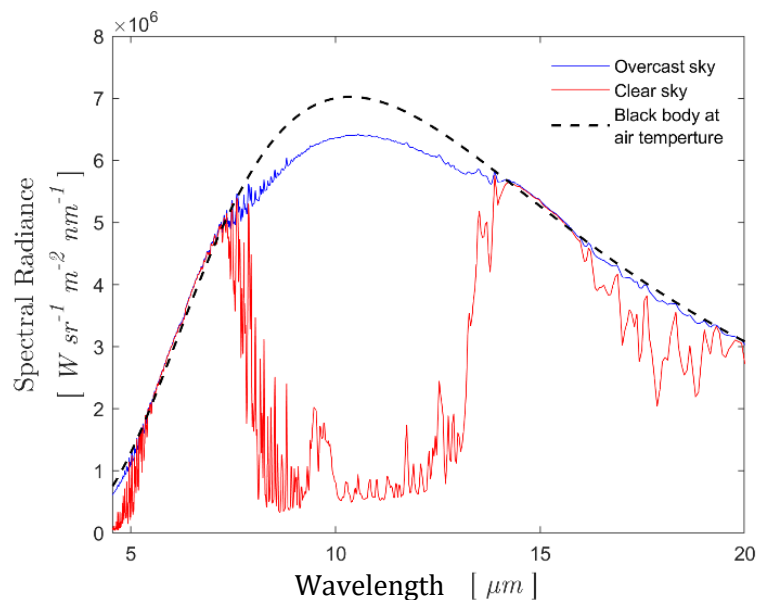


Figure 18. Radiance du corps noir à 288 K (ligne pointillée) et radiance émise dans l'atmosphère (ligne continue) pour un :
a) Ciel couvert ; b) Ciel clair.

Le ciel complètement couvert rayonne comme un corps noir. Au contraire, la température d'un ciel clair est inférieure au zénith et en s'approchant de l'horizon, elle atteint la température de l'air. Dans ce cas, l'atmosphère présente une faible émissivité et la température enregistrée par la caméra est le résultat du rayonnement thermique provenant de l'atmosphère à l'intérieur de la fenêtre atmosphérique.

[Kruczek 2015] montre que, dans les plages des fenêtres atmosphériques, l'intégrale de la radiance spectrale émise par l'atmosphère peut être assimilée à celle d'un corps noir à la température apparente. En dehors de la fenêtre atmosphérique, l'atmosphère se comporte comme un corps noir à la température de l'air (équation 21). Par conséquent, le flux total peut être déterminé comme la somme des émissions à l'intérieur et à l'extérieur des fenêtres atmosphériques (Figure 19).

$$L_e = \sum_{i=1}^n \int_{\lambda_{p,i}}^{\lambda_{k,i}} L_{\lambda}(\lambda, T_{app}) d\lambda + \sum_{l=1}^m \int_{\lambda_{p,l}}^{\lambda_{k,l}} L_{\lambda}(\lambda, T_{atm}) d\lambda \quad (21)$$

Où : $\lambda_{p,i}$, $\lambda_{k,i}$ et $\lambda_{p,l}$, $\lambda_{k,l}$ - limites spectrales des plages pour la fenêtre atmosphérique i et la bande de rayonnement actif atmosphérique l . n , m sont le nombre de fenêtres atmosphériques et de bandes actives respectivement, T_{atm} est la température de l'air atmosphérique et T_{app} la température mesurée par la caméra LWIR.

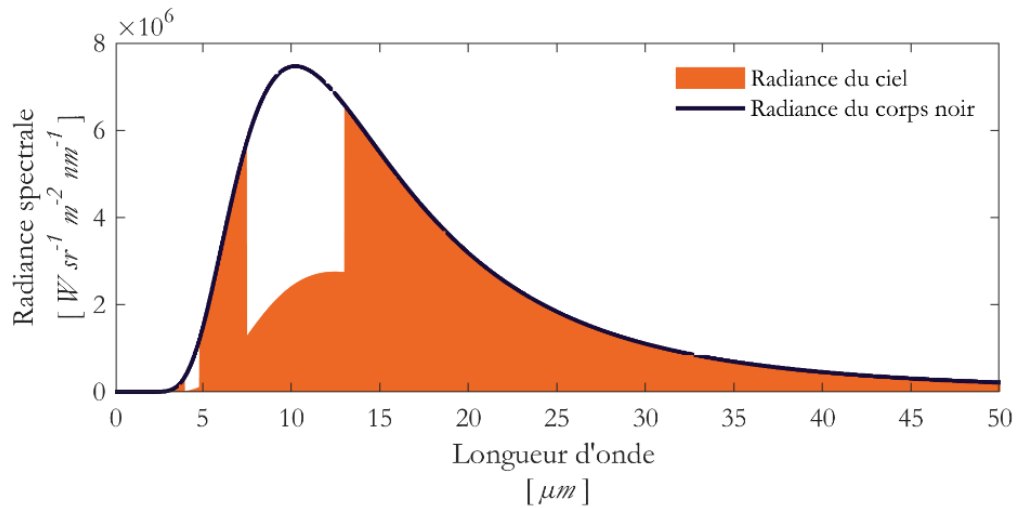


Figure 19. Comparaison entre le rayonnement d'un corps noir à la température de l'air et le rayonnement du ciel.

Pour l'illustrer, on peut se concentrer sur deux images capturées avec des angles d'élévation différents, projetées sur un segment sphérique. Ces deux images couvrent tous les angles entre l'horizon et le zénith avec une ouverture de $\pi/6$ radians.

La Figure 20 montre le profil de température apparente correspondant au ciel clair. Ce profil de température a été extrait d'un image sphérique prise au centre de la rue des Tonnelliers le 19 février 2019 à 22h. Il existe une différence de température apparente de plus de 50 K entre l'horizon et le zénith.

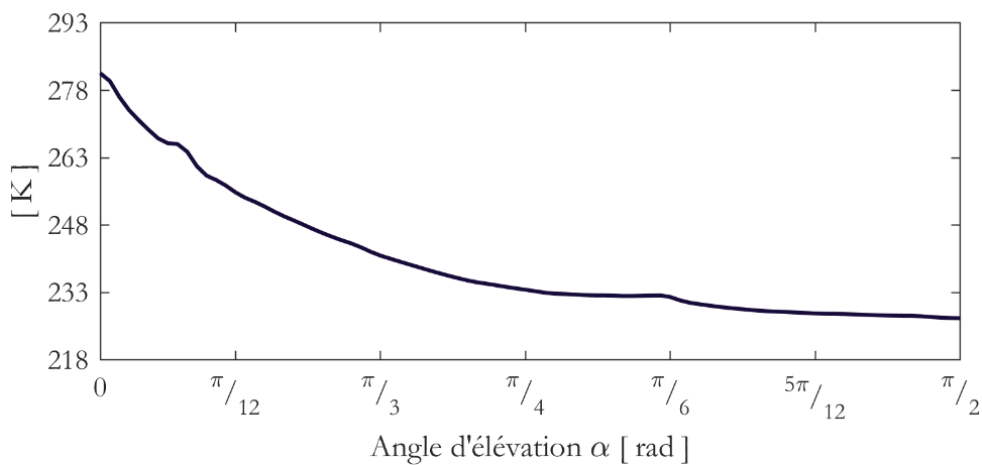


Figure 20. Profil de température apparente du ciel mesuré le 19 février 2019 à 22h00.

En supposant que la température du ciel varie en fonction de l'angle zénithal mais pas en fonction de l'angle azimutal, ce profil de température permet de construire une distribution hémisphérique de la température apparente du ciel au moment de la mesure.

Dans la Figure 21 on observe que la température apparente montre un ciel plus froid qu'il ne l'est en réalité. Après correction, sa température augmente d'environ 30 K. Des différences similaires ont déjà été observées dans la littérature [Takagi 1967] [Asano 1996] [Ångström 1915].

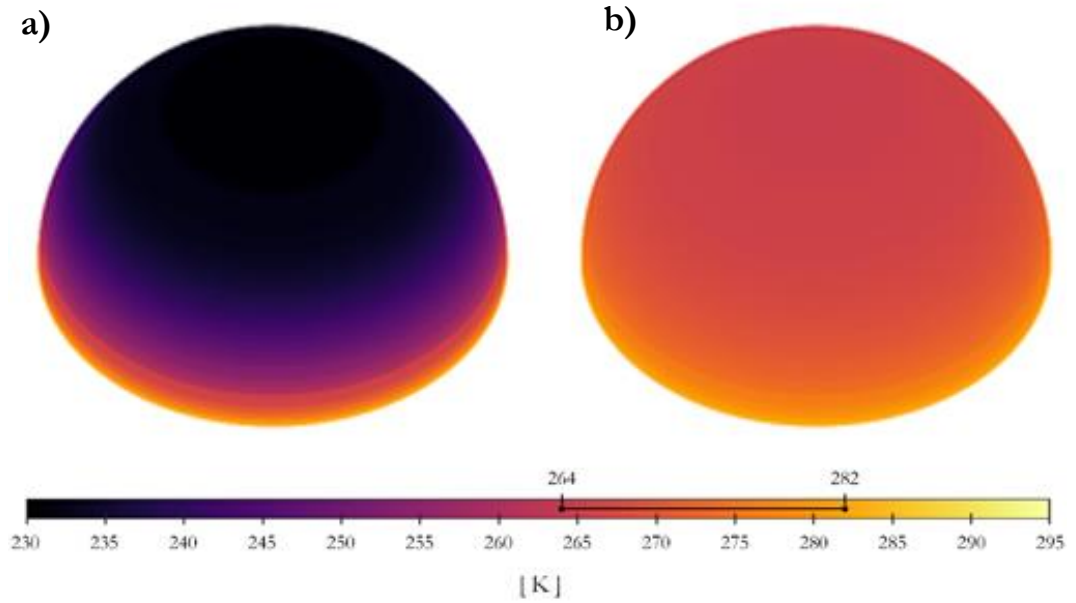


Figure 21. Distribution d'un profil de température sur l'hémisphère.
a) Température apparente b) Température corrigée

Ces résultats de la distribution du rayonnement du ciel permettent une comparaison avec les modèles de ciel IR [Nahon 2019]. Pour ceux-ci, la température effective ou équivalente décrit la température de l'atmosphère. Elle fournit une approche pratique pour se rapprocher du transfert thermique par rayonnement infrarouge provenant du ciel.

$$\phi_{sky} = \sigma T_{sky}^4 \quad (22)$$

Où, ϕ_{sky} est le rayonnement ondes longues atmosphérique exprimé en W m^{-2} , σ la constante de Stefan-Boltzmann égale à $5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ et T_{sky} la température effective du ciel exprimé en K.

Modèles de ciel ondes longues

Les modèles les plus largement utilisés sont basés sur des relations empiriques. Ils sont obtenus par des équations de régression faites pour s'ajuster aux mesures expérimentales. Ces modèles introduisent le concept d'émissivité du ciel, qui est définie comme le rapport entre la radiance du ciel et la radiance environnante.

$$\varepsilon_{sky} = \frac{T_{sky}^4}{T_{atm}^4} \quad (23)$$

Où, ε_{sky} est l'émissivité du ciel et T_{atm} la température de l'air exprimé en K.

Les modèles plus courants sont ceux de Clark-Allen [Clark 1978] et de Martin-Berdahl [Martin 1984b ; Berdahl 1984] pour estimer l'émissivité globale du ciel.

Ces modèles sont basés sur les conditions météorologiques locales. Dans les deux cas, le point de départ est la température du point de rosée et leur protocole pour générer un modèle du ciel est le même. Celui-ci est divisé en deux étapes :

- D'abord, ε_{clear} , l'émissivité dans des conditions de ciel clair est calculée.
- Ensuite, ε_{sky} , l'émissivité du ciel est obtenue en appliquant une correction pour la couverture nuageuse.

Martin et Berdahl proposent dans les étapes précédentes, une distribution angulaire de l'émissivité [Martin 1984a] utile lors de la projection d'images sur l'hémisphère.

Modèle de Martin et Berdahl

Le travail de Martin et Berdahl commence par une campagne de mesures effectuée en 1979 par Berdahl et Fromberg où ils expliquent les caractéristiques du rayonnement thermique dans le ciel et esquissent une relation entre l'émissivité du ciel et la température du point de rosée [Berdahl 1982]. Plus tard, Martin et Berdahl ont fait deux publications dans lesquelles la relation préconisée a été épurée grâce à 5 ans de mesures où ils ont montré que l'émissivité directionnelle du ciel pouvait être estimée à partir de son émissivité globale [Martin 1984a ; Martin 1984b]. Pour ce modèle la mise en œuvre est simple et le processus se déroule en quatre étapes :

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

L'émissivité du ciel clair est calculée à partir de la température du point de rosée [°C] et de la pression de la station [mbar] à l'aide des équations suivantes. Tout d'abord, l'émissivité ε_m est calculée comme une moyenne mensuelle en utilisant la relation suivante :

$$\varepsilon_m = 0.711 + 0.56 \left(\frac{T_{dp}}{100} \right) + 0.73 \left(\frac{T_{dp}}{100} \right)^2 \quad (24)$$

Une correction de jour doit être ajoutée pour calculer l'émissivité horaire ε_h .

$$\varepsilon_h = 0.013 \cos \left[2 \pi \frac{t}{24} \right] \quad (25)$$

Une correction supplémentaire ε_e doit être prise en compte. Elle correspond à l'altitude où les mesures ont été effectuées.

$$\varepsilon_e = 0.00012 (P - 1000) \quad (26)$$

Dans ces expressions, t est l'heure de la journée ; T_{dp} , la température du point de rosée exprimé en °C et P , la pression de la station exprimé en mbar.

La somme de ces trois résultats correspond à l'émissivité globale du ciel clair, ε_{clear} .

$$\varepsilon_{clear} = \varepsilon_m + \varepsilon_h + \varepsilon_e \quad (27)$$

Pour tenir compte de la présence des nuages dans le ciel, il est nécessaire d'inclure un facteur de correction pour la couverture nuageuse. Martin et Berdahl ont développé un modèle basé sur la fraction du ciel nuageux (C) [Martin 1984b]. Cet indice est égal à 0 lorsque le ciel est dégagé et il est égal à 1 pour un ciel couvert. Ce modèle prend en compte les hypothèses suivantes :

- L'émissivité, n_{opaque} , des nuages opaques est supposée égale à 1.
- L'émissivité, n_{thin} , des nuages fins est supposée égale à 0.4.
- La hauteur de la base des nuages, h_0 , est constante et égale à 8,2 km
- La hauteur des nuages fins, h_{thin} est supposée constante et égale à 8 km
- La hauteur des nuages opaques, h_{opaque} est supposée constante et égale à 2 km

$$C_{thin} = n_{thin} \varepsilon_{thin} e^{-h_{thin}/h_0} \quad (28)$$

$$C_{opaque} = n_{opaque} \varepsilon_{opaque} e^{-h_{opaque}/h_0} \quad (29)$$

$$C = C_{thin} + C_{opaque} \quad (30)$$

La variable n est la fraction de la couverture nuageuse, sa valeur est comprise entre 0 et 1. ε est l'émissivité de la couverture nuageuse, h , la valeur constante estimée pour la hauteur des nuages, h_0 , la hauteur de la base des nuages, les deux dernières sont exprimées en km.

Une fois que la fraction du ciel nuageux a été déterminée, il est possible d'estimer l'émissivité globale du ciel pour n'importe quelle condition météorologique.

$$\varepsilon_{sky} = \varepsilon_{clear} + (1 - \varepsilon_{clear}) C \quad (31)$$

À partir de l'émissivité globale du ciel, il est possible de déterminer son émissivité directionnelle à l'aide de la formule suivante, où θ est l'angle zénithal exprimé en radians et b le coefficient déterminé par l'analyse des données expérimentales :

$$\varepsilon_{\theta} = 1 - (1 - \varepsilon_{sky}) e^{b(1.7 - 1/\cos \theta)} \quad (32)$$

Le coefficient b dépend de l'émissivité globale et a été déterminé à partir de mesures expérimentales pour différentes plages de longueur d'onde. Dans ce document, b a été calculé selon l'équation présentée dans *Summary of results for the spectral and angular sky radiation measurement program* [Martin 1984a], dans le tableau 1, qui contient les valeurs de l'approximation des moindres carrés correspondant aux paramètres de 8-14 μm où A est égale à 1.792 et B à -0.867.

$$b = A(\varepsilon_{sky}) + B \quad (33)$$

L'intégration de ε_{θ} sur l'hémisphère doit être égale à ε_{sky} . Suivant les indications de Martin et Berdahl, $\Delta\varepsilon$ est limité à 0,05. Ce modèle présente une solution robuste pour toutes les conditions météorologiques et son calcul est rapide.

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{sky} - \int_{2\pi} \varepsilon_{\theta} \quad (34)$$

Le calcul de la température effective est simple. Elle ne nécessite que la température de l'air et l'émissivité du ciel (globale ou angulaire).

$$T_{sky} = T_{atm} \sqrt[4]{\varepsilon_{\theta}} \quad (35)$$

Cette température représente la température de l'atmosphère. Elle fournit une approche pratique pour estimer le transfert de rayonnement infrarouge du ciel. Le rayonnement émis par l'atmosphère peut être estimé en supposant que le ciel a le même comportement qu'un corps noir :

$$\phi_{sky} = \sigma T_{atm}^4 \sqrt[4]{\varepsilon_{\theta}} \quad (36)$$

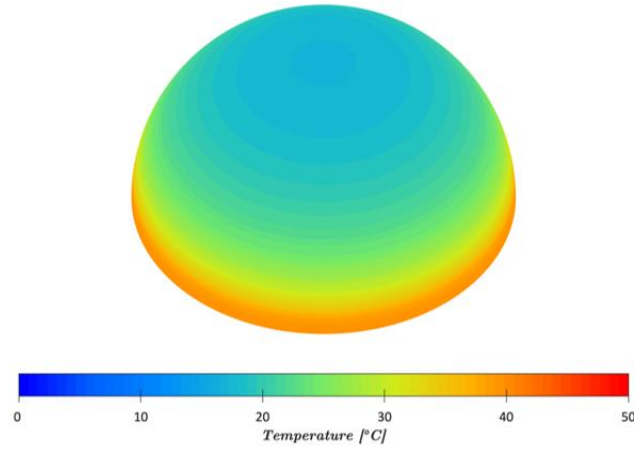


Figure 22. Modèle de Martin et Berdahl sur la partition de ciel proposée par Beckers pour Cordoue le 25 Juillet à 16 heures.

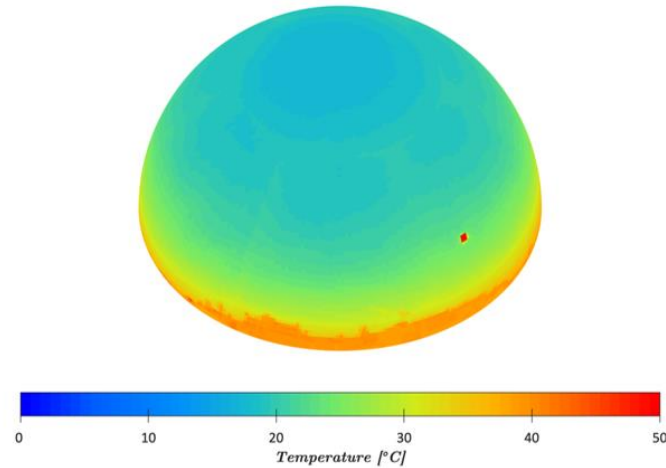


Figure 23. Thermographie 2π de la voûte céleste sur le Pont Romain à Cordoue le 25 Juillet vers 16 heures. Le ciel était clair et la température de l'air était de 39.8 °C.

Le ciel en ondes courtes

En ondes courtes, le ciel est la seule source de rayonnement, et ses composantes (la voûte céleste et le soleil) présentent des niveaux d'émission très différents. La photographie HDR étend la plage de mesure afin que la radiance de la scène et de la voûte céleste puisse être mesurée avec fiabilité, mais sans pouvoir mesurer le soleil. C'est de loin l'objet le plus lumineux dans le ciel, avec des ordres de grandeur au-dessus du ciel et des nuages et donc beaucoup plus lumineux que ce que les appareils photo sont conçus pour capturer.

Modèle de ciel de Perez

Pour surmonter cette contrainte, dans le cas extrême d'un ciel clair sous rayonnement solaire direct, le ciel mesuré est remplacé par un modèle théorique de la distribution du rayonnement du ciel. Le modèle "All-Weather" proposé par [Perez 1993] permet d'estimer la distribution de la radiance du ciel à partir de données facilement accessibles :

- La position du Soleil est obtenue à partir des informations relatives au moment des mesures (heure locale et jour) et à la localisation du site (latitude, longitude, altitude, fuseau horaire). Elle peut être calculée en suivant la méthode expliquée dans [Beckers 2010].
- L'irradiance diffuse horizontale correspond au rayonnement provenant uniquement de la voûte céleste reçu sur un plan horizontal.
- L'irradiance directe normale correspond au rayonnement provenant du Soleil sur un plan orienté vers lui.

Ces deux dernières données se retrouvent dans tous les fichiers de données climatiques d'année standard (*TMY* pour son acronyme anglais, *Typical Meteorological Year*).

À partir de ces informations, une série de paramètres est obtenue à partir de tableaux et de formules pour parvenir jusqu'à la radiance du ciel dans n'importe quelle direction :

L'indice de clarté ε permet de catégoriser le ciel considéré en 8 différents types de ciel. Ces 8 types de ciel vont du ciel complètement couvert ($1 \leq \varepsilon < 1.065$), au ciel dégagé ($6.2 \leq \varepsilon$). D'autres coefficients intermédiaires dépendent du type de ciel obtenu.

$$\varepsilon = \frac{\frac{E_{e,dif} + E_{e,ndir}}{E_{e,dif}} + 1.041\theta_s^3}{1 + 1.041\theta_s^3} \quad (37)$$

La variable $E_{e,dif}$ est l'irradiance diffuse horizontale et $E_{e,ndir}$, l'irradiance directe normale les deux exprimées en $W\ m^{-2}$, θ_s est l'angle zénithal du Soleil exprimé en radians.

L'indice de luminosité sert au calcul des coefficients intermédiaires.

$$\Delta = \frac{mE_{e,dif}}{E_{e,ndir0}} \quad (38)$$

Le terme $E_{e,ndir0}$ est l'irradiance directe normale extérieure à la terre exprimée en $W\ m^{-2}$ et m le coefficient adimensionnel de masse d'air optique, qui représente la longueur du chemin optique par rapport à la longueur du chemin dans la direction zénithale. Ces deux variables sont estimées à partir de modèles existants. La masse d'air optique peut être calculée selon la formule proposée par [Kasten 1989] et l'irradiance directe normale extérieure à la terre selon la formule proposée par [Spencer 1971] :

$$m = \frac{e^{-0.000184h}}{\cos \theta_s + 0.5057(96.07995 - \theta_s)^{-1.634}} \quad (39)$$

$$E_{e,ndir0} = E_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{n2\pi}{365} \right) \right] \quad (40)$$

La grandeur h exprimée en m correspond à l'altitude du site, E_{sc} est la constante solaire égale à $1367\ W\ m^{-2}$ et n , le numéro du jour de l'année.

La radiance relative l d'un élément de ciel dans une direction (θ, γ) est définie comme le rapport entre la radiance de l'élément de ciel considéré et la radiance d'un élément de ciel arbitraire de référence.

$$l = f(\theta, \gamma) = (1 + ae^{b/\cos \theta})(1 + ce^{d\gamma} + e \cos^2 \gamma) \quad (41)$$

La variable θ représente l'angle zénithal et γ l'angle l'azimutal de l'élément de ciel considéré. a , b , c , d , e sont les coefficients intermédiaires. Chacun de ces coefficients a un effet bien défini sur la répartition des radiances du ciel.

Le coefficient a sert à définir si l'horizon est plus sombre ou plus lumineux que le zénith. Une valeur positive correspond à un horizon plus clair que le zénith.

Le coefficient b sert à définir le gradient des luminances dans la zone proche de l'horizon. Plus ce coefficient est grand, plus cette valeur est faible, plus la luminance varie fortement lorsque l'on se rapproche de l'horizon.

Le coefficient c est proportionnel à l'intensité de la zone du ciel dans la zone proche du Soleil (zone circumsolaire). Plus sa valeur est grande, plus cette zone est intense.

Le coefficient d sert à définir la taille de cette zone circumsolaire. Plus ce coefficient est grand, plus cette zone est étendue.

Le coefficient e sert à définir l'intensité du rayonnement solaire rétrodiffusé (backscattered) par l'atmosphère. Ce phénomène correspond à une intensité du ciel plus marquée dans la direction opposée au Soleil lorsque celui-ci est rasant. Une valeur plus élevée signifie un rayonnement rétrodiffusé plus marqué.

Une fois la radiance relative d'un élément de ciel obtenue, la radiance $L_{e,dif}$ de cet élément de ciel peut alors être calculée ainsi :

$$L_{e,dif}(\theta, \gamma) = \frac{l(\theta, \gamma)E_{e,dif}}{\int_{2\pi} l_{\theta, \gamma} \cos \theta d\Omega} \quad (42)$$

Dans le cas d'un ciel discrétisé en carreaux, l'intégrale peut être remplacée par une somme équivalente. La radiance $L_{e,dif}$ est alors égale à :

$$L_{e,dif}(\theta, \gamma) = \frac{l(\theta, \gamma)E_{e,dif}}{\sum_{N_{patch}} l_{\theta, \gamma} \cos \theta} \quad (43)$$

La radiance du Soleil $L_{e,dir}$ peut être facilement déterminée à partir de l'irradiance directe normale $E_{e,ndir}$ et de l'angle solide qu'occupe le Soleil. Dans les cas où une partition de ciel est utilisée, on considère généralement que le Soleil est modélisé par le carreau de ciel dans lequel il se situe. L'angle solide Ω pris en compte pour le Soleil est alors différent de son angle solide réel. Sa radiance est modifiée en fonction de son angle solide pour que la quantité d'irradiance normale directe soit conservée.

$$L_{e,dir} = \frac{E_{e,ndir}}{\Omega} \quad (44)$$

2.7. Distorsions géométriques

Le dispositif de mesure vise à créer des panoramas ; il est donc impératif de régler le montage avec soin et de déterminer les distorsions qui peuvent affecter l'assemblage de l'image. La première étape permet d'éviter la déviation angulaire de la position perçue d'un objet par rapport au point d'observation [Littlefield 2006] (parallaxe) qui affecte les images panoramiques en raison du mouvement de la caméra. La seconde aide à identifier la région exploitable de l'image qui est la moins affectée par les distorsions.

Afin de créer un panoramique sphérique, il faut faire pivoter la caméra à chaque prise de vue afin de capturer l'ensemble de la scène. Il existe un point autour duquel l'appareil photo doit pivoter pour obtenir un alignement correct à chaque prise de vue (Figure 24). Pour la sphère, ce point est son centre d'origine ($x = 0$; $y = 0$; $z = 0$). Pour la caméra, ce point sans parallaxe est la pupille d'entrée.

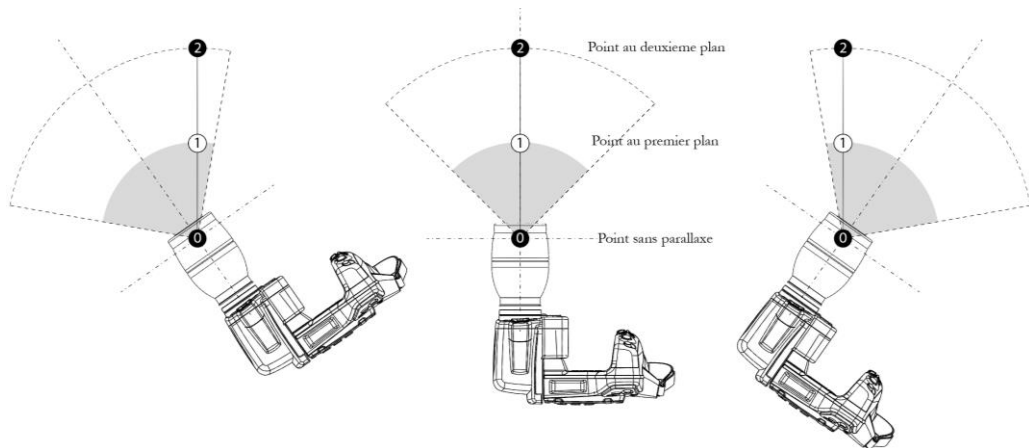


Figure 24. Point sans parallaxe

Pour positionner correctement la pupille, la caméra est placée sur un support panoramique fixé sur un trépied. Le support panoramique permet de faire pivoter la caméra sans avoir à déplacer le trépied. Ceci permet d'ajuster la position de la caméra pour atteindre le point de rotation désiré. Pour vérifier l'alignement correct des axes, la caméra est placée de manière à faire la mise au point sur deux objets situés à des distances différentes de la caméra qui se superposent. À partir de cette position et en regardant à travers le viseur, la caméra tourne dans le plan horizontal de sorte que les objets mis au point se trouvent aux extrémités de l'image. Une fois que les objets observés restent alignés malgré le changement de position, la scène est observée à partir du point sans parallaxe

Pour déterminer la distorsion produite par les objectifs de chacune des caméras, deux séquences d'images ont été capturées, sous le soleil et en utilisant un étalon de calibration. Il s'agit d'une feuille de papier sur laquelle est imprimé un damier, avec une alternance de carrés noirs et blancs. Ces détails sont d'une importance fondamentale pour la caméra thermique. La feuille de papier est un objet à très faible inertie. Le blanc réfléchit une grande partie de la lumière tandis que le noir l'absorbe. En exposant ce diagramme d'étalonnage au soleil, il est immédiatement observable par la caméra thermique (Figure 25).

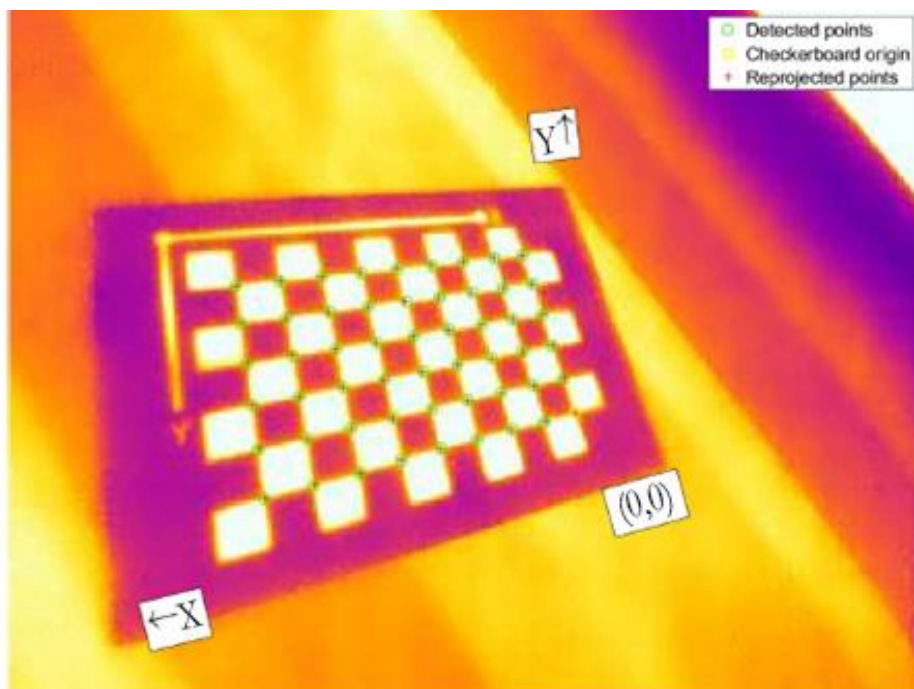


Figure 25. Calibration de la thermographie

La distorsion est généralement plus importante à la périphérie de l'image. Alors pour profiter des informations mesurées avec la caméra il est donc important d'identifier la région de l'image qui est la moins déformée. Pour cela, il est nécessaire de capturer des images du modèle d'étalonnage dans différentes régions du cadre [Bouguet 2015].

Les dimensions de l'étalon de calibration sont connues. Donc, après avoir identifié les coordonnées de ses sommets, il est possible d'effectuer des opérations géométriques qui permettent de déterminer les valeurs intrinsèques et extrinsèques de la caméra. Les valeurs intrinsèques définissent le modèle pour la caméra en déterminant sa distance focale, son centre optique ou point principal et ses coefficients de distorsion. Les valeurs extrinsèques définissent la rotation et la translation de la caméra. À partir de cette relation, l'algorithme permet de relier les points du monde (3D) et les points correspondants de l'image 2D et il est ainsi possible d'identifier le type de distorsion qui affecte l'image ainsi que la zone de l'image la plus affectée par la distorsion de la caméra (Figure 26).

La distorsion observée avec la caméra thermique utilisée pour cette étude est de type radial positif (dit : de barillet). Ce type de distorsion est courant dans les objectifs grand angle et affecte principalement les bords de l'image.

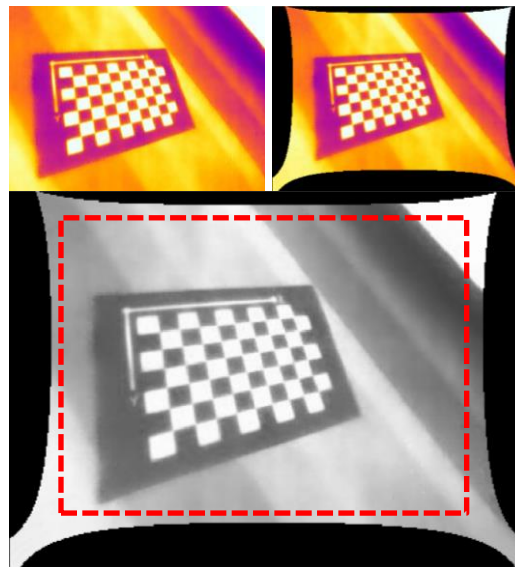


Figure 26. Distorsion de l'image et surface utilisable

Les artefacts liés à la caméra ne sont pas exclusivement dus à l'objectif. Si ces artefacts entraînent un changement dans la mesure de la radiance d'une scène, ils peuvent être considérés comme des artefacts radiométriques. L'un des plus courants

est l'effet de vignettage. Dans le cas de la thermographie, il affecte l'image en faisant apparaître les bords plus chauds qu'ils ne le sont en réalité (Figure 27).

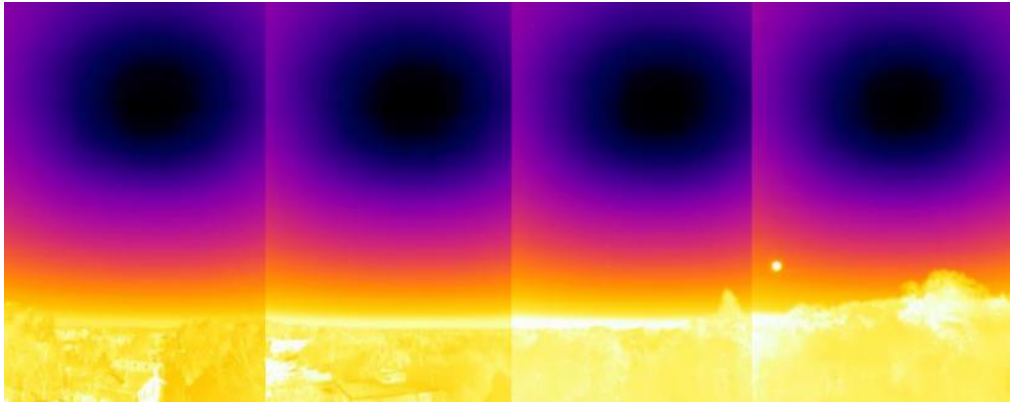


Figure 27. Effet de vignettage sur une photographie panoramique

Après avoir identifié la zone de l'image la moins affectée par ces deux facteurs et en tenant compte de l'angle d'ouverture et du temps de capture de chaque image, on a déterminé qu'avec le matériel utilisé, il faut créer 14 images, avec chaque camera, pour couvrir toute la sphère (Figure 28).

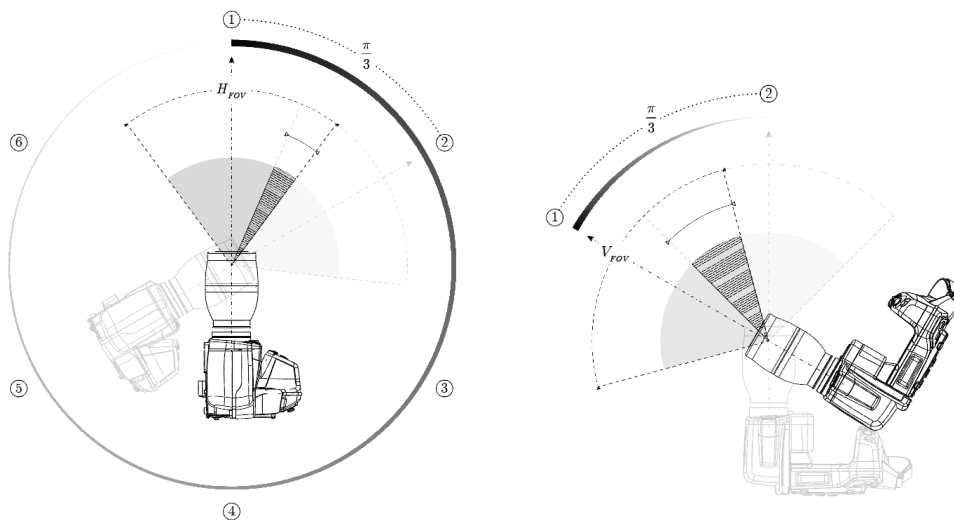


Figure 28. Diagramme de rotation de la caméra

On a choisi de faire tourner la caméra de $\pi/3$ radians pour chaque capture, limitant ainsi la zone utilisée de chaque image (Figure 29). Cela permet de réduire la distorsion causée par l'objectif et l'effet de vignettage tout en évitant des modifications qui pourraient altérer les informations mesurées par les caméras. Le processus dure 3 minutes. Ce temps est suffisamment court pour ignorer son effet sur la température rayonnante de la scène.

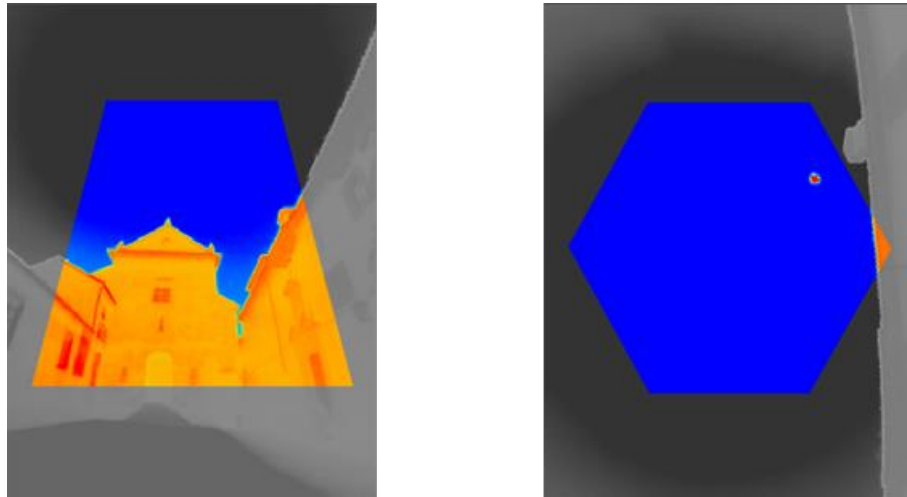


Figure 29. Zone utilisée lors de l'assemblage d'une image 4π à deux angles d'élévation :
a) Avec un angle d'élévation de $\pi/6$ radians b) Avec un angle d'élévation $\pi/2$ radians (image zénithale)

2.8. Post-traitement des données*

Une fois que les informations sur la scène ont été mesurées, une étape supplémentaire de post-traitement est nécessaire pour les analyser. La première étape consiste à projeter les informations mesurées sur la sphère unitaire. Cela implique la création d'un canevas sphérique sur lequel sont projetées les informations mesurées pour étudier les images selon des coordonnées sphériques (Figure 30).

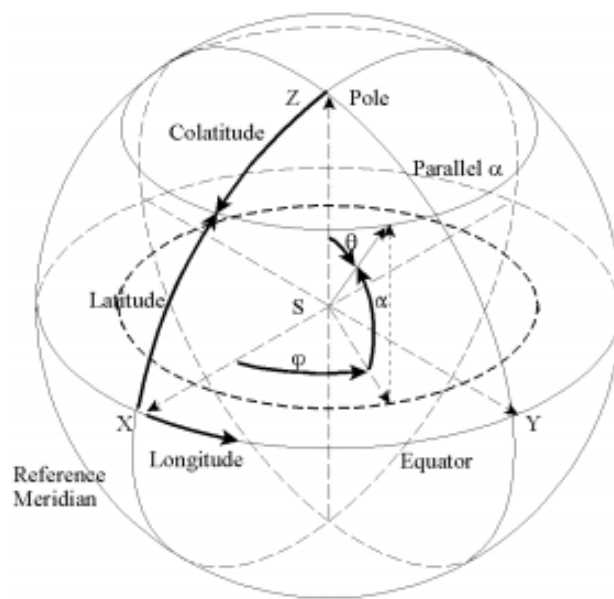


Figure 30. Notations utilisées pour les coordonnées sphériques

Projection par la sphère

La partition hémisphérique proposée par [Beckers 2012], principalement utilisée comme voûte céleste pour calculer la disponibilité de la lumière du jour et le bilan énergétique ondes courtes à l'échelle urbaine, est reprise dans cette étude pour construire un canevas sphérique. Cela permet d'évaluer l'ensemble de l'environnement radiatif en un point. Cette partition offre la possibilité à l'utilisateur

* Le code MATLAB® correspondant à cette section se trouve dans les annexes.

de sélectionner le nombre de carreaux tout en s'assurant que chacun d'eux conserve le même angle solide et un rapport d'aspect proche de un (Figure 31).

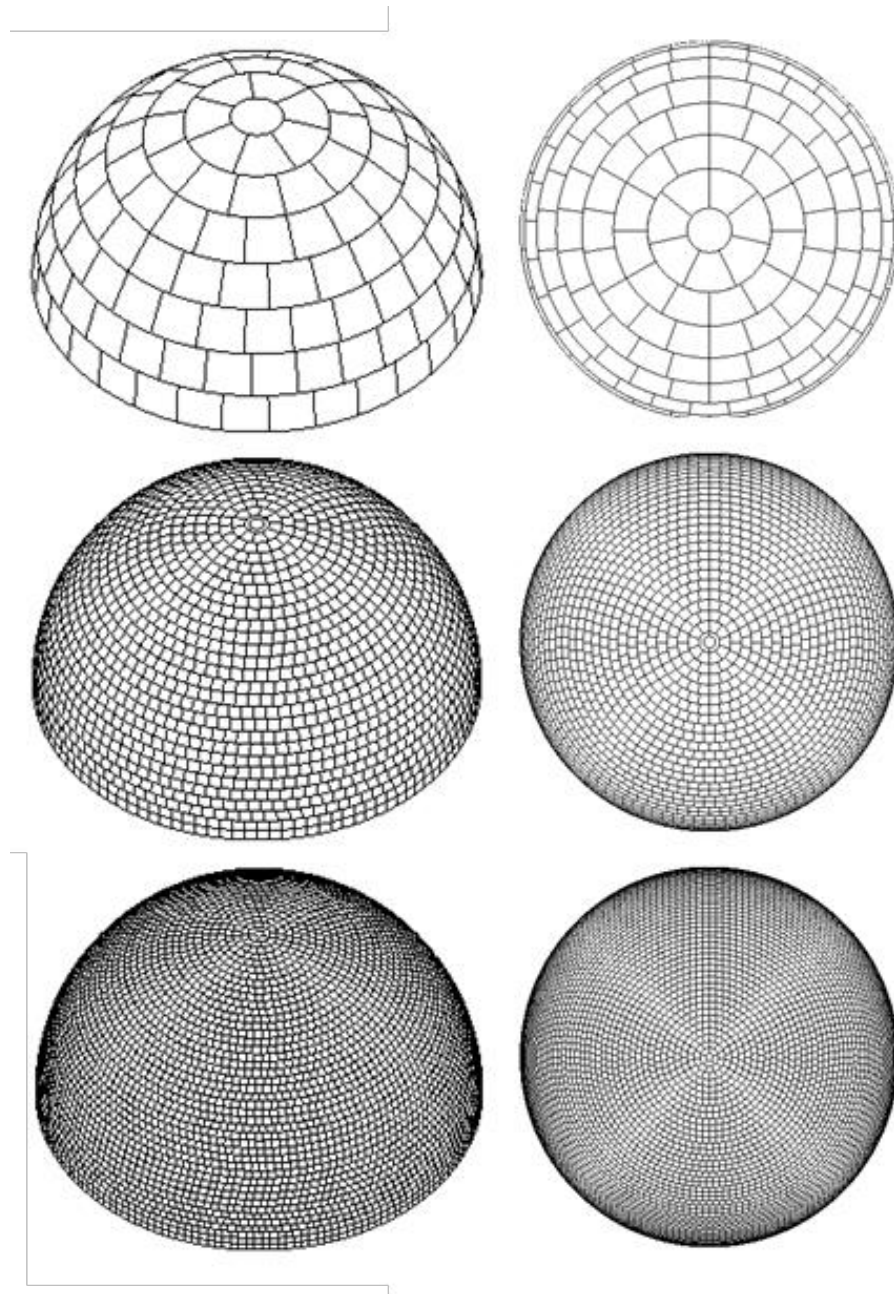


Figure 31. Vues 3D et projections orthographiques de 3 partitions de l'hémisphère en 145, 2000 et 5000 carreaux selon [Beckers 2012].

Projection sur la sphère

Quatorze images sont assemblées sur la sphère. Sept d'entre elles construisent un hémisphère, parmi elles, une couvre le zénith (Figure 32). Puisque le dispositif monté permet de contrôler avec précision la position de la caméra, la direction de chacun de ses pixels est connue. Alors, la valeur de chaque carreau correspond au pixel le plus proche de l'image. Le résultat est une sphère de valeurs radiométriques. Elle permet de récupérer quantitativement toutes les informations de la scène. Cependant, la sphère est un objet non développable simplement sur le plan. Il est donc nécessaire d'utiliser une seconde projection, dite cartographique pour obtenir une image plane.

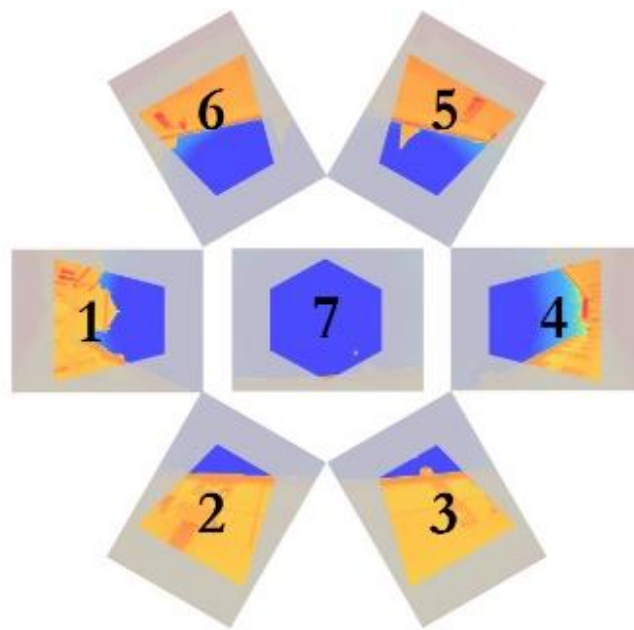


Figure 32. Construction de l'hémisphère avec 7 thermographies.

Projection de la sphère

La représentation de la projection sur la sphère d'une scène complète entourant un point nécessite une seconde projection pour obtenir une représentation plane. Sur la Figure 33, l'hémisphère supérieur est représenté par une projection azimutale équivalente [Beckers 2014], ce qui signifie que l'angle solide d'un élément peut être obtenu en comptabilisant ses pixels.

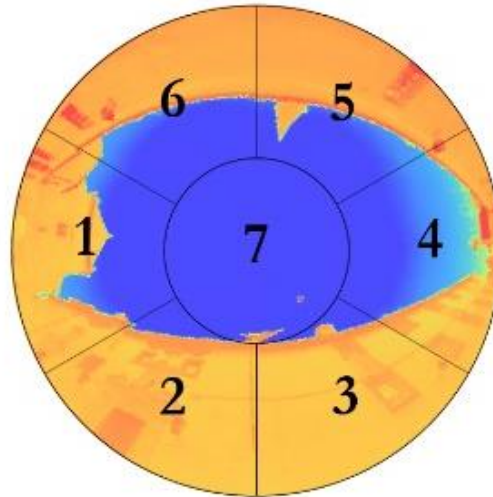


Figure 33. Projection azimutale équivalente.

3. Mesure visuelle de l'environnement radiatif : Imagerie 4π *

3.1. Contexte

La T_{mrt} décrit l'effet d'un environnement radiant complexe discrétisé en tenant compte à la fois de l'irradiance diffuse et directe en ondes courtes (E_{sw} , I) [W m^{-2}] ainsi que de l'irradiance en ondes longues (E_{Lw}) [W m^{-2}] pour chaque élément (n), en considérant les facteurs de vue (F_i , f_p) et un coefficient d'absorptance α différent pour chaque partie du spectre.

$$\phi_r = \alpha_{Lw} \sum_{i=1}^n F_i E_{Lw} + \alpha_{sw} \sum_{i=1}^n F_i E_{sw} + \alpha_{sw} f_p I \quad (45)$$

À partir du flux résultant de l'addition des deux irradiances, T_{mrt} [K] se calcule par la loi Stefan-Boltzmann, où $\sigma = 5.670374419 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$.

* Ce chapitre reprend et complète l'article « 4π Thermography: A projection to Understand Thermal Balance » présenté en septembre 2019 lors de la conférence *Building Simulation IBPSA 2019* et l'article « Visual metering of the urban radiative environment through 4π imagery » publié en août 2020 dans la revue *Infrared Physics & Technology*.

[Acuña Paz y Miño 2019] [Acuña Paz y Miño 2020]

$$T_{mrt} = \sqrt[4]{\frac{\phi_r}{\sigma}} \quad (46)$$

En 1934, Bedford et Warner ont proposé une correction pour déterminer le flux radiatif indépendamment de l'influence du vent [Bedford 1934]. Désormais, le thermomètre à globe noir est considéré comme un instrument fiable qui permet une évaluation simple de l'environnement radiatif basée sur le concept de température rayonnante moyenne. Aujourd'hui, cette méthode n'a pas changé. Elle est utilisée par ceux qui cherchent un moyen rapide de mesurer l'environnement radiatif, car elle s'appuie sur près d'un siècle de tests.

À l'équilibre, la valeur de la température mesurée au centre du globe est le résultat des échanges thermiques par rayonnement et convection. Ainsi, la température du globe (T_g) représente une moyenne pondérée de la température rayonnante moyenne (T_{mrt}) et de la température de l'air (T_{atm}). C'est le principe sur lequel repose la mesure de T_{mrt} par le globe noir. T_g s'approche de T_{mrt} lorsque la vitesse du vent est faible, tandis que plus la vitesse du vent est élevée, plus la valeur de T_g est proche de T_{atm} . Par conséquent, en présence d'un vent fort, la température mesurée est uniquement celle de l'air.

Les échanges convectifs peuvent être réduits en augmentant la taille du globe, mais cela augmente considérablement son temps de réponse. Pour un globe noir standard de 0,15 m, ce temps est compris entre 20 et 30 minutes.

Pour calculer T_{mrt} à partir de la température du globe, on utilise l'équation suivante [De Dear 1988] :

$$T_{mrt}^4 = T_g + \frac{h_{c_g}}{\varepsilon D_g^{0.4}} (T_g - T_{atm}) \quad (47)$$

Le terme T_g [K] est la température du globe, T_{atm} [K] est la température de l'air, ε est l'émissivité du globe noir, D_g est le diamètre adimensionnel (diamètre réel divisé par le diamètre de l'unité de référence de 1 m) et h_{c_g} un coefficient de convection adimensionnel. En convection forcée, h_{c_g} peut être estimé en tenant compte de la vitesse adimensionnelle du vent v_a (vitesse réelle du vent divisée par la vitesse de l'unité de référence de 1 m s⁻¹).

$$h_{c_g} = 1.1 \times 10^8 v_a^{0.6} \quad (48)$$

Cette méthode soulève deux questions principales. La première est la difficulté d'effectuer des mesures dans des conditions changeantes et la seconde est la fréquence limitée avec laquelle elles peuvent être effectuées, en raison de l'inertie de l'appareil. En outre, dans des conditions venteuses, le globe n'enregistre que la température de l'air et la correction de l'équation (47) n'a donc aucun effet.

De plus, la complexité de l'environnement radiatif ne peut être saisie dans les mesures car cette méthode intègre les contributions des ondes courtes (diffuses, directes et réfléchies) et des ondes longues (le ciel et les surfaces de la terre) dans toutes les directions, ce qui entrave l'analyse de la distribution spatiale de l'environnement radiatif ainsi que de son effet sur les corps ayant une autre forme.

Cette étude propose la méthode 4π comme alternative pour évaluer l'environnement radiatif dans une scène complexe avec des conditions qui changent rapidement. Contrairement au thermomètre à globe noir, cette méthode d'imagerie utilise des capteurs de rayonnement, contournant ainsi l'influence de la convection. Pour tenir compte de la discrimination spectrale, le rayonnement ondes courtes et ondes longues sont mesurés séparément, le premier par photographie à haute plage dynamique (HDR) et le second par thermographie.

3.2. Représentation graphique

Grâce au dispositif décrit au chapitre 2, il est possible d'effectuer des captures dans des directions précises, ce qui permet de les projeter sur la sphère. Cependant, la sphère n'est pas développable simplement sur le plan. Il est donc nécessaire d'utiliser une seconde projection pour obtenir une image plane. D'autres études ont montré des thermographies utilisant des projections cartographiques [Asano 1996, Tamura 2001]. Puisque aucune projection cartographique de la sphère ne peut être à la fois conforme (préservation des angles) et équivalente (préservation des surfaces) le choix est délicat.

Pour étudier l'influence des surfaces de la scène sur le point de mesure, il est nécessaire de connaître l'angle solide qu'elles représentent sur la sphère, il faut donc utiliser une projection équivalente capable de la représenter entièrement. Il existe des projections équivalentes de plusieurs types : azimutale, cylindrique, sinusoidale Mollweide, etc... Ces projections présentent des distorsions plus ou moins importantes mais toutes conservent les aires.

Asano montre la possibilité de représenter la scène en utilisant une projection sinusoidale (Figure 34) puisque celle-ci est équivalente et garde également les

latitudes sous forme de lignes droites. Cependant, cette projection présente une forte distorsion aux pôles.

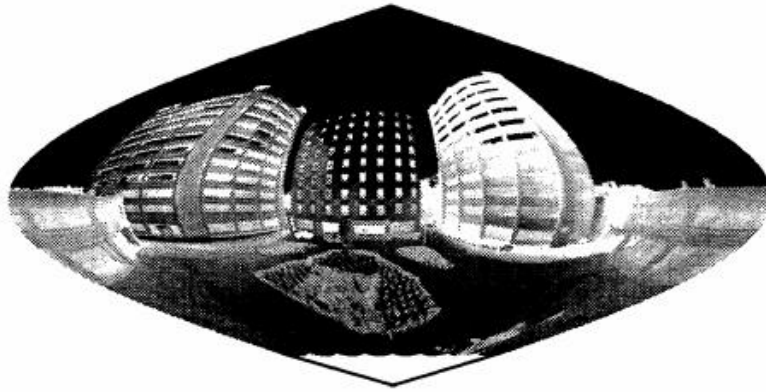


Figure 34. Thermographie sphérique Composée [Tamura 2001]

[Beckers 2014] suggère la projection de Mollweide pour observer et quantifier avec précision l'impact de chaque surface de la scène. La projection Mollweide permet de cartographier sur le plan la totalité de la sphère avec une faible distorsion partout [Lapaine 2011].

La projection de Mollweide est une projection pseudo-cylindrique qui représente la sphère complète dans une ellipse avec un rapport de 2:1 entre les axes (Figure 35).

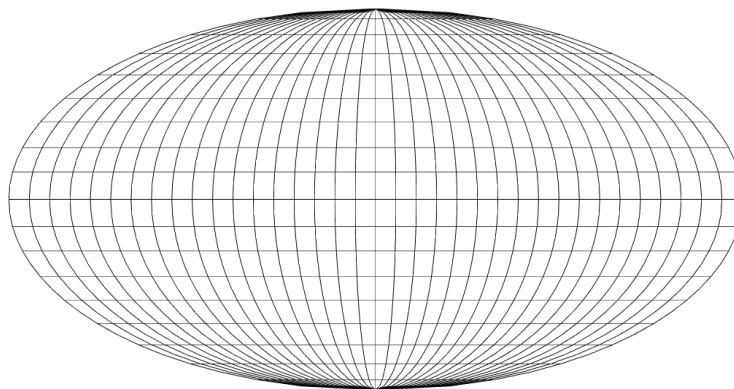


Figure 35. Projection de Mollweide

Dans la projection de Mollweide, les méridiens sont répartis équidistants et les latitudes sont conservées horizontales. Puisqu'il s'agit d'une projection équivalente (les surfaces relatives de la sphère sont conservées), cela permet de mesurer directement l'angle solide de chaque surface en comptabilisant les pixels qui la représentent.

Malgré ses avantages, l'utilisation de la projection de Mollweide est restée limitée à des applications très spécifiques comme l'espace interstellaire ou le globe terrestre. La méthode 4π profite des caractéristiques géométriques de cette projection pour étudier l'environnement radiatif. Son esthétique facilite l'observation de ce qui se passe dans la scène. Pour cette raison, cette même projection peut être utilisée pour la représentation de résultats simulés.

La construction géométrique de cette projection est faite à partir de 3 équations.

$$x = \sqrt{2R} \sin \beta \quad (49)$$

$$y = \frac{2\sqrt{2R}}{\pi} R \lambda \cos \beta \quad (50)$$

$$2\beta + \sin 2\beta = \pi \sin \varphi \quad (51)$$

Dans ces équations, x et y représentent les coordonnées rectangulaires dans le plan de projection, tandis que φ et λ sont les coordonnées géographiques (longitude et latitude) de chaque point sur la sphère et R son rayon. L'angle β est calculé itérativement, en commençant par $\beta' = \varphi$, ensuite :

$$\delta\beta' = -\left(\beta' + \sin \beta' - \frac{\pi \sin \varphi}{1 + \cos \beta'}\right) \pi \sin \varphi \quad (52)$$

$$\beta = \frac{\beta'}{2} \quad (53)$$

À partir de la projection sphérique de la place des Capucins de Cordoue, on déduit les caractéristiques suivantes.

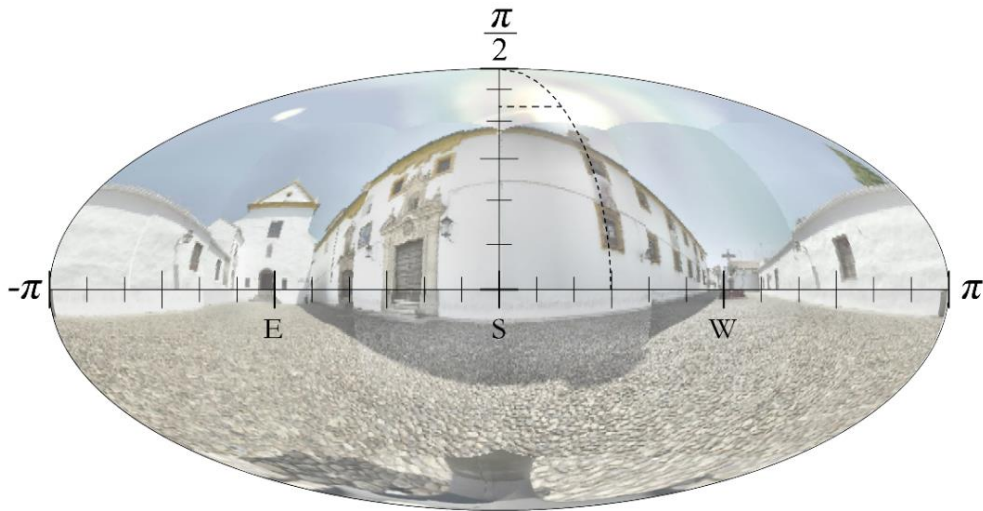


Figure 36. Projection de Mollweide de la Place des *Capuchinos*.
(Cordoue - Espagne).

Dans la scène de la Figure 36, l'angle solide du ciel ou *Sky Solid Angle* [Capeluto 2003] (SSA) = $2,89 \text{ sr} = 0,92 \pi \text{ sr} = 23 \%$ de la surface de la sphère. Puisque le concept de le SSA ne dépend pas d'une surface ou de son orientation, il peut s'appliquer à n'importe quel autre élément de la scène. Par exemple, pour le sol, où il deviendrait l'angle solide du sol ou *Ground Solid Angle*. Pour la Figure 36 (GSA) = $5,59 \text{ sr} = 1,78 \pi \text{ sr} = 44 \%$ de la surface de la sphère. Enfin, l'angle solide du mur ou *Wall Solid Angle* (WSA) = $4,08 \text{ sr} = 1,30 \pi \text{ sr} = 33 \%$ de la surface de la sphère. Évidemment, la somme de ces angles solides = $12,56 \text{ sr} = 4 \pi \text{ sr} = 100 \%$ de la surface de la sphère.

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. Les deux extrémités de l'axe horizontal indiquent le Nord, elles représentent la même direction. À mi-distance entre le centre et l'extrémité gauche (droite), on trouve la direction Est (Ouest).

Si l'on gradue l'axe horizontal de $-\pi$ à π , on indique toutes les directions : du Nord, à l'Est, au Sud, à l'Ouest, et, de nouveau au Nord. Les parallèles (lignes de latitude égale) apparaissent comme des lignes horizontales (chaque cercle de latitude de la sphère contient les projections de tous les points ayant le même angle zénithal, complément de la latitude).

La superposition des axes permet d'observer facilement la position du soleil. Son angle azimutal correspond au méridien tracé en pointillé et, comme la projection de Mollweide maintient les latitudes horizontales, son angle d'élévation peut être observé simplement par rapport à l'axe vertical. Ainsi, l'axe vertical marque également le midi solaire, pour l'hémisphère nord. Au moment de la mesure, le soleil avait une élévation de $66,7^\circ$ et un angle d'azimut de $224,7^\circ$.

Calcul de la T_{mrt} par la méthode 4π

Cette approche permet de mesurer les radiances dans toute la scène. Puisque la méthode 4π capture la scène entière autour d'un point, l'intégration de toutes les radiances L_e [$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$] sur la sphère permet de calculer l'irradiance sphérique E_{sph} [W m^{-2}] de la scène [CIE 2020] pour chaque partie du spectre.

$$E_{sph} = \int_{4\pi} L_e d\Omega \quad (54)$$

En combinant les irradiances sphériques en ondes courtes et en ondes longues, on obtient le flux total.

$$\phi_r = \alpha_{LW} E_{e,OLW} + \alpha_{SW} E_{e,OSW} \quad (55)$$

Par ailleurs, en utilisant une partition équivalente pour la sphère, il est possible d'obtenir le même résultat directement à partir de la moyenne de la sphère, car le nombre total de carreaux (N_{patch}) détermine l'angle solide de chacun de ses carreaux.

$$\Omega = \frac{N_{patch}}{4\pi} \quad (56)$$

Ainsi, le T_{mrt} peut être calculé comme le flux moyen sur la sphère de Beckers.

$$T_{mrt} = \sqrt[4]{\frac{\sum L_e}{N_{patch}}} \quad (57)$$

La méthode 4π est ainsi une alternative pour évaluer la température rayonnante moyenne, c'est surtout un outil d'analyse visuelle de l'environnement radiatif urbain. De plus, cette méthode permet une certaine discrimination spectrale. Ainsi, elle permet d'étudier l'environnement selon 3 axes, le temps, l'espace et le spectre.

3.3. Cas d'étude

Deux cas d'étude ont été menés dans deux centres historiques distincts, sous deux climats et périodes de l'année différents. Ces lieux ont été choisis afin d'observer les échanges radiatifs dans de conditions extrêmes. La première étude de cas a été réalisée à Bayonne (France) en hiver et la seconde à Cordoue (Espagne) en été.

Les deux études de cas consistent en de courtes promenades urbaines le long desquelles plusieurs arrêts sont faits. Ils ont été sélectionnés afin de créer un échantillon d'endroits représentatifs et permettent une meilleure compréhension de chaque ville. À chaque étape l'environnement radiatif est étudié, pour observer l'influence de la forme de la ville compacte et de ses caractéristiques matérielles sur les échanges radiatifs qui affectent les piétons.

Bayonne – Hiver

Bayonne est une ville du sud-ouest de la France (latitude 43.48, longitude -1.47). Elle a un climat classifié comme 'Cfb' selon l'échelle de Köppen-Geiger, ce qui correspond à un climat océanique tempéré dû à la proximité de l'océan Atlantique.

À Bayonne, les hivers sont longs et le ciel est partiellement nuageux tout au long de l'année. Les mois entre novembre et février sont les plus froids, avec une température moyenne minimale de l'air d'environ 5°C.

Le centre-ville de Bayonne est compact et se caractérise par ses rues médiévales étroites. Il est inscrit dans un cercle d'environ 400 m de rayon et est l'un des plus denses de France (Figure 37). Son architecture se distingue par la présence de bâtiments à ossature de bois, aux murs blanchis à la chaux et aux colombages rouges sur une hauteur de 4 ou 5 étages.

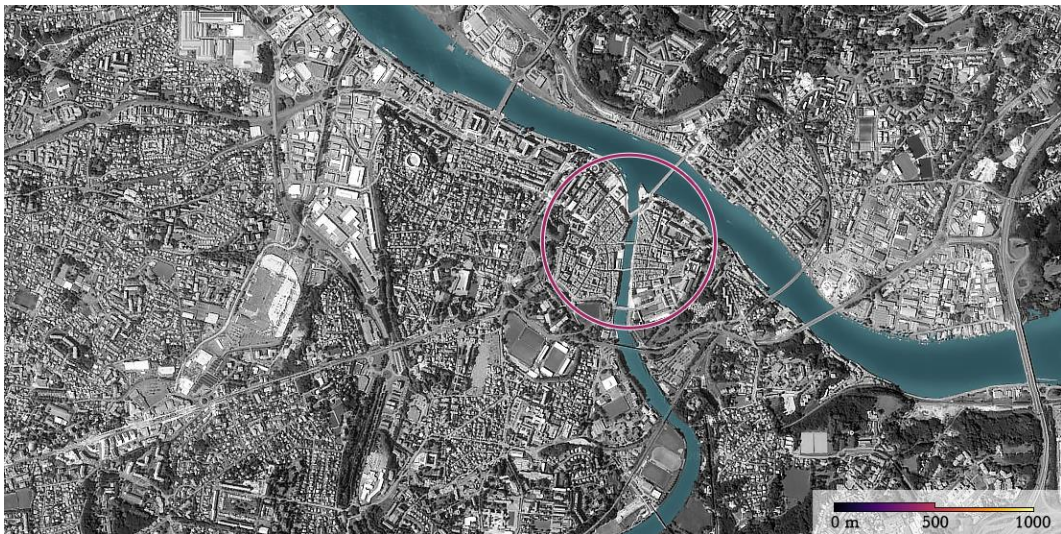


Figure 37. Périmètre du centre historique de Bayonne

La structure régulière de son tissu urbain, issue de son origine romaine en tant que *Castrum*, est visible dans un histogramme polaire de l'orientation de ces rues (Figure 38). Celui-ci montre deux orientations prédominantes. Les rues sont parallèles ou perpendiculaires à la rivière. La disposition du *kardo* et du *decumanus* est l'un des vestiges visibles de son origine romaine.

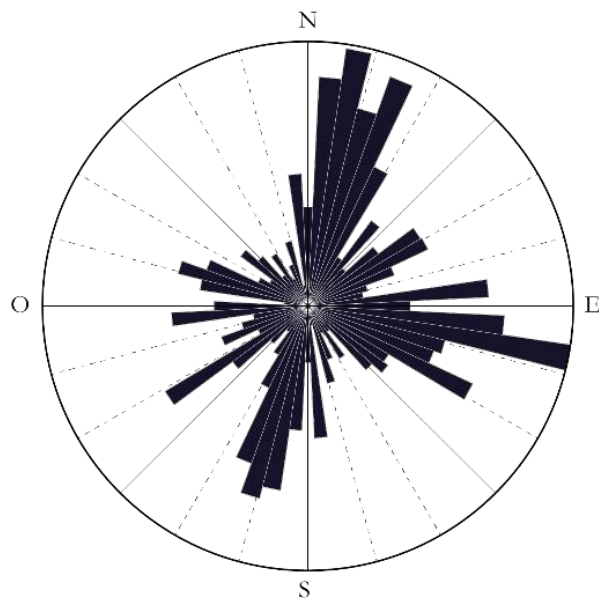


Figure 38. Histogramme polaire des orientations des rues de Bayonne

Cette disposition régulière de la ville combinée à sa taille, permet un placement des points de mesure proche les uns des autres pour avoir une vision en continu. Ce type d'observation peut être utilisé pour comprendre le comportement d'une ville à partir d'une zone limitée.

Les 5 configurations répondent aux conditions suivantes :

1. Intérieur – Cathédrale de Bayonne
2. Semi-extérieur – Place Pasteur
3. Extérieur – Cinq Cantons
4. Extérieur – Rue Port de Castets
5. Extérieur – Pont Marengo

La campagne de mesure s'est déroulée le 29 décembre 2018. Le parcours a une longueur de 240 mètres (Figure 39) et les mesures ont été réalisées entre 14 : 00 et 15 : 15, période de la journée où la présence du piéton dans la rue est la plus significative. C'est donc aussi la période où l'étude de l'influence de l'environnement radiatif sur le piéton est la plus intéressante.



Figure 39. Parcours urbain. Environnement visible à partir de chaque point de mesure.

Cordoue – été

Cordoue est une ville historique d'Andalousie, la région la plus méridionale d'Espagne (latitude 37.89 longitude -4.77).

À Cordoue, les étés sont intenses, durant cette période, la ville espagnole enregistre les températures de l'air les plus élevées d'Europe, avec une température moyenne maximale d'environ 37°C.

Selon l'échelle de Köppen-Geiger, le climat de Cordoue est classé "Csa". Cela correspond à un climat méditerranéen, avec des étés secs, chauds et des ciels très clairs. Les conditions climatiques sévères en été sont la source d'inconfort pour les citoyens et les touristes, limitant les activités de plein air pendant la journée.

Le centre historique de Cordoue est l'un des plus grands centres historiques d'Europe. Il est inscrit dans un cercle d'environ 1000 m (Figure 40). Il se distingue par son tissu urbain enchevêtré qui est le vestige des différentes phases de son histoire.

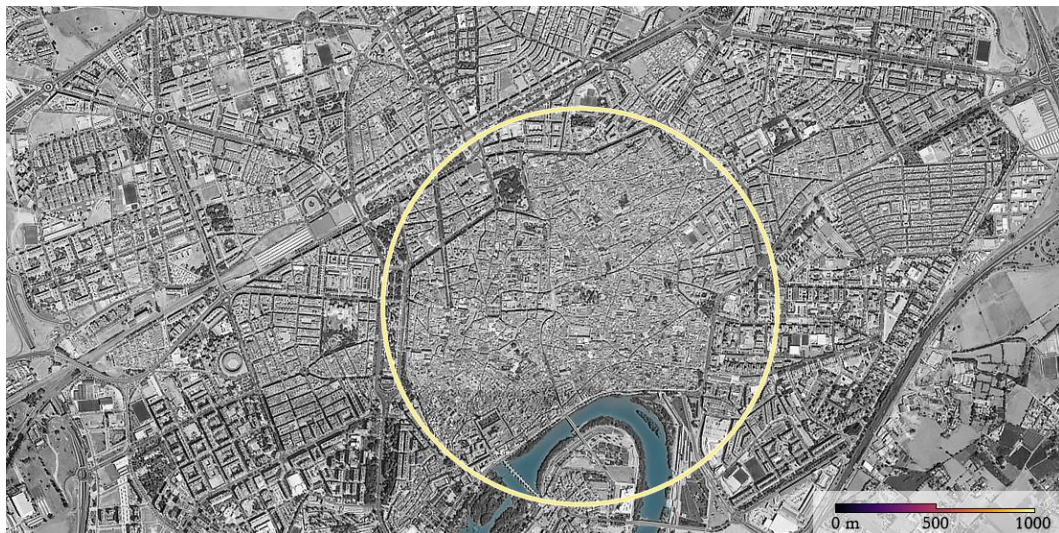


Figure 40. Périmètre du centre historique de Cordoue

L'architecture emblématique du centre historique offre son identité à la ville. Elle est composée de façades blanches et de sols pavés.

Ses rues labyrinthiques sont le résultat du mélange de trame romaine et islamique. L'histogramme polaire de l'orientation de ces rues montre qu'à Cordoue il n'existe pas d'orientation prédominante (Figure 41).

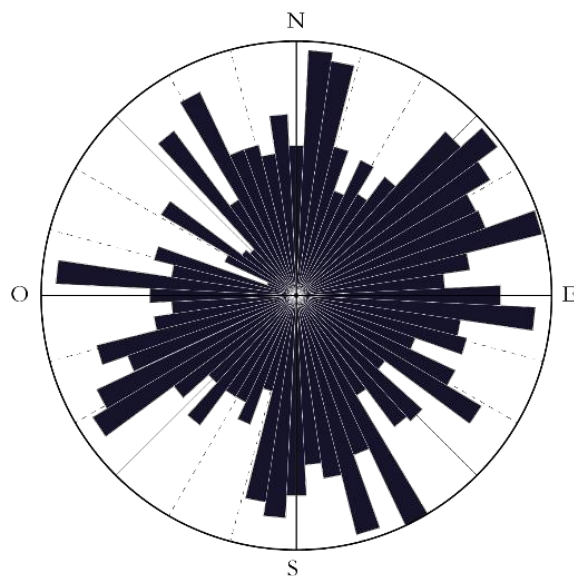


Figure 41. Histogramme polaire des orientations des rues de Cordoue

Cette disposition irrégulière de la ville combinée à sa taille, ne permet pas d'avoir une vision en continue. Ce type de tissu exige une stratégie différente. L'observation de l'environnement radiatif dans des sites clés de la ville permet d'analyser une grande partie de la ville avec peu de points de mesure.

Les 5 configurations répondent aux conditions suivantes :

1. Extérieur - Place Capuchinos
2. Extérieur - Place Corredera
3. Semi-extérieur - Rue Hoguera
4. Extérieur - Rue Santa Ana
5. Extérieur - Pont Romain

La campagne de mesures s'est déroulée le 24 Juillet 2019. Le parcours a une longueur de 1.2km à vol d'oiseau (Figure 42). Deux parcours ont été réalisés, le premier, pendant les heures les plus chaudes, car il s'agit de la période la journée où le confort thermique urbain est le plus affecté par la chaleur et le second, durant la nuit afin d'éviter l'influence des ondes courtes.



Figure 42. Parcours urbain. Distance visible à partir de chaque point de mesure.

3.4. Analyse des résultats

La section suivante est divisée en deux parties. Dans la première, les résultats de la méthode 4π sont comparés aux mesures de T_{mrt} réalisées avec un thermomètre de globe noir. Dans la seconde partie, on analyse et on discute d'une sélection de résultats graphiques de la méthode 4π .

Comparaison des méthodes

Différentes études de cas ont été menées afin de valider la méthode proposée. La Figure 43 regroupe les quinze mesures, les cinq premières ont été effectuées de jour à Bayonne (France) le 29 décembre, sous un ciel couvert. Les suivantes ont été effectuées à Cordoue (Espagne) en été, 5 pendant la nuit et 5 pendant la journée, toutes sous un ciel clair.

La comparaison de la température rayonnante moyenne obtenue à partir du globe noir ($T_{mrt,g}$, symbole +) et de la méthode d'imagerie ($T_{mrt,o}$, symbole $\circ$) montre une différence inférieure à deux degrés dans tous les cas.

Les températures les plus basses du tableau correspondent à Bayonne en hiver. La faible variation entre les températures correspond à des conditions de vent stable et à un ciel couvert. Pour la première mesure à l'intérieur de la cathédrale, toutes les températures sont très proches, représentant ainsi un environnement radiatif relativement uniforme.

La deuxième série montre 5 scènes nocturnes sous le ciel clair estival de Cordoue. Elles obéissent toutes au même ordre : $T_{mrt} < T_g < T_{atm}$. Cet ordre se retrouve dans toutes les mesures effectuées en l'absence de rayonnement solaire (ondes courtes).

La dernière série du tableau correspond aux 5 mêmes scènes à Cordoue, mais à midi, l'inversion de l'ordre des températures : $T_{atm} < T_g < T_{mrt}$ correspond à la présence de la radiation solaire (ondes courtes) et est immédiatement observable. De plus, tandis que T_{atm} et T_g restent presque constants, T_{mrt} varie davantage. Cette variation est liée à l'angle solide du ciel (*Sky Solid Angle*, SSA) et peut être observée pendant toute la campagne. Dans la série hivernale, les plages de température pour chacune des scènes sont plus réduites, même en présence d'un angle solide du ciel significatif. Ceci est dû à la couverture nuageuse qui modifie significativement la

température du ciel. Par conséquent, cette plage de température est liée à l'angle solide du ciel clair.

La comparaison entre la méthode 4π et la méthode du globe noir s'avère satisfaisante. La méthode permet de déterminer T_{mrt} rapidement avec simplicité en évitant l'influence de la convection. Le temps nécessaire pour la mesure est d'environ trois minutes, soit un temps considérablement plus court qu'avec le thermomètre à globe noir, car il n'est pas nécessaire d'attendre que le capteur atteigne l'équilibre.

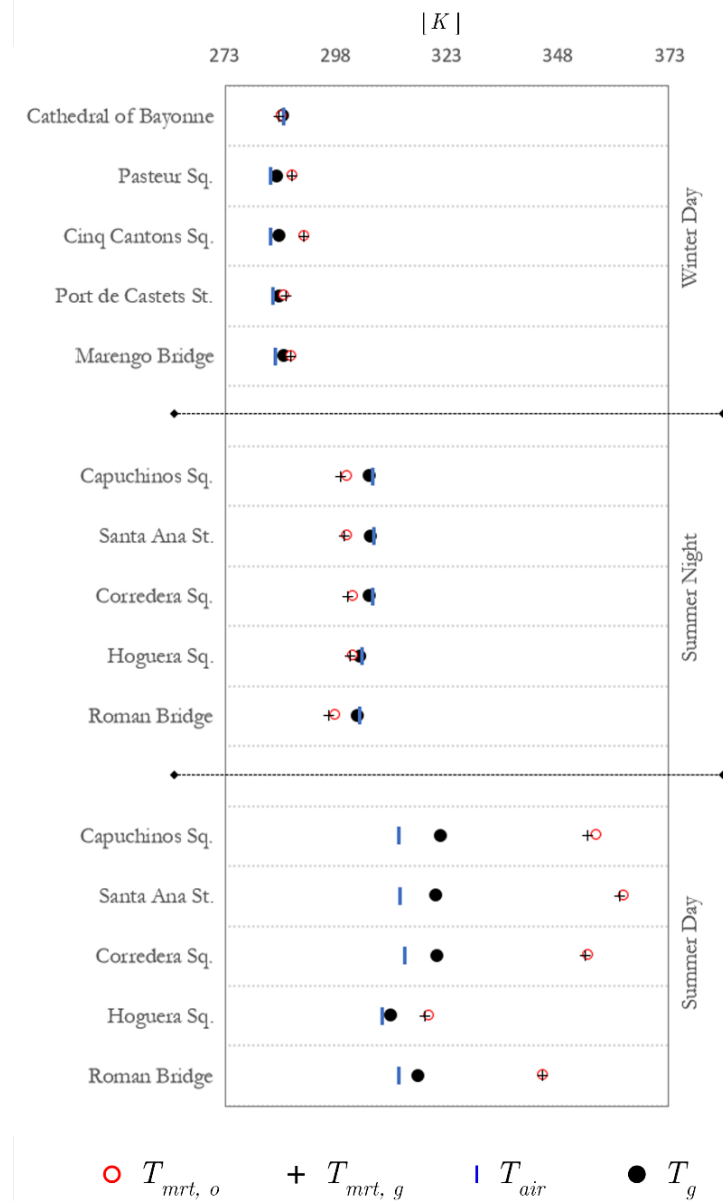


Figure 43. Comparaison des différentes températures de la scène. La valeur absolue de $T_{mrt,o} - T_{mrt,g}$ est toujours inférieure à 2 degrés

Résultats graphiques

La méthode 4π est une alternative rapide et fiable pour mesurer la T_{mrt} . Mais son principal avantage est de fournir une représentation visuelle de l'environnement radiatif que ce soit pour des études qualitatives ou quantitatives. Cette représentation utilise des cartes de couleur pour représenter la distribution radiative de la scène. Une simple inspection visuelle fournit une grande quantité d'informations qualitatives dont la plage et le niveau peuvent être affinés. Cela améliore la capacité de l'observateur à reconnaître même de petites différences dans l'image en raison d'un contraste accru.

En photographie, la détermination de l'exposition optimale pour une scène se fait de deux manières différentes : soit pour le centre de l'image, en tant que moyenne, soit concernant des régions d'intérêt. Un concept similaire appliqué à la méthode 4π permet de mesurer la scène radiative, ce qui facilite la compréhension de la scène par les concepteurs et les urbanistes.

La méthode 4π propose une représentation visuelle de la scène, où chaque élément peut être facilement identifié. Ainsi, son influence peut être quantifiée avec précision.

Campagne d'hiver

À l'intérieur de la cathédrale Sainte-Marie de Bayonne (Figure 44), les températures équivalentes des corps noirs sont relativement uniformes, avec des différences qui ne dépassent pas 5 degrés (Figure 45). Cela est dû au faible rayonnement à ondes courtes et à l'importante inertie de la structure et des murs massifs en pierre du bâtiment.



Figure 44. Cathédrale Sainte-Marie de Bayonne. Photographie.

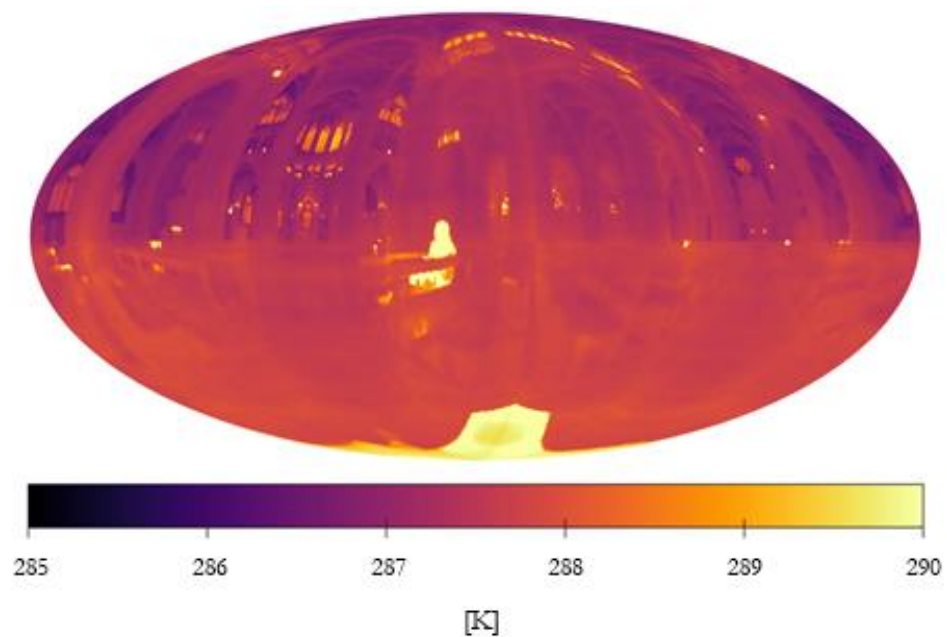


Figure 45. Carte des Températures apparentes.

Malgré cette uniformité, il est possible de détecter que le côté droit présente une température à peine plus élevée, car elle correspond à la façade sud de la cathédrale, exposée au soleil toute la matinée, comme le montre le diagramme stéréographique (Figure 46).

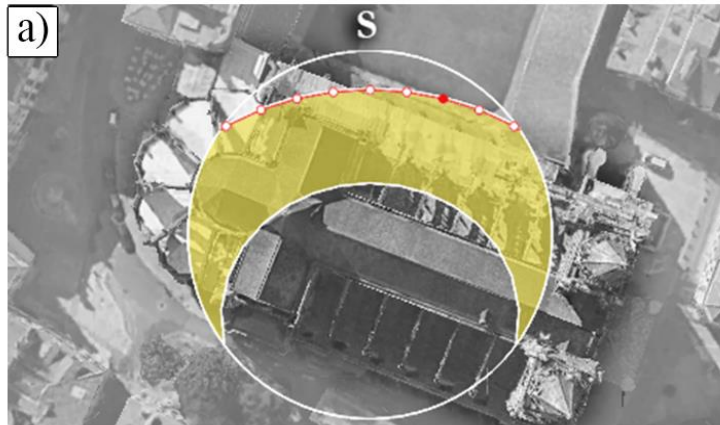


Figure 46. Diagramme stéréographique centré sur la position de la camera et orienté vers le sud.

La faible luminosité se traduit par une contribution mineure en ondes courtes (Figure 47a). Pour cette scène, celle-ci n'est que de $6,79 \text{ W m}^{-2}$ et provient exclusivement des fenêtres. En ondes longues, la contribution totale de cette scène est de $387,8 \text{ W m}^{-2}$. Même si les valeurs les plus élevées de l'image correspondent à l'individu dans la pièce, en raison de son angle solide, la majeure partie du rayonnement en ondes longues provient de la cathédrale elle-même (Figure 47b).

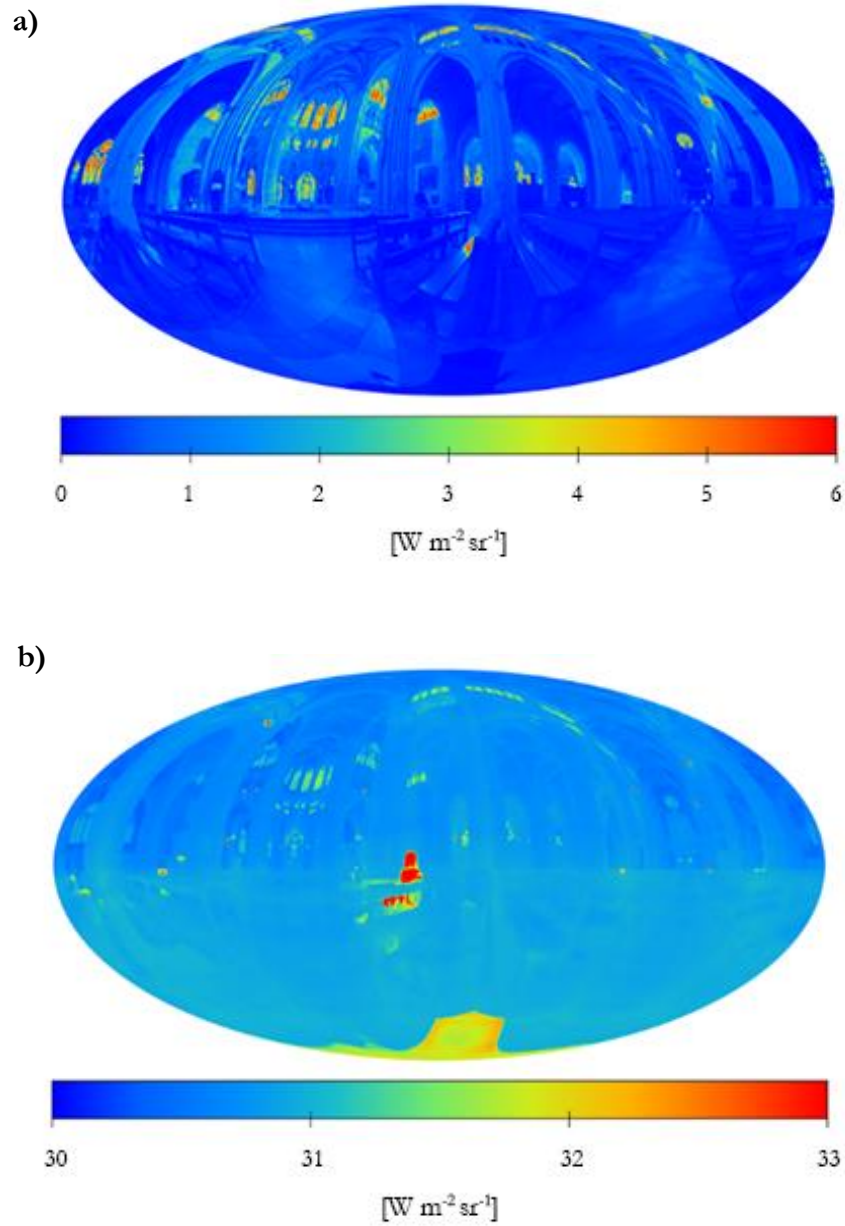


Figure 47. À l'intérieur de la cathédrale de Bayonne.
a) Radiances ondes courtes b) Radiances ondes longues

Cette scène répond aux conditions idéales pour lesquelles la température rayonnante moyenne a été conçue et, grâce à la méthode 4π , il est facile de comprendre pourquoi. Dans une telle scène, la T_{mrt} dépend principalement du rayonnement d'ondes longues et la visualisation de l'environnement radiatif révèle que la scène est très uniforme, tant pour les ondes longues que pour les ondes courtes. Cela explique

pourquoi la portée nécessaire pour représenter les deux images est réduite et encore plus limitée pour les ondes longues.

La deuxième scène se trouve sous l'entrée de la cathédrale, à la place Pasteur. Au moment de la mesure, le ciel était nuageux et la vitesse du vent faible (0.69 m s^{-1}). Le rayonnement ondes longues (377.95 W m^{-2}) est plus faible qu'à l'intérieur de la cathédrale dû au facteur de vue du ciel. En raison de la présence du rayonnement solaire diffus (31.18 W m^{-2}) (Figure 48), la température moyenne rayonnante s'élève au-dessus de la température de l'air (283.25 K) (Figure 49).

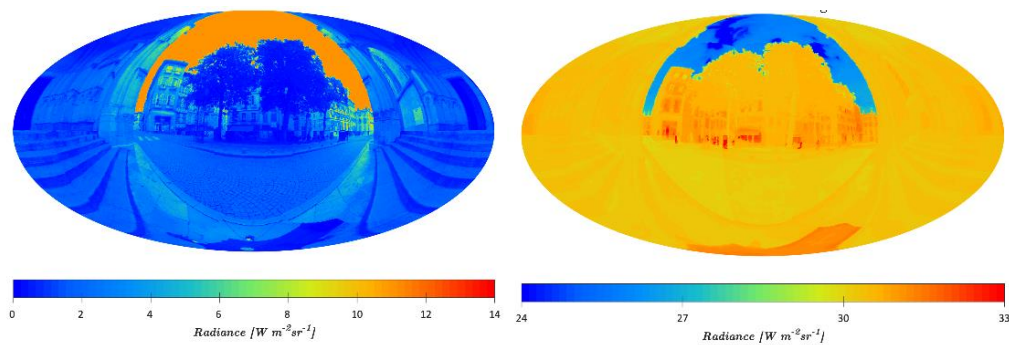


Figure 48. Place Pasteur.
a) Radiances ondes courtes b) Radiances ondes longues

Sur les bords de l'image, il est possible d'observer la maçonnerie en pierre à une température uniforme. Ceci contraste avec les températures hétérogènes des bâtiments avoisinants. Cela comprend les murs de différentes épaisseurs et les surfaces vitrées. L'épaisseur et la densité des matériaux affectent la masse thermique des objets de la scène, tandis que leurs caractéristiques de surface, leur couleur et leur rugosité affectent la proportion de l'énergie réfléchie ou absorbée. Ceci peut être observé au moyen de la thermographie.

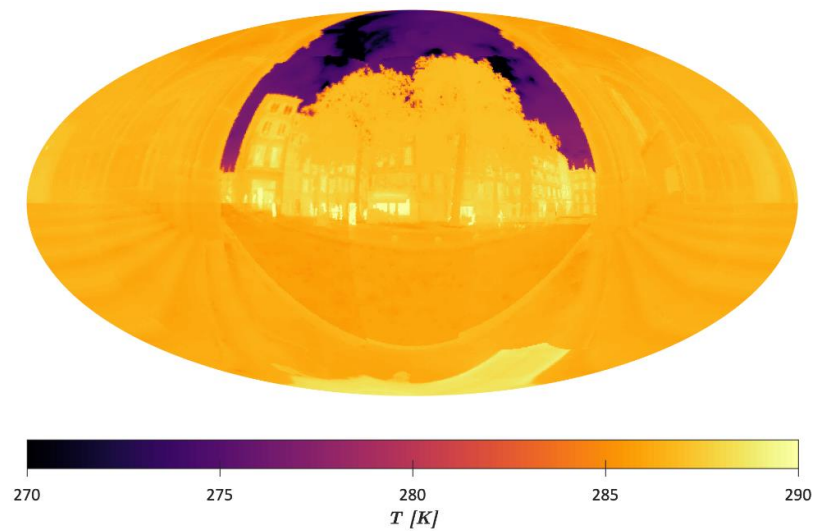


Figure 49. Carte des Températures apparentes à la Place Pasteur.

La troisième scène illustre l'intersection de 5 rues à la place Cinq Cantons, où chaque rue a une orientation différente. Ici, la vitesse du vent est la plus élevée de tout le parcours ($0,92 \text{ m s}^{-1}$) et elle reste inférieure à 1 m s^{-1} . La somme des flux en ondes courtes et en ondes longues donne un flux équivalent à une température moyenne rayonnante égal à $290,37 \text{ K}$.

Pour le rayonnement à ondes courtes (Figure 50), la couleur de la surface a une relation directe avec son coefficient de réflexion et son influence dans un quartier urbain compact a montré que la réhabilitation à l'échelle urbaine est possible grâce à des décisions seulement architecturales [Beckers 2020].

Les couleurs et la composition de la façade sont d'une grande importance, en particulier à la base des canyons urbains étroits en raison de l'accès restreint à la lumière naturelle et aux apports solaires.

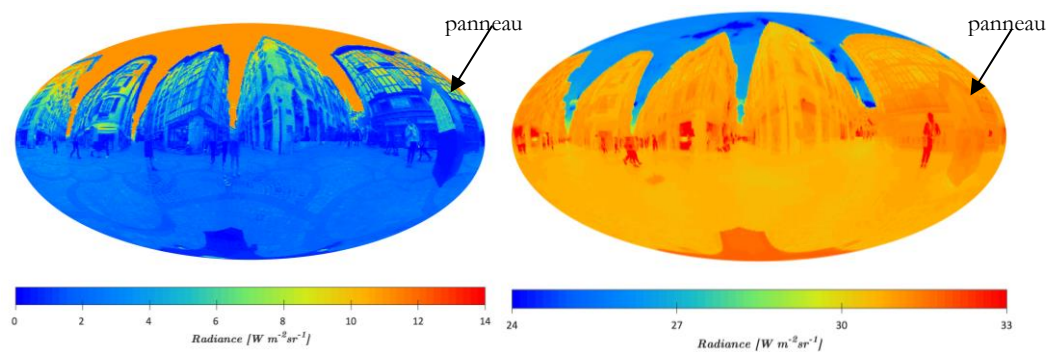


Figure 50. Place des Cinq Cantons.
a) Radiance ondes courtes b) Radiance ondes longues

Pour les ondes longues (Figure 50b), la réflexion est liée à la rugosité de la surface. Une surface métallique polie produit une réflexion spéculaire dans le spectre visible et infrarouge. Cependant, une surface rugueuse peut produire une réflexion diffuse pour la partie visible du spectre et une réflexion spéculaire pour la partie du spectre infrarouge. Ce comportement est dû à la relation entre la rugosité de la surface et la longueur d'onde du rayonnement incident. Ce comportement est clairement visible sur la droite des images Figure 50a et Figure 50b. Pour les ondes courtes, la surface du panneau est complètement diffuse alors que pour les ondes longues, elle a une forte composante spéculaire.

La quatrième scène représente une rue étroite. Les mêmes surfaces présentent une décroissance de température en rapport avec la hauteur de la façade. Ceci s'explique par l'augmentation du facteur de vue du ciel. Quand la façade s'élève, le ciel la refroidit. Les conditions météorologiques dans cette scène sont relativement stables par rapport à la précédente.

Sur la Figure 51, on peut voir que des appartements avec une isolation déficiente agissent comme une source de chaleur vers l'extérieur, ce qui est visible à travers la thermographie. Plus précisément, on peut noter les tâches de chaleur sous les fenêtres du premier étage du bâtiment de la façade Nord (aux extrémités de l'image). Celles-ci correspondent aux radiateurs installés à l'intérieur de la façade clairement visibles depuis la rue. Cependant, ces résultats restent qualitatifs.

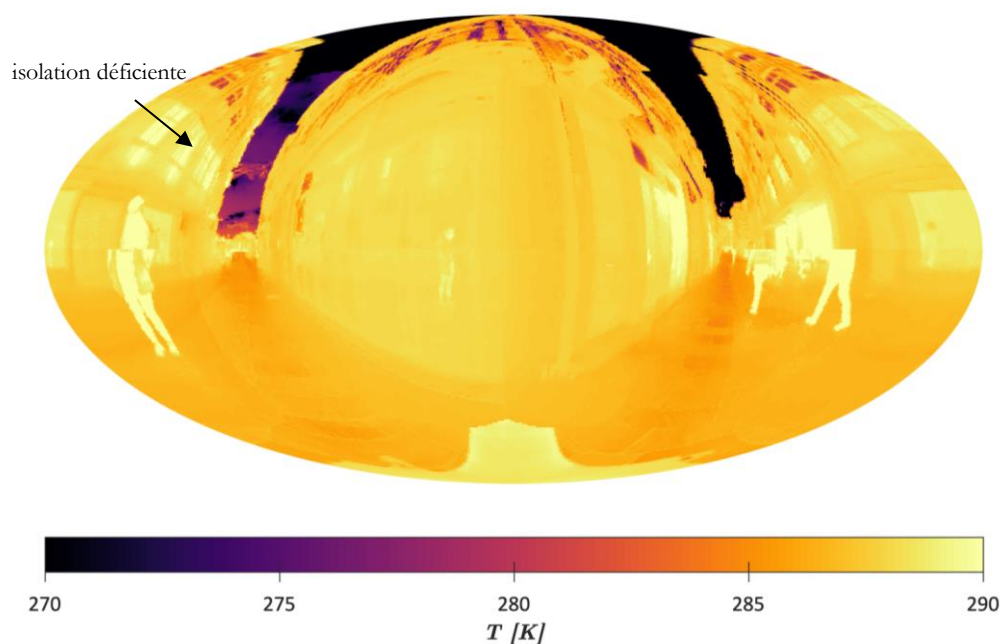


Figure 51. Place des Cinq Cantons. Température apparente.

La cinquième scène a été prise au-dessus du pont Marengo sous un ciel partiellement couvert. En raison de la spatialisation de l'information thermique, on peut observer pourquoi la température du globe noir surestime les valeurs aux pôles puisqu'on voit que pour une sphère, le sol a une grande importance puisqu'il représente presque 90% de l'hémisphère inférieur. De même, en plein air, le ciel occupe presque la totalité de l'hémisphère supérieur.

Dans cette image, la présence du ciel a une énorme importance. D'un côté, il est la source de chaleur due au rayonnement solaire en ondes courtes. De l'autre côté, c'est une grande source de refroidissement dû au rayonnement terrestre en longues ondes (vers le ciel).

La sensibilité spectrale ($7.5-13\ \mu\text{m}$) de la caméra fait que la température rayonnante mesurée du ciel est inférieure à la température réelle du ciel [Takagi, 1967].

Cela est clairement visible sur l'image Figure 52. Elle représente la spatialisation des radiances correspondant aux ondes courtes. L'hémisphère supérieur (le ciel) a les valeurs les plus élevées de la scène. Le contraire est vrai pour les ondes longues. C'est la première scène de tout le parcours où le rayonnement direct du soleil est enregistré, même s'il est limité en raison des conditions du ciel.

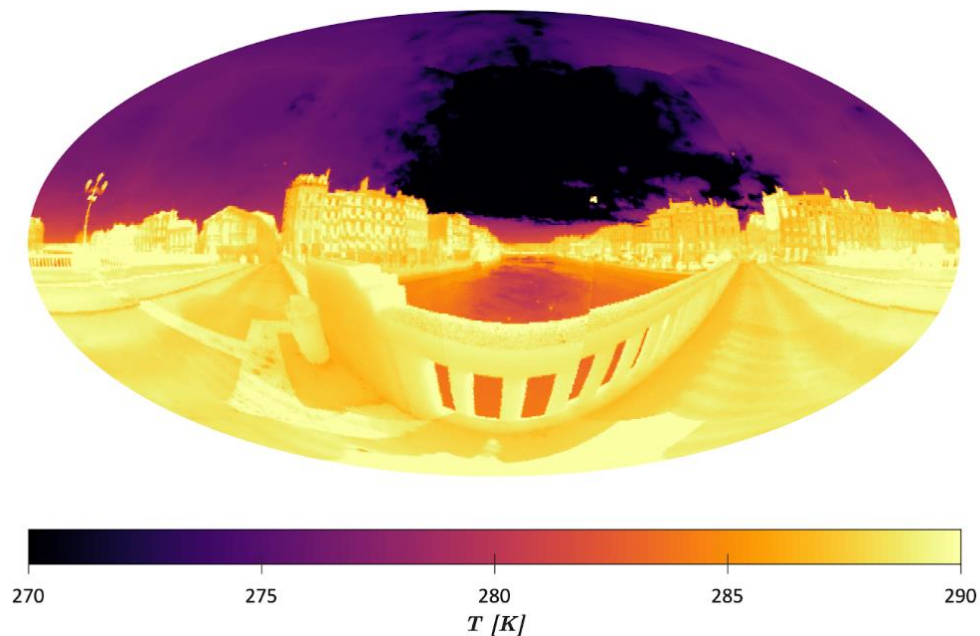


Figure 52. Pont Marengo. Température apparente.

Campagne d'été

À Cordoue, sur la Place des Capuchinos, la scène est mesurée deux fois pour observer la variation des flux de rayonnement entre la nuit et le jour.

La première mesure est effectuée pendant la nuit pour éviter complètement les contributions des ondes courtes. La Figure 53 a été saisie à minuit. Dans cette scène, toutes les températures semblent très similaires, à l'exception du ciel qui est beaucoup plus froid.

Pendant la nuit, en raison de l'absence de rayonnement à ondes courtes, la couleur des surfaces a moins d'influence que leur émissivité, celle-ci étant difficile à déterminer avec précision. Une légère différence d'émissivité a un impact sur la température de la surface. Les matériaux de construction traditionnels présentent souvent une émissivité similaire au-dessus de $\varepsilon = 0,90$. Par conséquent, une subtile différence d'émissivité peut expliquer une différence de température. La haute émissivité des éléments d'une scène urbaine leur permet d'être considérés comme des radiateurs à corps noir, malgré quelques exceptions. Ainsi, leur émission est toujours diffuse et les échanges radiatifs entre les éléments de la scène sont en accord avec leurs facteurs de vue. Le ciel, à basse température, contraste avec le reste de la scène. Par conséquent, les surfaces de la scène ayant une plus grande vue du ciel échangeront davantage avec celui-ci. L'émission de la scène vers le ciel est responsable du refroidissement radiatif.

Cependant, l'influence du ciel sur les murs et le sol n'apparaît pas de façon intuitive. Puisque l'exposition des murs au ciel est plus limitée que celle du sol, la température des murs devrait être plus élevée. En raffinant l'observation, avec une plage plus réduite et un niveau plus élevé, cet effet peut être clairement visualisé si l'on fait un gros plan sur le sol pavé de la place. Ici, on peut voir comment les galets ronds montrent une température plus basse dans les zones exposées au ciel. Dans ces zones, la température est en fait inférieure à celle des murs, alors que dans les interstices, elle est plus élevée.

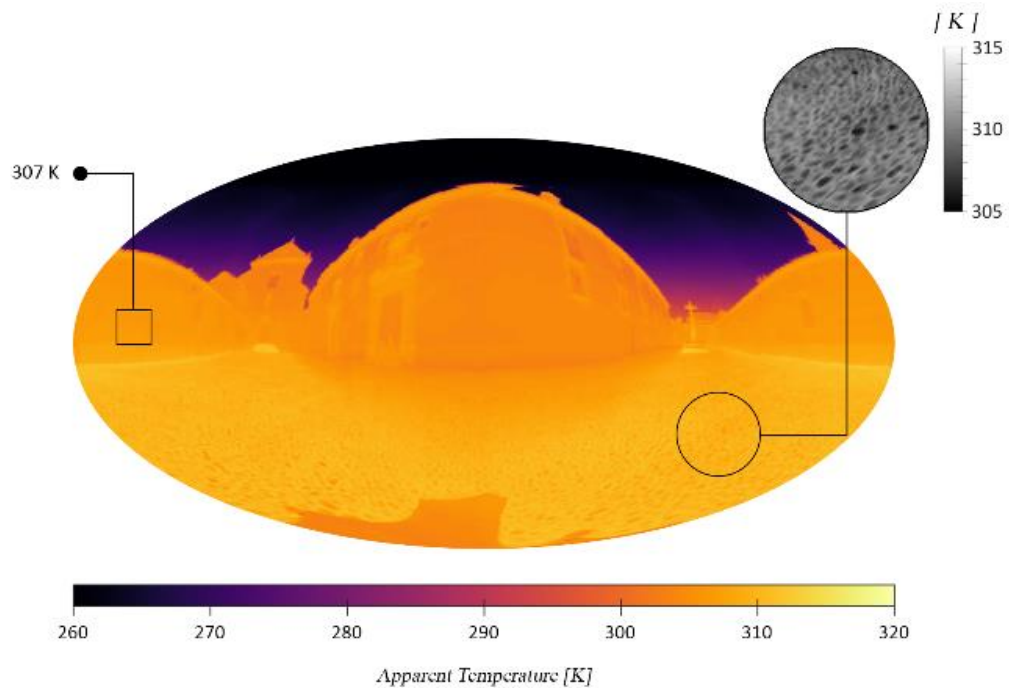


Figure 53. Place des *Capuchinos* (Cordone – Espagne):
Carte de température apparente enregistrée le 24 juillet à 00:00 ST

Pour la même scène, à midi, et sous le soleil estival d'un ciel dégagé, la première différence est la plage nécessaire pour interpréter l'image. Cette mesure a été effectuée une heure et demie après que le soleil a atteint le point le plus haut dans le ciel (Figure 54).



Figure 54. Place des *Capuchinos*. Photographie enregistrée le 24 juillet à 13:30 ST

Les valeurs des radiances en ondes longues (Figure 56) sont environ deux fois plus élevées que celles mesurées à l'intérieur de la cathédrale de Bayonne (Figure 47a). Cela est dû aux hautes températures (Figure 55). Il est facile d'identifier trois sources principales de rayonnement à ondes longues dans cette scène : le ciel, l'environnement bâti et le sol. La contribution du ciel aux rayonnements ondes longues est la plus faible de la scène et elle décroît entre l'horizon et le zénith. Cela s'explique par sa faible température et par la grande épaisseur de l'atmosphère à proximité de l'horizon, ainsi que par l'absence de nuages.

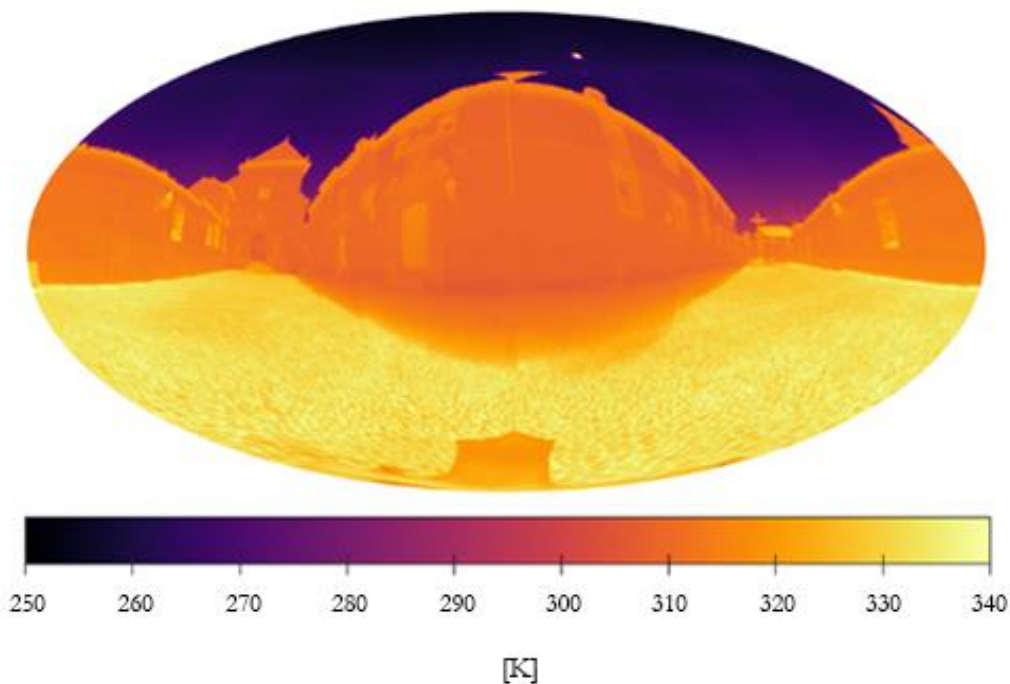


Figure 55. Place des *Capuchinos*.
Carte de température apparente enregistrée le 24 juillet à 13:30 ST

Pour les ondes courtes, les radiances mesurées (Figure 56) peuvent être jusqu'à dix fois plus élevées à Cordoue qu'à Bayonne, en raison du rayonnement solaire direct et des teintes très claires de ses façades urbaines. Pendant la journée, les couleurs des surfaces ont une grande importance (Figure 54). Sous la lumière directe du soleil, les murs en maçonnerie blanchis à la chaux de la place des Capuchinos deviennent la deuxième plus grande source de rayonnement à ondes courtes après le soleil. Le revêtement de chaux qui recouvre les murs diminue leur absorptance α_{sw} dans le spectre des ondes courtes. Sur la Figure 56, on peut voir que, lorsqu'ils sont exposés à la lumière du soleil, les murs blancs rayonnent de grandes quantités d'énergie par réflexion ($\rho_{sw} = 1 - \alpha_{sw}$). En revanche, le sol affiche des valeurs beaucoup plus

faibles. Les galets gris qui le recouvrent ont un coefficient α_{sw} beaucoup plus élevé que celui des murs. Par conséquent, il ne réfléchit pas autant. Le rayonnement absorbé en ondes courtes est émis en ondes longues. Cela explique pourquoi le mur des bords de l'image, qui reçoit la lumière directe du soleil, ne diffère pas beaucoup du mur du centre, qui est dans l'ombre. En revanche, comme le sol a un coefficient α_{sw} beaucoup plus élevé que les murs, il affiche des valeurs bien plus élevées en ondes longues.

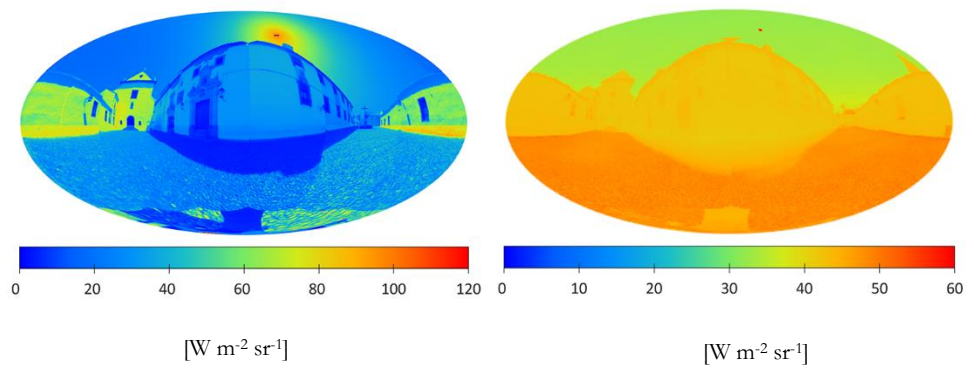


Figure 56. Place des *Capuchinos*
a) Radiances ondes courtes b) Radiances ondes longues

Pour les ondes longues, $E_{e,o_{LW}}$ est égal à 537 W m^{-2} tandis que pour les ondes courtes $E_{e,o_{sw}}$ est égal à 399 W m^{-2} . Comme dans toutes les autres scènes, l'irradiance en ondes longues est supérieure à celle en ondes courtes, mais cette fois, l'écart est moins important. Bien que la contribution globale soit plus importante en ondes longues, les valeurs locales peuvent devenir beaucoup plus importantes en ondes courtes. Une comparaison visuelle entre la Figure 56a et la Figure 56b révèle aussi certains effets temporels du rayonnement à partir d'une seule capture. Le rayonnement en ondes courtes est instantané ; le mur du couvent interrompt la lumière, qui voyage du soleil vers le sol de la place et cela génère une ombre parfaitement délimitée. Celle-ci est visible au centre de l'image. Lorsque le soleil se déplace, l'ombre se déplace à la même vitesse. Le rayonnement en ondes longues se comporte différemment. Il est inertiel. Comme expliqué précédemment, la place reçoit de l'énergie par le rayonnement en ondes courtes, qui est absorbé, puis émis sous forme de rayonnement en ondes longues. Cependant, l'inertie thermique empêche ce processus d'être instantané, ce qui rend "l'ombre" infrarouge floue.

Jusqu'à présent, chaque partie du spectre a été étudiée individuellement. La combinaison des deux dans une seule représentation graphique présente des avantages. Pour une étude qualitative, cela signifie améliorer le contenu informatif

de l'image en raison du niveau de détail élevé fourni par les ondes courtes. Cela permet d'identifier plus facilement les objets ou les caractéristiques de la scène, simplifiant ainsi son interprétation. Pour une étude quantitative, la combinaison des deux images permet d'évaluer la scène en termes de flux total (Figure 57), en déterminant les zones d'intérêt tout en gardant le lien avec la géométrie de la scène.

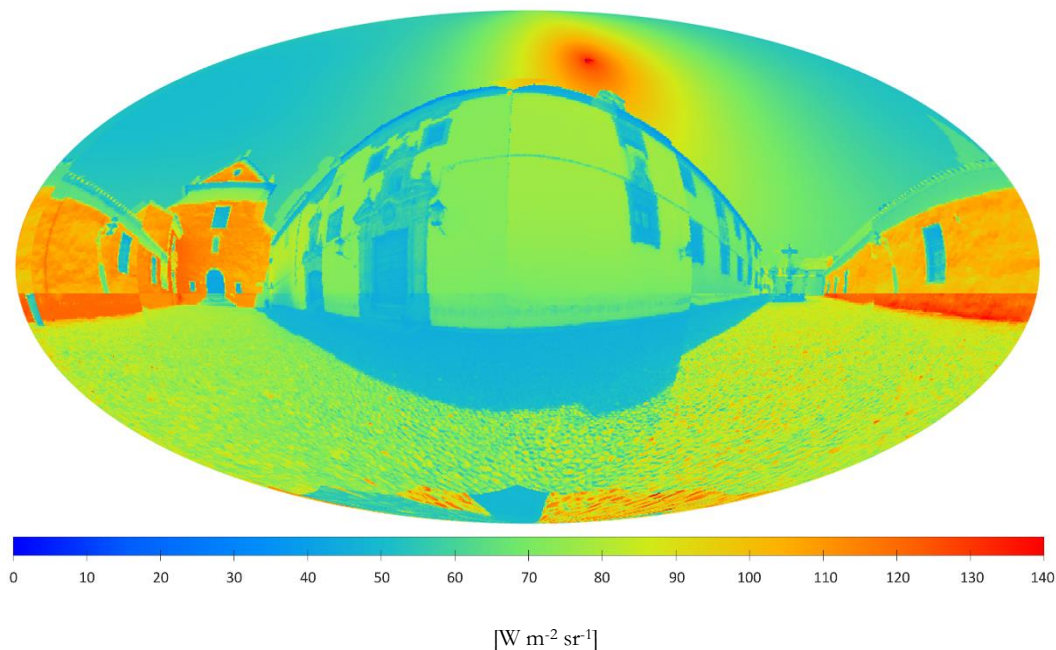


Figure 57. Carte du rayonnement total obtenue à partir de la combinaison des ondes courtes et des ondes longues. Enregistrée le 24 juillet à 13h30 ST.

Ce lien, qui permet d'évaluer qualitativement la scène radiative, sert également à son étude géométrique. Étant une projection équivalente, elle respecte les surfaces. Ainsi, la relation entre le ciel et la totalité de la sphère permet une détermination simple de l'angle solide du ciel (SSA).

Pour mieux comprendre l'environnement radiatif, il est intéressant de l'étudier dans des conditions extrêmes. En conséquence, la scène analysée dans les Figures 53 à 57 a été choisie parce qu'elle représente la première heure du matin et l'heure la plus chaude de la journée (13h30) le 24 juillet 2019. Ceci correspond au moment le plus fort de l'une des plus intenses vagues de chaleur de l'histoire.

La Figure 57 est le résultat de la combinaison de la Figure 56a et de la Figure 56b. Elle représente l'intégration de l'énergie dans le spectre tout en conservant la composante spatiale.

Cette image (Figure 57) correspond donc à l'environnement radiatif qui donne un T_{mrt} de 353,8 K. Les champs radiants asymétriques prononcés qui différencient fréquemment un environnement radiatif extérieur d'un environnement radiatif intérieur sont visibles.

Cette scène, qui a reçu les rayons du soleil toute la matinée, a maintenant atteint sa température la plus élevée même si le rayonnement direct continue à toucher la place et ses murs blancs. Ces murs qui reflètent le rayonnement direct du soleil obstruent également le ciel et cela a un impact majeur sur l'équilibre radiatif de la place. Non seulement il y a une diminution du rayonnement sortant sur les ondes longues, mais il est également affecté par la réflexion des ondes courtes. Plus important encore, en raison de la température de ces surfaces qui obstruent le ciel, l'équilibre radiatif a une augmentation significative du rayonnement d'ondes longues et celui-ci est toujours présent la nuit.

Pouvoir identifier chacun des éléments de la scène et quantifier leur influence dans l'environnement radiatif peut aider à hiérarchiser les différentes stratégies possibles dans un projet urbain. Le premier élément identifié est le ciel, qui se distingue par son double caractère. En ondes longues, il est responsable du refroidissement radiatif. En ondes courtes, il est la source de toute la radiation.

Des études ont été menées sur des stratégies pour ombrager la ville, y compris en incluant de la végétation, l'incorporation de structures ou de textiles [Lee 2018]. Bien qu'elles réduisent toutes les contributions des ondes courtes, elles réduisent également le SSA. Le deuxième élément est l'ensemble des surfaces verticales. Elles représentent environ un tiers de la scène et sont responsables de 324 W m^{-2} du rayonnement total, même si presque la moitié d'entre elles sont à l'ombre. Le troisième élément est le sol. Dans ce cas, la densité énergétique est inférieure à celle des murs, mais elle occupe 90 % de l'hémisphère inférieur.

Ce type d'étude rassemble suffisamment d'informations pour guider un projet urbain ou architectural et la possibilité de visualiser l'environnement permet une utilisation aisée de la méthode.

La possibilité de quantification des éléments radiatifs et géométriques de la scène à partir d'une seule mesure permet d'étudier les environnements urbains de manière précise. Cela permet de mieux comprendre le phénomène physique des échanges radiatifs.

La deuxième scène se trouve sur la Place de la Corredera (Figure 58). Cette place est la seule place principale quadrangulaire d'Andalousie, ses dimensions sont de 113 mètres de long et 55 mètres de large. Les façades qui ferment cette place sont

soutenues par des portiques et des arcades. Du centre de la place, le ciel occupe 32,70% de la sphère, soit presque 10% de plus que dans la scène précédente.

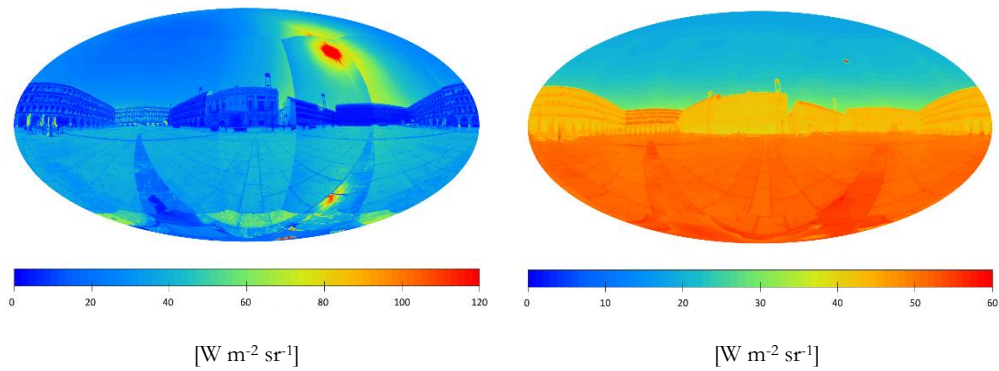


Figure 58. Place de la Corredera.

a) Radiances ondes courtes b) Radiances ondes longues

En regardant l'image Figure 59, on voit qu'au moment où cette scène a été prise, le soleil était à 77° vers l'ouest avec une altitude de 46° par rapport à l'horizon. L'heure solaire est 14h04. On peut observer sur cette image qu'en raison de l'élévation du soleil et de l'orientation de la place, le soleil affecte de la même manière le sol et la façade Est de la place, ces deux sont des sources importantes de rayonnement.

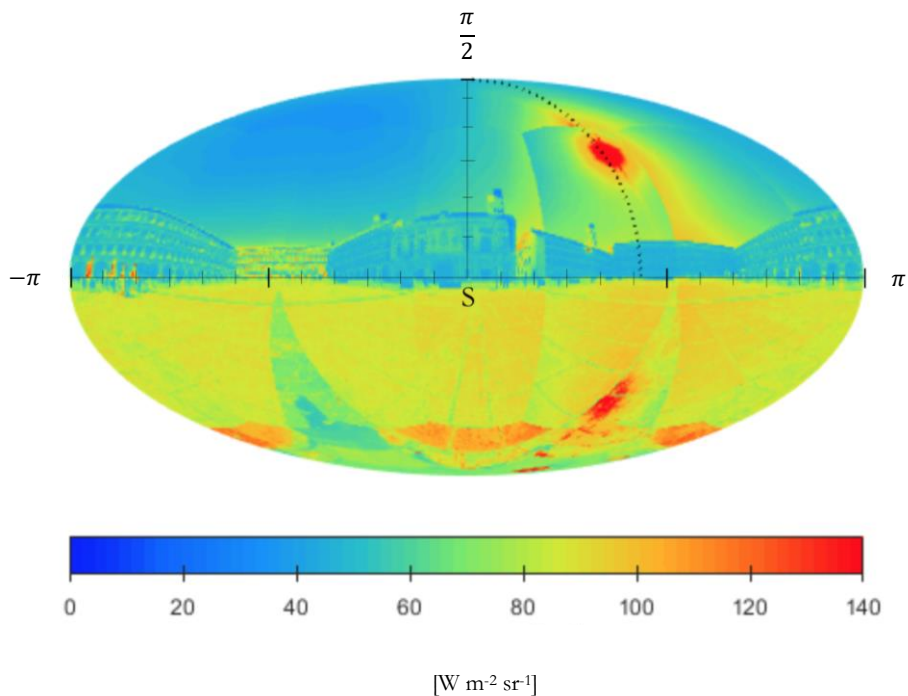


Figure 59. Place de la *Corredera*. Carte du rayonnement total

Deux heures après le midi solaire, la scène a eu le temps d'absorber le rayonnement du matin et bien que le soleil ait commencé à baisser, les températures enregistrées sont les plus élevées de la promenade. Alors que la température de l'air est de 313,65 K, la température rayonnante moyenne au même point est de 350,59 K. Les matériaux de la scène sont relativement sombres et leur émissivité est très élevée. L'exposition au rayonnement ajouté à l'inertie thermique entraîne une température rayonnante moyenne élevée.

La troisième scène provient de la rue de la Hoguera. Cette rue étroite présente une configuration intéressante. Comme certaines ruelles cordouanes, de tradition arabe, elle présente des arcs qui relient une façade à l'autre. Cela limite la portion du ciel visible. C'est pour cette raison que cette scène ressemble fortement à un intérieur. Le pourcentage de l'image occupée par le ciel n'est que de 2,82%.

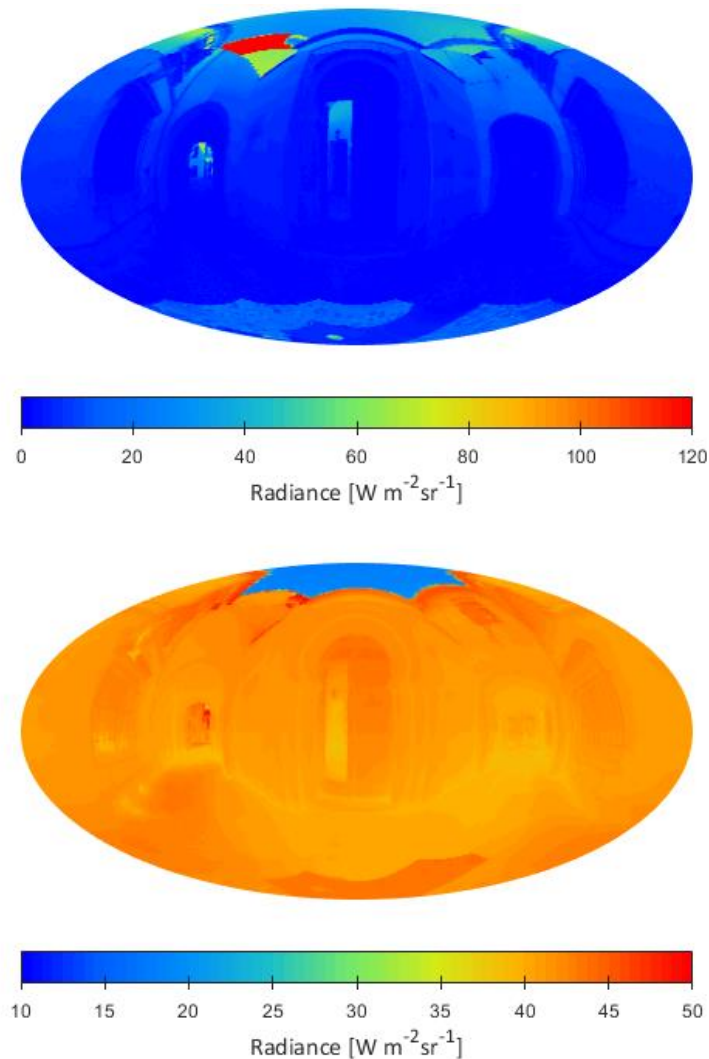


Figure 60.Scène 4 – Rue de la Hoguera – Mosquée des Andalous.

Ainsi les radiances en ondes courtes présentent des valeurs très faibles (Figure 60), le $E_{e,osw}$ étant égal à $23,20 \text{ W m}^{-2}$, est comparable à celle mesurée à Bayonne sous un ciel couvert. En raison de la configuration de la rue, en l'absence de rayonnement solaire direct la température rayonnante moyenne ($318,14 \text{ K}$) dépend essentiellement de la température de la scène. C'est le plus bas niveau enregistré le long de la promenade.

La dernière scène de la promenade se trouve sur le vieux pont romain de Cordoue (Figure 61). Il n'y a pas d'éléments de protection solaire. À partir d'une hauteur de $1,2 \text{ m}$, le ciel occupe environ 47% de la sphère. La contribution en ondes courtes est de $343,96 \text{ W m}^{-2}$ et la contribution en ondes longues est de $456,86 \text{ W m}^{-2}$.

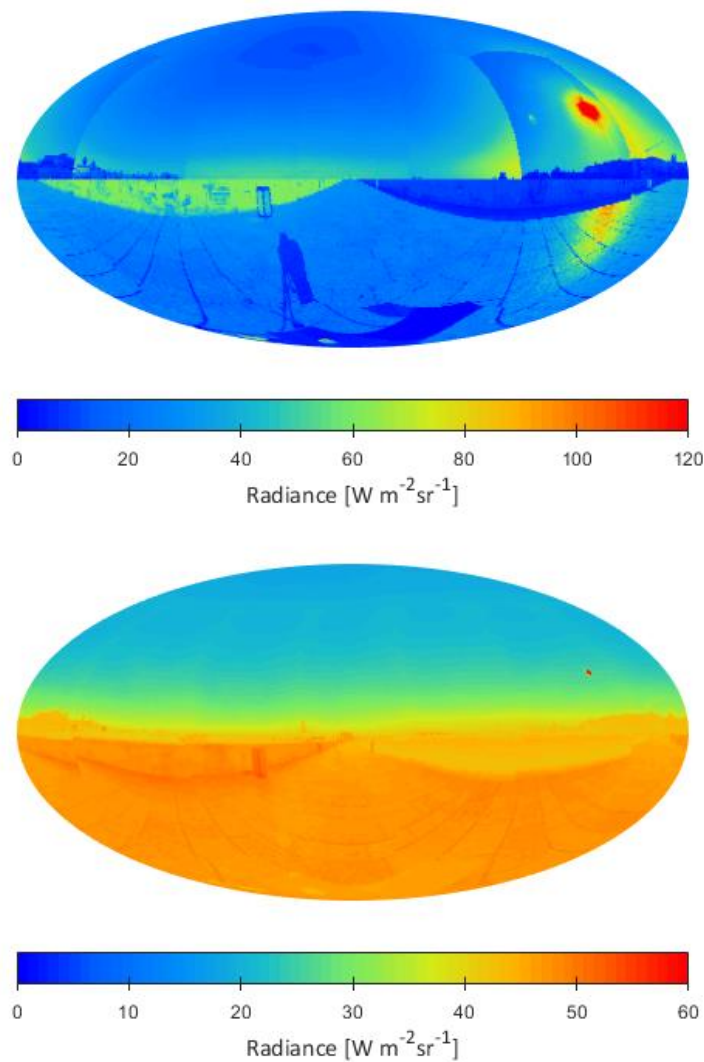


Figure 61.Scène 5 - Pont romain de Cordoue.

3.5. Discussion

Contribution à la physique urbaine

La méthode 4π est une nouvelle approche pour estimer la température rayonnante moyenne. Son résultat visuel et géométrique en fait un outil au potentiel bien plus important que le thermomètre à globe noir. L'un de ses points forts réside dans la relation avec l'angle solide, qui facilite une meilleure compréhension de la scène urbaine.

Pour illustrer cette idée, le sol de la place des Capuchinos (à gauche) est comparé à celui du pont romain (à droite) (Figure 62a). Les conditions sont similaires dans les deux cas et l'irradiance à ondes courtes ne varie que de 2 W m^{-2} . Ces deux sols en pierre se distinguent exclusivement par leur texture. L'effet de la rugosité sur le rayonnement thermique a été étudié théoriquement [Sacadura 1972], montrant qu'une rugosité accrue entraîne une plus grande émissivité.

Les Figures 62b et 62c montrent la radiance en ondes longues du sol en ces deux endroits par le biais de projections azimutales équivalentes de l'hémisphère inférieur. La Figure 62b montre les deux scènes diurnes et la Figure 62c nocturnes. Puisqu'elles ont été capturées à une altitude de 1,2 mètres, la plus grande partie de l'image est occupée par le sol.

La différence entre les deux textures du sol apparaît clairement en ondes longues. Une surface rugueuse signifie une plus grande surface d'échange. Bien que l'on puisse s'attendre à ce que le refroidissement radiatif soit favorisé, la rugosité du sol retient la chaleur acquise pendant la journée. En effet, la géométrie des galets ne permet qu'une petite surface d'échange avec le ciel pour être refroidie alors la chaleur reste emprisonnée entre les interstices.

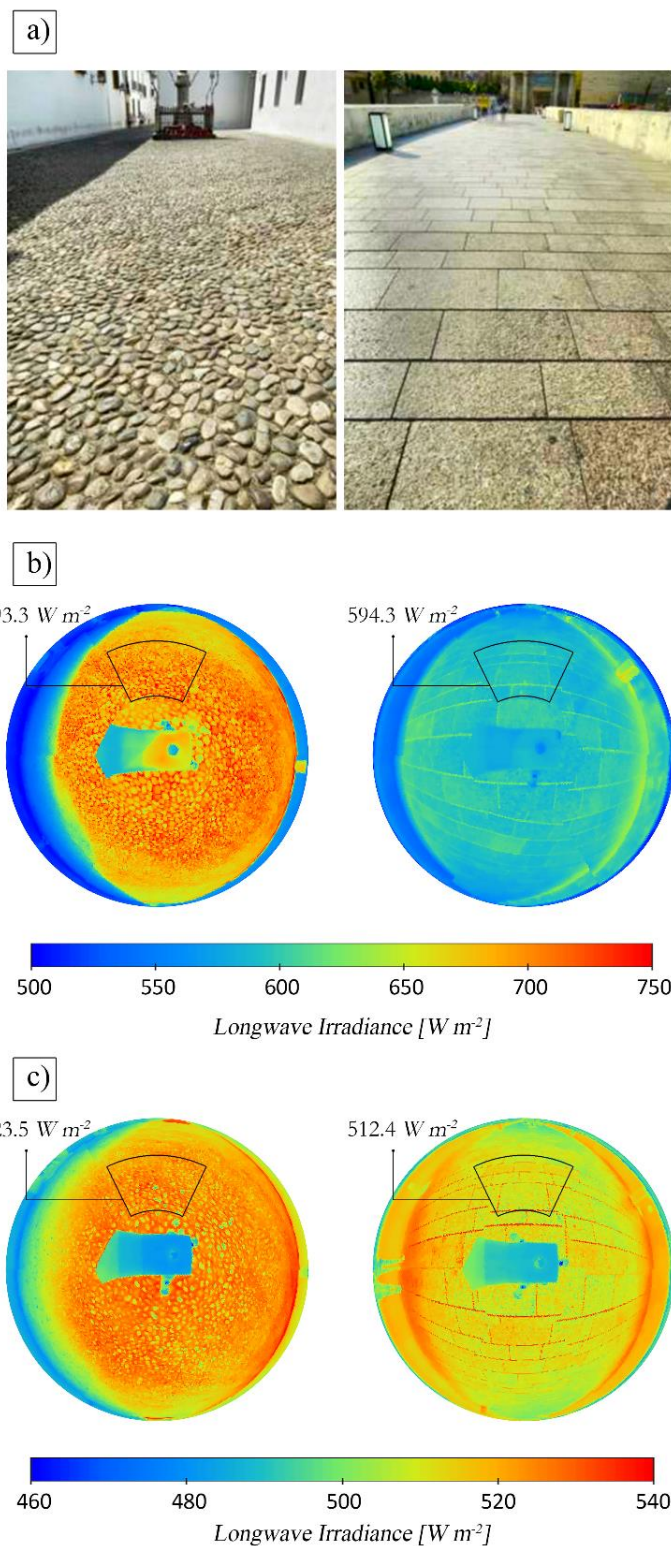


Figure 62. Texture du sol. a) Comparaison photographique entre La place des Capucins et le pont romain
b) Irradiance ondes longues diurne c) Irradiance ondes longues nocturne

Pour comparer l'irradiance moyenne des ondes longues, un angle solide de $0,52 \text{ sr}$ a été sélectionné au centre de chaque scène. C'est l'angle solide le plus important qui a permis d'éviter l'influence de la géométrie urbaine et du dispositif expérimental. On peut voir que de jour (Figure 62b) comme de nuit (Figure 62c), un sol à texture rugueuse émet plus d'énergie qu'un sol lisse. Le jour, la différence est de l'ordre de 100 W m^{-2} alors que la nuit, elle est proche de 12 W m^{-2} . Cela représente environ 15 % de moins d'énergie thermique émise par le sol pendant les heures les plus chaudes.

Sur la place Capuchinos, le sol occupe un angle solide de $1,78 \pi \text{ sr}$, ce qui représente la majorité (57,14 %) de la surface de la sphère. Le remplacement du sol rugueux de la place par un sol lisse qui rayonne en moyenne $594,3 \text{ W m}^{-2}$ montre que dans un tel cas, une diminution de cette ampleur peut représenter une baisse de la température rayonnante moyenne d'environ 3 degrés pendant la journée et d'environ 1,5 degré pendant la nuit. Des observations de cette nature fournissent des indications fondamentales à l'urbaniste ou au concepteur et ne sont possibles que par cette méthode, car même par simulation, un tel calcul n'est pas possible aujourd'hui.

Contribution technique

Cette méthode présente une configuration qui fonctionne convenablement avec deux caméras standard, bien qu'il soit possible d'améliorer la méthode en ondes courtes lorsque le ciel est clair et que le soleil est présent. En ondes longues, l'utilisation d'une caméra thermique LWIR a montré qu'il est possible d'évaluer la scène dans sa plage de mesure et d'étendre le résultat à toutes les ondes longues.

La caméra thermique LWIR a une résolution de 320×240 pixels et utilise un objectif avec un champ de vision de $90^\circ \times 73^\circ$. En une rotation, elle capture 1 075 200 pixels. Les résultats ont montré que seuls 4 000 pixels suffisent pour calculer la température rayonnante moyenne. Cependant, pour une haute résolution visuelle, 300 000 pixels sont recommandés. L'objectif grand angle réduit le nombre d'images nécessaires pour couvrir la sphère. Si l'intérêt se porte sur la performance énergétique, la brièveté avec laquelle les mesures peuvent être prises facilite la saisie de séquences en temps réel qui permettent d'observer l'évolution d'une scène. Toutefois, pour approfondir les échanges radiatifs et les températures de surface, il est obligatoire de projeter l'image sphérique sur un modèle 3D de la scène.

Enfin, si le temps n'est pas une contrainte, un appareil moins performant pourrait donner des résultats acceptables, même si cela nécessiterait plus d'images pour couvrir la sphère.

3.6. Conclusion

La méthode 4π permet d'évaluer avec précision la composante radiative d'une scène urbaine en évitant les effets de convection. Elle utilise des caméras photographiques et thermiques LWIR. Ainsi, le rayonnement est mesuré entre 380 nm - 780 nm et 7,5 μm à 13 μm et extrapolé à l'ensemble des spectres d'ondes courtes et d'ondes longues respectivement. La combinaison de ces deux mesures donne la radiance totale de la scène. Par conséquent, en intégrant les résultats de la méthode 4π , dans le spectre et l'espace, il est possible de quantifier avec précision la T_{mrt} dans des environnements complexes.

Comme indiqué dans l'introduction, l'intérêt de travailler sur l'environnement radiatif urbain est présent à différentes échelles. Cette méthode a été conçue dans le but de mieux comprendre le phénomène radiatif dans la scène urbaine pour pouvoir agir sur lui. Étant donné la complexité des scènes urbaines, une mesure capable de synthétiser de grandes quantités d'informations est utile et son résultat visuel permet une évaluation rapide.

La méthode 4π est le seul moyen de fournir des informations aussi détaillées sur le paysage radiatif de la ville et sa valeur réside dans la relation entre les angles solides et les informations radiométriques de la scène. D'autres méthodes de mesure ne tiennent pas compte de la distribution spatiale du rayonnement alors que, en raison de la complexité de la géométrie urbaine, le niveau de détail requis n'est pas encore atteint pour la simulation.

4. Mesures à l'échelle urbaine : La scène urbaine en perspective

4.1. Introduction

La rue est l'élément urbain le plus présent dans la ville et le succès de sa conception dépend des conditions environnementales qui y sont présentes. L'impact de ces conditions s'observe à de multiples échelles ; celle du piéton qui la traverse, celle de l'intérieur des bâtiments qui la délimitent ainsi que celle de la ville dans son ensemble. Ces trois échelles sont représentées par trois domaines d'étude : le confort thermique urbain, la performance énergétique des bâtiments et l'îlot de chaleur urbain. Leur point commun est la quantification de la température des surfaces dans la ville.

La température de surface est le résultat d'échanges énergétiques complexes et ne peut pas être mesurée directement. Son effet peut être observé par des phénomènes physiques et être mis en relation avec une échelle. Par exemple : lorsqu'un circuit formé de deux fils de métaux différents entre en contact avec une surface, la différence de température crée une différence de potentiel électrique. Réciproquement, en appliquant une tension à une surface, on peut induire une différence de température précise. Cela est dû à l'effet thermoélectrique qui permet une mesure simple de la température de surface où la précision dépend notamment du contact entre le capteur et la surface étudiée. En raison de cette simplicité, la méthode de mesure par contact est de loin la plus utilisée.

Cette méthode permet de sélectionner un point d'intérêt ou un point représentatif de la surface sur lequel la température peut être mesurée de manière précise. Toutefois, la température de surface dans une scène urbaine n'est pas uniforme. Lorsque la connaissance de la répartition spatiale de la température est nécessaire, son caractère ponctuel présente un inconvénient.

La thermographie permet d'observer la distribution spatiale de la température sur la scène. Le capteur de la caméra (bolomètre) mesure la radiance de la scène et, étant calibré avec un corps noir, il permet l'estimation d'une température équivalente (aussi appelée température apparente). En réalité, le bolomètre reçoit le rayonnement non seulement de l'objet étudié mais aussi d'autres sources. Ces sources sont : l'atmosphère, qui se trouve entre la caméra et la surface ; et l'environnement, dont le rayonnement est réfléchi sur la surface.

Par conséquent, pour évaluer uniquement la température de surface, certaines corrections sont nécessaires. Ainsi, la température de surface obtenue à partir de la thermographie est une fonction de cinq variables.

$$T_s = f(T_{atm}, \omega, d, T_{amb}, \varepsilon) \quad (58)$$

Ces variables sont : la température de l'air T_{atm} , l'humidité relative ω et la distance d permettent d'évaluer la transmittance de l'atmosphère. La température réfléchie T_{amb} permet de déterminer le flux provenant d'une autre surface de la scène tandis que la proportion selon laquelle celui-ci est réfléchi est déterminée en fonction de l'émissivité $(1 - \varepsilon)$ de la surface étudiée.

Ces corrections sont faciles à introduire au moment de la mesure. Leur mise en œuvre est la deuxième recommandation présente dans la littérature au sujet des caméras thermiques.

La première concerne la position de la caméra par rapport aux surfaces à évaluer. Elle a donc un caractère géométrique. Pour effectuer une évaluation quantitative de la température à l'aide d'une caméra thermographique, il est fortement suggéré que l'angle d'incidence soit inférieur à 45° et jamais perpendiculaire à la surface [Pajani 2012]. Ceci est dû à la dépendance angulaire de l'émissivité et à l'influence du flux réfléchi.

Toutefois, dans des configurations comme celle d'une rue, l'observation quasi-frontale des surfaces urbaines ne permet pas de tirer pleinement parti des qualités de la thermographie, telles que : la visualisation de la distribution thermique et la couverture de grandes étendues à partir d'une seule mesure.

En revanche, une vue en perspective permet d'observer la distribution des températures sur plusieurs surfaces d'une scène à un instant donné mais la température conserve à priori son caractère apparent.

L'utilité de ce genre d'étude en tant que guide pour le développement de techniques de simulation thermique basées sur la méthode des éléments finis (FEM) s'est avérée nécessaire [Aguerre 2019]. Pourtant, cette approche, nouvelle dans les utilisations habituelles de la thermographie en milieu urbain, introduit des défis dans l'interprétation des résultats. [García Nevado 2019a] documente l'existence d'une déviation d'environ 2 K entre les températures obtenues à partir de prises de vue frontales et obliques. Puisque l'observation des surfaces est presque tangente, la déviation a été attribuée à l'influence de l'angle d'incidence sur l'émissivité.

Dans cette section, l'étude de la thermographie dans des perspectives est approfondie et comparée aux thermomètres à contact pour évaluer la validité de cette technique. Chacun des facteurs qui influencent la mesure de la température de surface à l'aide d'une caméra thermique est traité individuellement. Enfin, le cadre procédural pour la mesure de la température en milieu urbain du point de vue du piéton est déterminé.

4.2. Contexte

La thermographie dans l'environnement bâti est essentiellement liée à l'inspection d'espaces architecturaux particuliers, souvent des intérieurs. Le cadre procédural de ce type d'étude a été établi dans la littérature et a été testé par des études capables d'évaluer la température de surface [Minkina 2009] [Usamentiaga 2014] [Vollmer 2017] [Maldague 2001]. Cependant, la plupart de ces études utilisent le résultat visuel de la thermographie pour se concentrer sur des études qualitatives.

La capacité de la thermographie à couvrir de grandes surfaces en une seule mesure a motivé d'autres chercheurs à étudier des échelles de plus en plus grandes. Ceux qui se sont intéressés à la thermographie à l'échelle urbaine ont axé leurs études sur l'acquisition de données aériennes [Weng 2009 ; Lagouarde 2010], en observant principalement les toits et les surfaces horizontales. Puisque ces surfaces sont observées presque perpendiculairement depuis le ciel, la température réfléchie et la directionnalité de l'émissivité passent à un second plan [Artis 1982].

Toutefois, en raison des grandes distances qui séparent l'objet d'étude, l'atténuation atmosphérique est importante et doit être corrigée.

L'étude des températures de surface à l'échelle de la rue entraîne une complexité différente. La mesure de la température de surface est fortement liée à la géométrie. Lorsqu'elle est mesurée par une méthode de contact, la rugosité de la surface peut empêcher un contact correct. De plus, le capteur peut être affecté par des éléments de la scène tels que l'air ou le soleil ou bien sa position sur la surface peut interférer avec la température mesurée.

Lorsque la mesure est effectuée par une méthode sans contact, telle que la thermographie, la présence d'air ou de soleil n'affecte pas le capteur. Cependant, pour corriger le caractère apparent de la température, il est impératif de connaître la géométrie de la scène et d'effectuer des mesures supplémentaires.

4.3. Cas d'étude : Rue des Tonneliers

Une campagne de mesures a été menée dans une rue de grande complexité géométrique, formée de matériaux divers, afin d'évaluer la thermographie en perspective en comparant avec des mesures de température de surface ponctuelles. La rue des Tonneliers est située dans l'un des quartiers les plus denses de France, le Petit Bayonne (Figure 63).

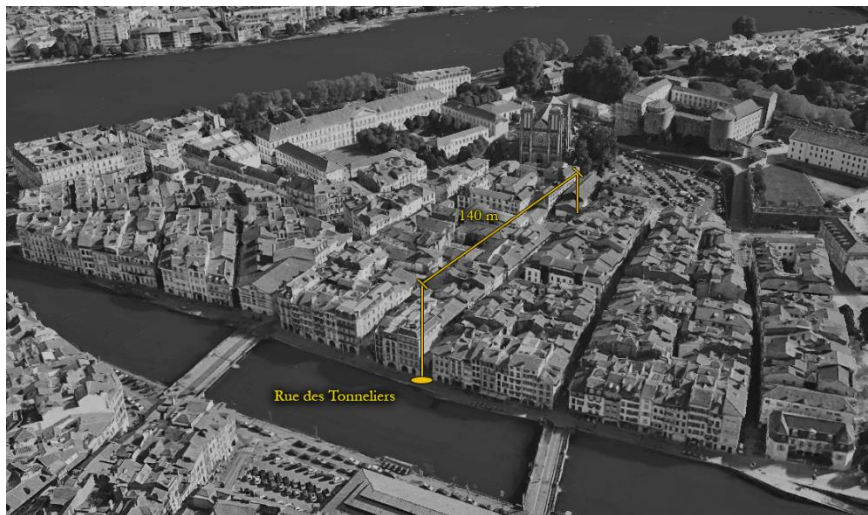


Figure 63. Vue aérienne du Petit Bayonne et emplacement de la Rue des Tonneliers

C'est une rue du centre historique de Bayonne qui présente l'architecture traditionnelle du Pays basque français. Avec une largeur de $L = 6,5$ m et une hauteur moyenne de $H = 15,75$ m. La proportion de sa section est étroite [$L/H = 0,45$].

Avec une longueur de plus de 140 m, cette rue, entourée de bâtiments aux murs blanchis à la chaux et aux cadres en bois colorés, forme un canyon urbain de matériaux mixtes. Tous ces éléments en font une scène riche pour une étude de rayonnement.

4.4. Installation expérimentale

Dans cette scène, la température de surface a été mesurée par deux méthodes différentes, l'une avec contact et l'autre sans contact, pendant 24 heures. En parallèle, la température de l'air, l'humidité relative et la vitesse du vent ont été enregistrées.

Six dispositifs de température à résistance HOBO MX 2303 ont été utilisés pour enregistrer la température de surface à des intervalles de 5 minutes. Ils ont une précision de $\pm 0,25$ °C dans la plage de -40 à 100 °C et leur sensibilité à la convection est moindre pour des vitesses du vent inférieures à 1 m s^{-1} .

Chaque appareil dispose de deux capteurs indépendants et d'un enregistreur de données. Cela a permis de mesurer la température de surface à 12 endroits différents. Ces dispositifs ont été placés sur des points représentatifs de la scène, où des matériaux ayant des caractéristiques différentes sont exposés aux mêmes conditions environnementales. Ces emplacements ont été choisis afin de comparer l'écart entre les deux méthodes avec et sans contact.

La température de l'air et l'humidité relative ont été mesurées à l'aide d'appareils HOBO U12-012 et la vitesse du vent a été mesurée à intervalle de 5 minutes par des anémomètres à fil chaud Testo 405i.

Pour produire des thermographies de la scène, le dispositif décrit dans la section 4 a été placé à une hauteur de 1,50 m au-dessus de l'axe de la rue, à son extrémité ouest (Figure 64).



Figure 64. Mise en place de la caméra thermique dans le canyon urbain, 20 Février 2019

À partir de cet endroit, 2 thermographies ont été prises toutes les 30 minutes. Cette méthode permet d'orienter l'appareil photo de manière constante et précise pour chaque prise de vue. La première prise de vue se fait avec un angle d'élévation de $\pi/6$ (par rapport à l'horizon) et la seconde avec un angle d'élévation de $\pi/2$ (en regardant le zénith), les deux prises de vue gardent le même angle azimutal, dans ce cas aligné avec l'axe de la rue.

La caméra utilisée est une FLIR T460 avec un objectif grand angle ($73^\circ \times 90^\circ$). Cette caméra thermique a une résolution de 240×320 pixels, une précision de ± 1 K et une sensibilité thermique de 0,03 K.

La position de chacun des douze points de mesure peut être vue dans les figures ci-après. La première est une vue en plan de la rue des Tonneliers (Figure 65). Les appareils de mesure ont été placés des deux côtés de la rue. Puisque la façade orientée vers le sud présente des variations plus importantes en raison de la trajectoire du soleil, elle a été mesurée en six points. La façade nord, qui est toujours à l'ombre, n'a été analysée qu'en deux points.

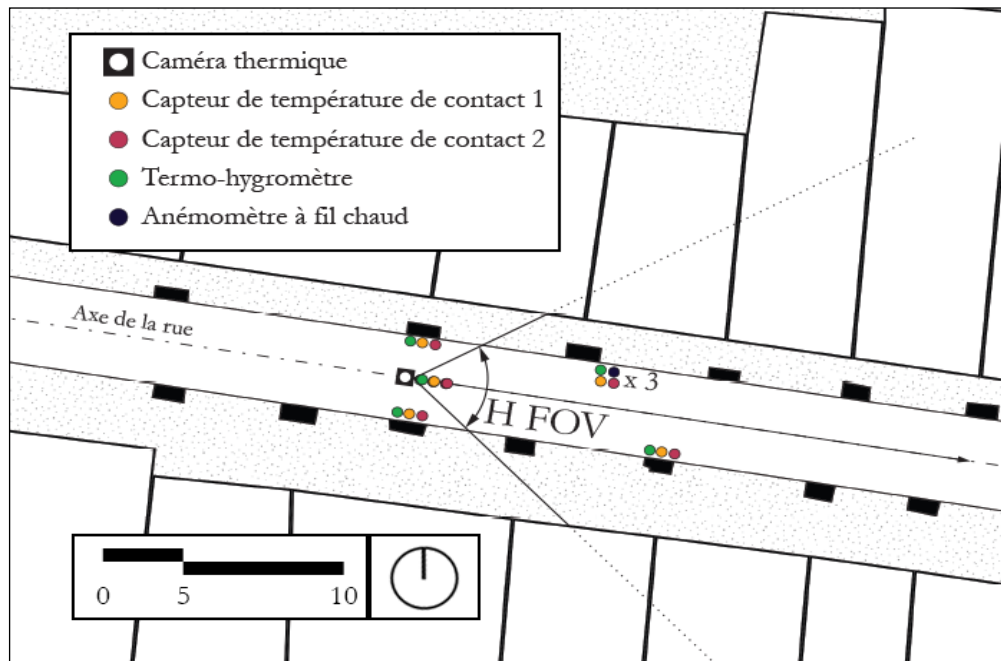


Figure 65. Plan de la rue des Tonnelliers montrant la position de chaque point de mesure sur la scène.

Tous ces points sont visibles depuis la position de la caméra thermique et tant la distance, que l'angle d'incidence, sont différents pour chacun d'entre eux. L'objectif grand angle de la caméra a un champ de vision horizontale (H FOV) de 73° , ce qui lui permet de couvrir les surfaces dans la zone proche de la caméra dans le canyon urbain. Cela facilite la comparaison avec la méthode du contact, grâce à l'identification facile du pixel qui représente chaque capteur.

De plus, 3 paires de points ont été placées hors de la vue en perspective. Chacun de ces paires de points peut être vu de façon quasiment frontale en tournant simplement la caméra. Ces points suivent les recommandations standards pour une évaluation de la température de surface. Ils sont placés sur la façade sud (2), la façade nord (2) et le sol (2).

Les deux figures suivantes représentent les façades de la rue des Tonnelliers et la position de chaque appareil de mesure. Sur la façade nord (Figure 66), les capteurs de température ont été placés à une hauteur de 12,2 m au quatrième étage .

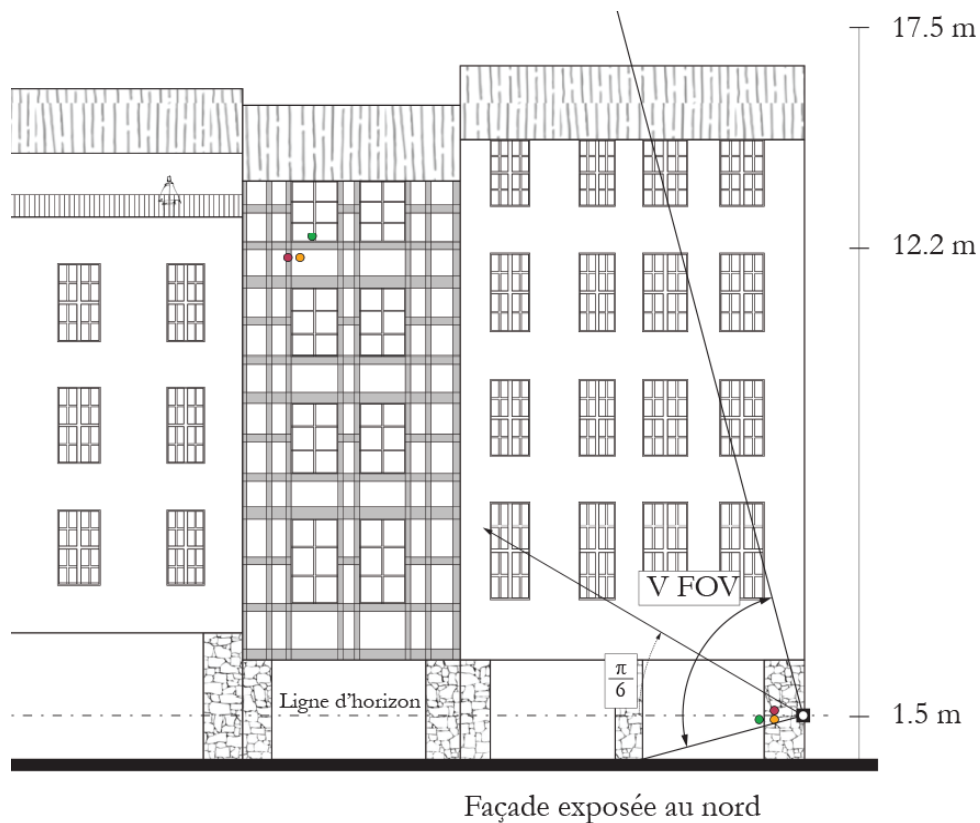


Figure 66. Façade nord de la rue des Tonneliers (hauteur moyenne 17,5 m).

Sur la façade sud (Figure 67), en plus des sondes de température de contact, trois anémomètres et thermo-hygromètres ont été placés à différents niveaux. Cela permet de mesurer la variation de la température, de la vitesse et de l'humidité relative de l'air dans le canyon urbain.

Les différents appareils de mesure ont été placés à trois hauteurs différentes du canyon au-dessus du niveau de la rue.

- Au rez-de-chaussée, à 1,5 m.
- Au deuxième étage, à 7,2 m.
- Au troisième étage, à 9,6 m.

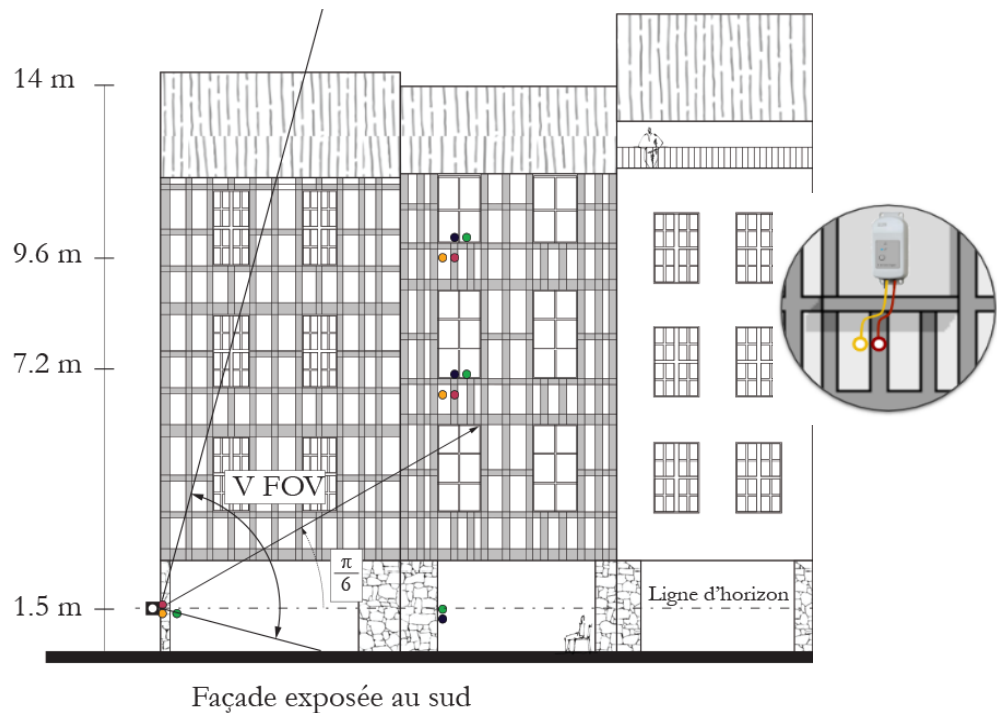


Figure 67. Façade sud de la rue des Tonneliers. (hauteur moyenne 14 m).

Au-delà des dispositifs placés sur les façades, deux des appartements orientés au sud ont été équipés d'un thermo-hygromètre pour mesurer la température et l'humidité relative de l'air intérieur en même temps que les mesures extérieures. La position de ces appareils est indiqué sur la coupe du bâtiment 3 de la rue des Tonneliers (Figure 68). À l'extérieur, le premier capteur du thermomètre à contact a été placé sur le revêtement du mur et le deuxième sur le pan en bois, tous deux placés de manière à éviter les ombres ou d'autres éléments particuliers qui pourraient fausser la mesure.

La vitesse du vent a été mesurée à 0,45 m de la façade dans la direction parallèle au canyon. À l'intérieur, un emplacement représentatif de la pièce a été choisi pour mesurer la température et l'humidité relative de l'air.

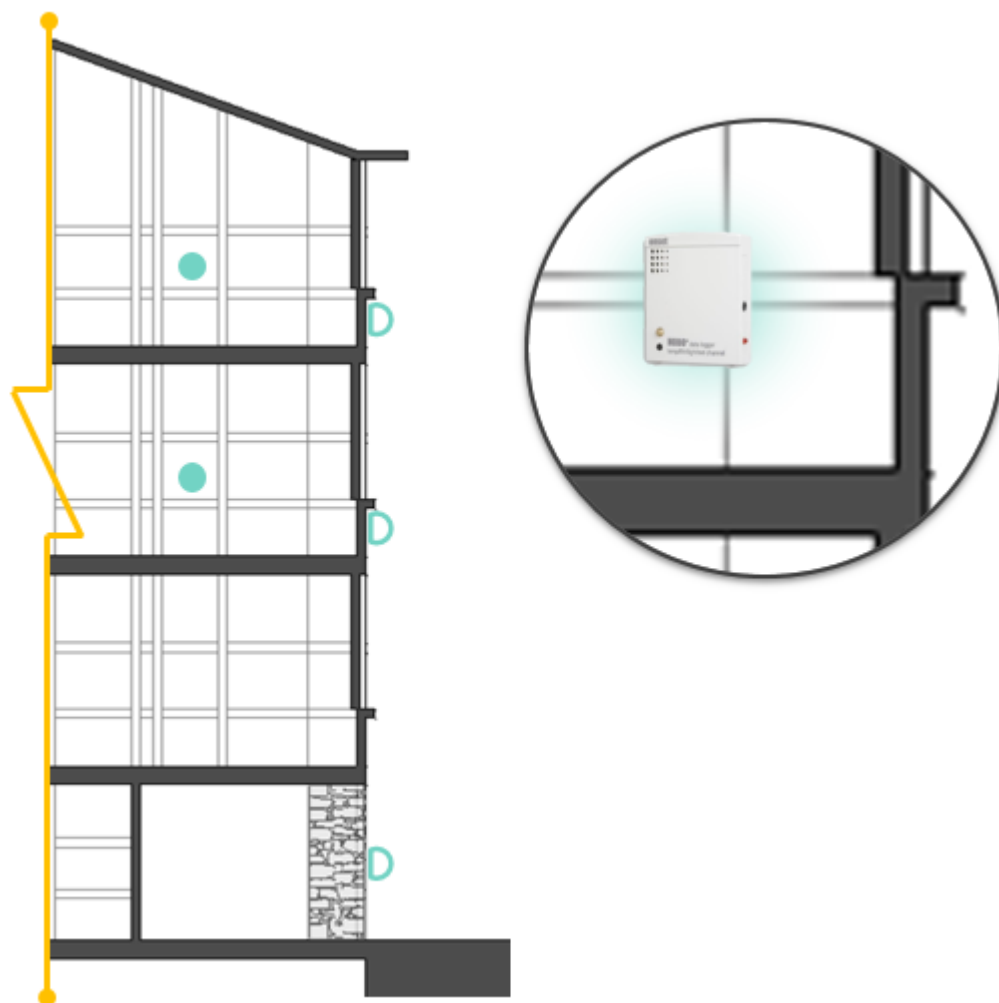


Figure 68. Emplacement des appareils de mesure à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment 3 de la Rue des Tonnelliers

4.5. Résultats préliminaires

La campagne de mesure sur 24 heures a débuté le 19 février 2019 à 22 heures. Tout au long de la campagne, la vitesse du vent a été faible. En moyenne, elle était de $0,45 \text{ m s}^{-1}$ et sa vitesse maximale a atteint $1,25 \text{ m s}^{-1}$. Dans ces conditions, l'influence du vent sur les sondes de température est limitée.

La Figure 69 montre l'évolution de la température et de l'humidité relative de l'air pendant la journée de la mesure, à trois hauteurs différentes. L'humidité relative varie peu par rapport à la hauteur du canyon. Par contre, elle diminue d'environ 20 % entre la nuit et le jour en raison de la variation de la température de l'air. Celle-ci est plus élevée le jour et plus faible la nuit. Cependant, la température de l'air varie également en fonction de la hauteur du canyon. Elle a atteint son minimum à 8h30 (une demi-heure après le lever du soleil). Pendant la nuit et jusqu'à ce moment, l'énergie rayonnée de la scène vers le ciel, en ondes longues, est supérieure à l'apport solaire, ce qui provoque le refroidissement des surfaces et de l'air.

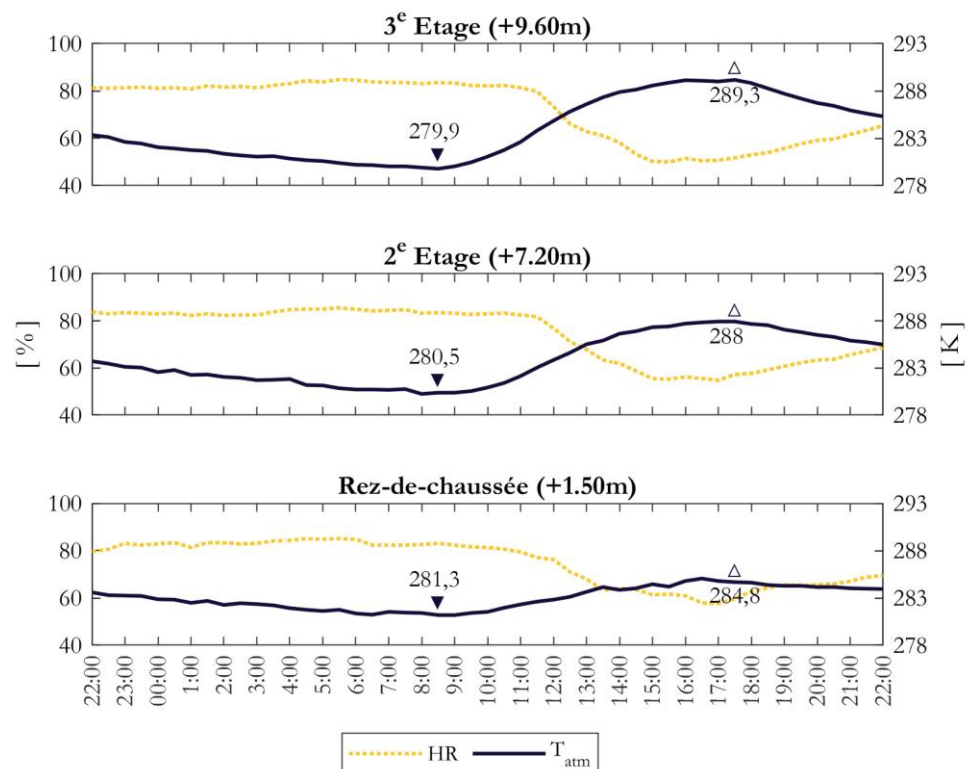


Figure 69. Température de l'air et humidité relative à trois altitudes différentes

Lorsque la température de l'air a atteint son point le plus bas, la différence entre le rez-de-chaussée et le troisième étage était de 1,4 K, l'air étant plus froid au sommet du canyon. Inversement, lorsque la température de l'air a atteint son point le plus élevé à 17h30, la différence était de 4,5 K, l'air étant plus chaud au sommet.

Il existe une relation étroite entre la température de l'air et la température de surface. Comme la température à + 9,60 m au troisième étage présente la variation la plus importante au cours de la journée, l'étude est désormais illustrée sur la base des mesures effectuées à ce niveau.

Modèle du Corps Noir

L'une des approches les plus courantes pour estimer la température de surface par thermographie consiste à utiliser la température équivalente du corps noir, également connue sous le nom de température apparente, température de brillance ou température effective. Il s'agit de la température calculée directement à partir du rayonnement de la scène et qui est égale à la température d'un corps noir émettant la même quantité d'énergie. Pour la mesurer, il faut configurer la caméra en choisissant une émissivité unitaire et une distance de 0 m. Le résultat est la température calculée directement par la loi de Stefan-Boltzmann.

Cette approche est un excellent moyen d'obtenir rapidement des résultats qualitatifs et permet d'étudier la température apparente d'une scène où la caractérisation de ses surfaces est difficile. Bien que ces résultats quantitatifs comportent un biais, certains chercheurs considèrent que celui-ci est limité en raison de l'émissivité généralement élevée des matériaux que l'on trouve couramment dans une scène urbaine [Artis 1982].

La Figure 70 est la première capture de la série. Avec une échelle de couleur choisie pour apprécier en détail les températures du bâti (entre 275 K et 285 K), on remarque que la température prédominante est d'environ 283 K alors que la température du ciel est en-dessous de la limite inférieure de l'échelle. Il convient donc d'utiliser une deuxième échelle pour la représenter.

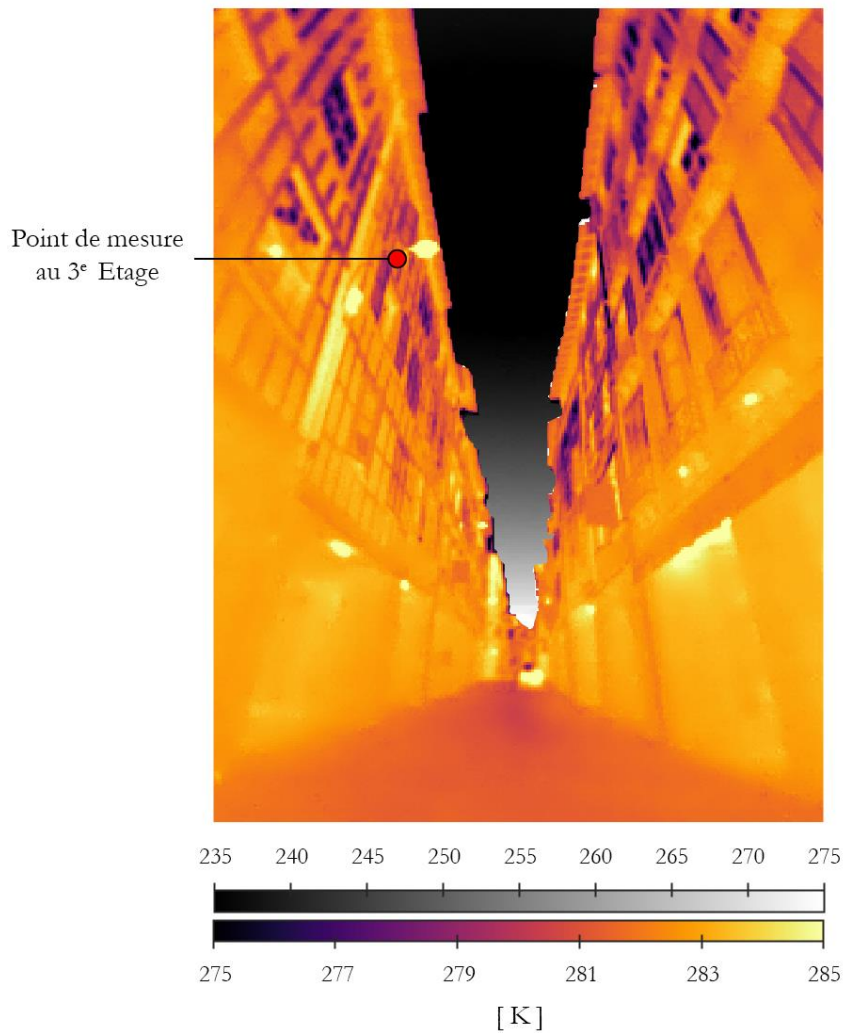


Figure 70. Température équivalente du corps noir mesurée le 19 février 2019 à 22h00.

La température apparente de surface de la partie inférieure des façades, comme la température de l'air, est plus élevée que celle de la partie supérieure, du fait du facteur de vue du ciel.

Le point rouge dans la Figure 70 indique le point de mesure du troisième étage. En comparant, en fonction du temps, la température de l'air T_{atm} avec la température de surface mesurée par contact T_s et par thermographie T_{IR} (Figure 71), on peut voir que les trois suivent la même tendance. T_s et T_{atm} sont très proches, tandis que T_{IR} présente un écart moyen de 2,3 K en dessous de T_s .

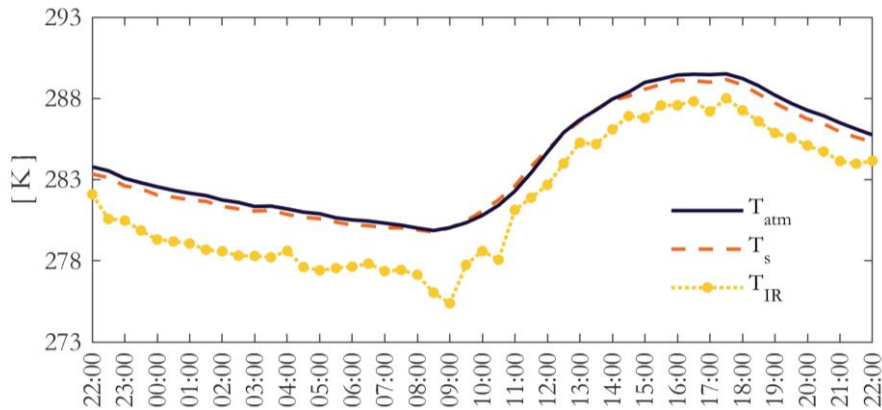


Figure 71. Comparaison de la température de l'air T_{atm} , de la température de contact T_s (référence) et de la température équivalente du corps noir T_{IR} à +9,60 m pendant 24 heures (les 19 et 20 février 2019).

Dans ce type d'étude, les informations spatiales offertes par une méthode d'imagerie telle que la thermographie, viennent compenser la déviation de la mesure en permettant de visualiser des motifs de distribution.

Cette méthode conçue sous le slogan « *une caméra, un technicien et un jour* » [García Nevado 2019a], fournit une grande quantité d'informations qui permet d'alimenter une simulation thermique par éléments finis sur un modèle simplifié de la scène [Aguerre 2019]. Cependant, pour bien calibrer une simulation, des informations quantitatives sont nécessaires, ce qui est impossible à obtenir avec cette approche.

Modèle du Corps Gris

Pour obtenir des résultats quantitatifs, l'approche préconisée dans la littérature consiste à supposer que l'émissivité de la scène est différente de 1, et constante quel que soit l'angle d'incidence avec lequel la surface est observée. Autrement dit, on considère un corps gris parfaitement diffus. Cette émissivité hémisphérique totale, qui est présente dans de nombreux tableaux et manuels commerciaux, détermine la proportion de radiation émise par rapport à un corps noir à la même température. Sa validité a été discutée [McIntosh 2018] mais elle reste l'approche la plus utilisée pour déterminer la température de surface.

Selon la loi de Kirchhoff, $\varepsilon < 1$ implique que la fraction restante de l'énergie $(1 - \varepsilon)$ doit être transmise ou réfléchi. Pour les éléments de la scène qui sont, dans leur

quasi-totalité, opaques à l'infrarouge, la fraction d'énergie restante correspond au flux réfléchi de l'environnement. L'une des exceptions est l'atmosphère, qui a un coefficient de transmission élevé pour les rayonnements à ondes longues. Bien qu'elle soit généralement considérée comme parfaitement transparente, en raison de l'influence relativement faible sur les mesures effectuées à courte distance, elle ne l'est pas.

L'atténuation atmosphérique dépend de la distance entre la surface étudiée et la caméra du fait de sa concentration en vapeur d'eau, laquelle est déterminée simplement par la température et l'humidité relative de l'air. Puisque la caméra n'admet qu'une seule valeur d'entrée pour chacun de ces champs, deux questions se posent : quelle est la température réfléchie ? et quelle est la distance à considérer dans une scène en perspective ?

L'une des hypothèses les plus couramment utilisées pour estimer la température réfléchie est de la remplacer par la température de l'air. Cette hypothèse est basée sur le fait que la température de l'air est généralement proche de la température de surface.

En ce qui concerne la distance, la longueur totale de la rue peut être utilisée. La transmittance atmosphérique dans les conditions climatiques de la campagne de mesure est de plus de 90 % à une distance de 250 m. Pourtant elle impacte peu la correction.

Pour corriger l'interférence du flux réfléchi et du flux émis par l'atmosphère, on suppose, pour chaque pas de temps, dans le cas d'un corps gris : une température réfléchie égale à la température de l'air mesurée depuis la position de la caméra, une distance de 140 m et une émissivité hémisphérique totale de 0,92.

La Figure 72 montre la différence absolue de température entre T_s et les deux approches pour le T_{IR} , en tant que corps noir et corps gris. Le temps est représenté sur l'axe des abscisses et la différence de température relative à la méthode de contact sur l'axe des ordonnées (le 0 représentant une parfaite concordance avec celle-ci).

Contrairement à ce qui pourrait être espéré la méthode du corps gris augmente l'écart avec la valeur de référence. Les deux écarts suivent la même tendance au cours du temps, mais, alors que la mesure en prenant l'hypothèse d'un corps noir surpasse la valeur de référence de 2,24 K en moyenne, en supposant un corps gris, l'écart augmente de 0,42 K en moyenne, pour atteindre 2,66 K.

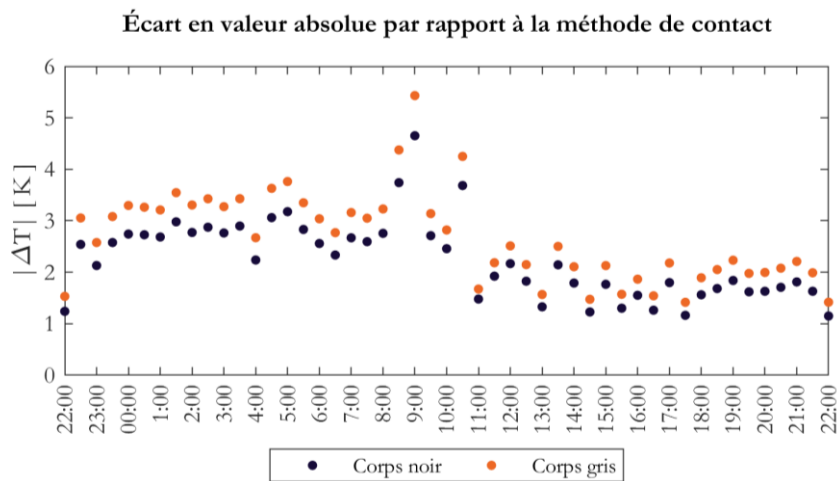


Figure 72. Valeur absolue de l'écart entre l'approche du corps noir et celle du corps gris par rapport à la température de contact.

Ainsi, les hypothèses faites dans le cas d'un corps gris entraînent une augmentation moyenne de la déviation d'environ 0,5 K. Cette déviation vient de la correction de tous les pixels de la thermographie en utilisant la même valeur. Si, ces simplifications peuvent fonctionner dans des environnements uniformes où la surface est étudiée à partir d'angles d'incidence très faibles, dans une scène urbaine en perspective, de par sa complexité, cela est rarement possible. Pour pouvoir corriger il faut être plus précis et traiter chaque pixel de manière indépendante puisque chaque point de la scène est soumis à des conditions différentes.

4.6. Correction des températures mesurées par thermographie

Géométrie de la scène

Toutes les nouvelles corrections dépendent alors de la géométrie de la scène. Par conséquent, la première étape consiste à construire un modèle tridimensionnel simplifié de la scène. En principe, un canyon urbain peut être défini par trois plans, dont deux représentant les façades et le dernier le sol. Dans cette étude, le canyon est considéré comme fini et un plan supplémentaire limite sa profondeur à 140 m. De plus, puisque les avant-toits limitent le facteur de vue du ciel sur le haut des façades, ils influencent sur les températures de la scène. Ainsi, les avant-toits sont représentés comme des surfaces de 0,70 m, perpendiculaires à la façade. Les dimensions moyennes de la rue sont de 6,5 m pour la largeur, 14 m de hauteur pour la façade sud, 17,5 m pour la façade nord et 10 m pour la façade au fond.

Pour assurer la cohérence des graphiques et faciliter l'orientation dans la scène, les coordonnées du modèle sont relatives à la position de la caméra sur le plan XY. En trois dimensions, la caméra se trouve dans les coordonnées $[0 \ 0 \ 1,5]$ et est orientée vers $+Y$.

Grâce à ce modèle, on peut déterminer facilement la distance entre un point et la caméra en recherchant simplement l'intersection entre le vecteur incident et l'un des plans. De même, une fois que le plan d'intersection a été déterminé, on peut trouver la direction de sa réflexion. La Figure 73 montre que le point de mesure du troisième étage se trouve à une distance de 12,6 m et que sa réflexion, avec un angle d'élévation de 0,27 radians, passe par-dessus la façade nord. La température apparente du ciel correspondant à cet angle d'élévation est de 232,8 K.

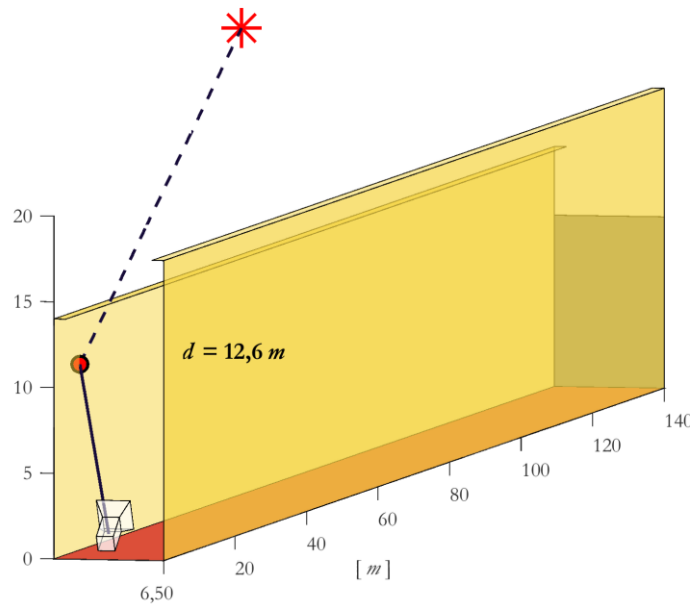


Figure 73. Modèle tridimensionnel simplifié. Calcul de la distance et de la direction du rayon réfléchi.

La température et l'humidité relative de l'air sont le résultat de mesures supplémentaires simples et aident à déterminer la transmittance de l'atmosphère.

Le calcul de la transmission de l'atmosphère est divisé en deux parties. Dans la première partie, l'humidité relative, la température de l'air et les coefficients h_1 , h_2 , h_3 et h_4 déterminés expérimentalement par [Minkina 2015] servent à déterminer le contenu de vapeur d'eau dans l'atmosphère en utilisant l'équation 59.

$$\omega = \omega_{\%} e^{(h_1 T_{atm}^3 + h_2 T_{atm}^2 + h_3 T_{atm} + h_4)} \quad (59)$$

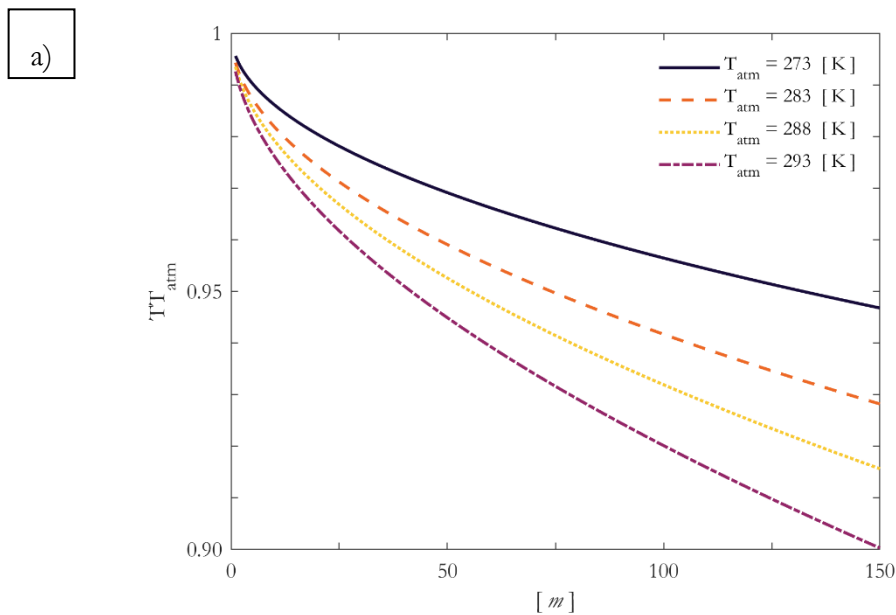
Dans la deuxième partie (équation 60), pour la caméra utilisée dans cette étude, le modèle LOWTRAN calcule la transmittance de l'atmosphère en fonction de trois paramètres : le contenu de vapeur d'eau ω , la température de l'air T_{atm} et la distance d .

$$\tau_{atm} = K_{atm} e^{[-\sqrt{d}(\alpha_1 + \beta_1 \sqrt{\omega})]} + (1 - K_{atm}) e^{[-\sqrt{d}(\alpha_2 + \beta_2 \sqrt{\omega})]} \quad (60)$$

Le facteur d'atténuation atmosphérique K_{atm} , les coefficients d'atténuation atmosphérique sans vapeur d'eau α_1 , α_2 , et les coefficients d'atténuation

atmosphérique avec vapeur d'eau β_1 , β_2 sont des valeurs d'étalonnage préprogrammées dans la caméra, obtenues à partir de la thermographie.

Les images a) et b) de la Figure 74 permettent d'observer l'influence de ces paramètres en fonction de la distance. La Figure 74a montre l'influence de la température de l'air sur la transmittance de l'atmosphère avec le paramètre de l'humidité relative fixé à 80 %. La Figure 74b montre quant à elle l'influence de l'humidité relative alors que la température de l'air reste fixée à 283 K. Sur les deux graphiques, on peut voir que, dans ces conditions, la transmittance de l'atmosphère est supérieure à 90 % pour les distances inférieures à 150 m. Il est également possible d'observer que pour une seule et même humidité relative, la variation de la température de l'air entraîne des changements plus importants de l'atténuation atmosphérique si on les compare à la variation de l'humidité relative pour une seule et même température de l'air. Cela montre que si une seule mesure de l'humidité relative peut suffire pour évaluer un canyon urbain, plusieurs points de mesure sont nécessaires pour évaluer la température de l'air dans une même scène.



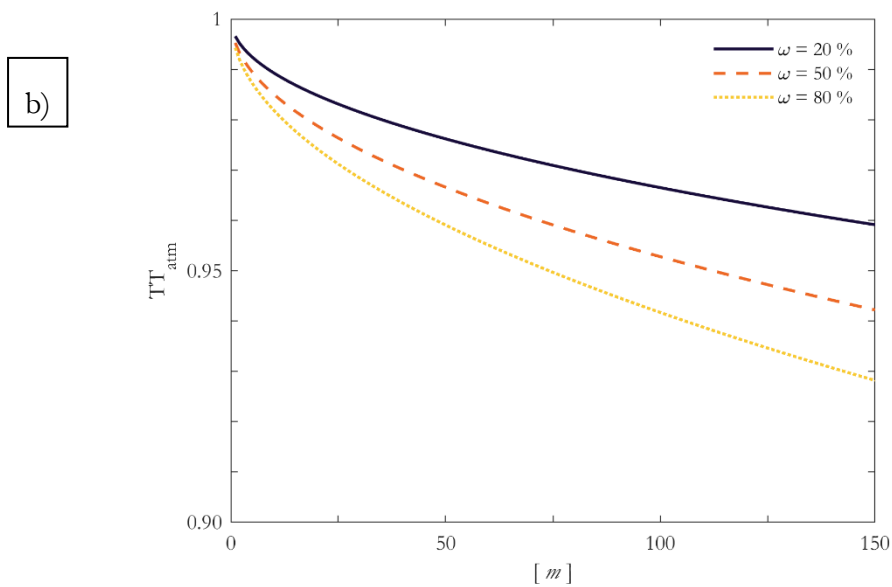


Figure 74. Transmittance atmosphérique τ_{atm} en fonction de
 (a) la température de l'atmosphère T_{atm} , $\omega = 80\%$
 (b) l'humidité relative de l'atmosphère ω , $T_{atm} = 283$ K.

Il reste à évaluer l'émissivité. L'une des procédures proposées dans la littérature consiste à comparer une mesure par contact et une mesure radiométrique et à ajuster progressivement l'émissivité de la thermographie jusqu'à obtenir la même température mesurée par contact. En suivant cette procédure on obtient une émissivité de 0,97 pour le point étudié.

Chacune des variables décrites ci-dessus est résumée dans la Figure 75 synthétisant les informations nécessaires pour corriger la thermographie au point étudié (point de mesure du troisième étage, façade sud)

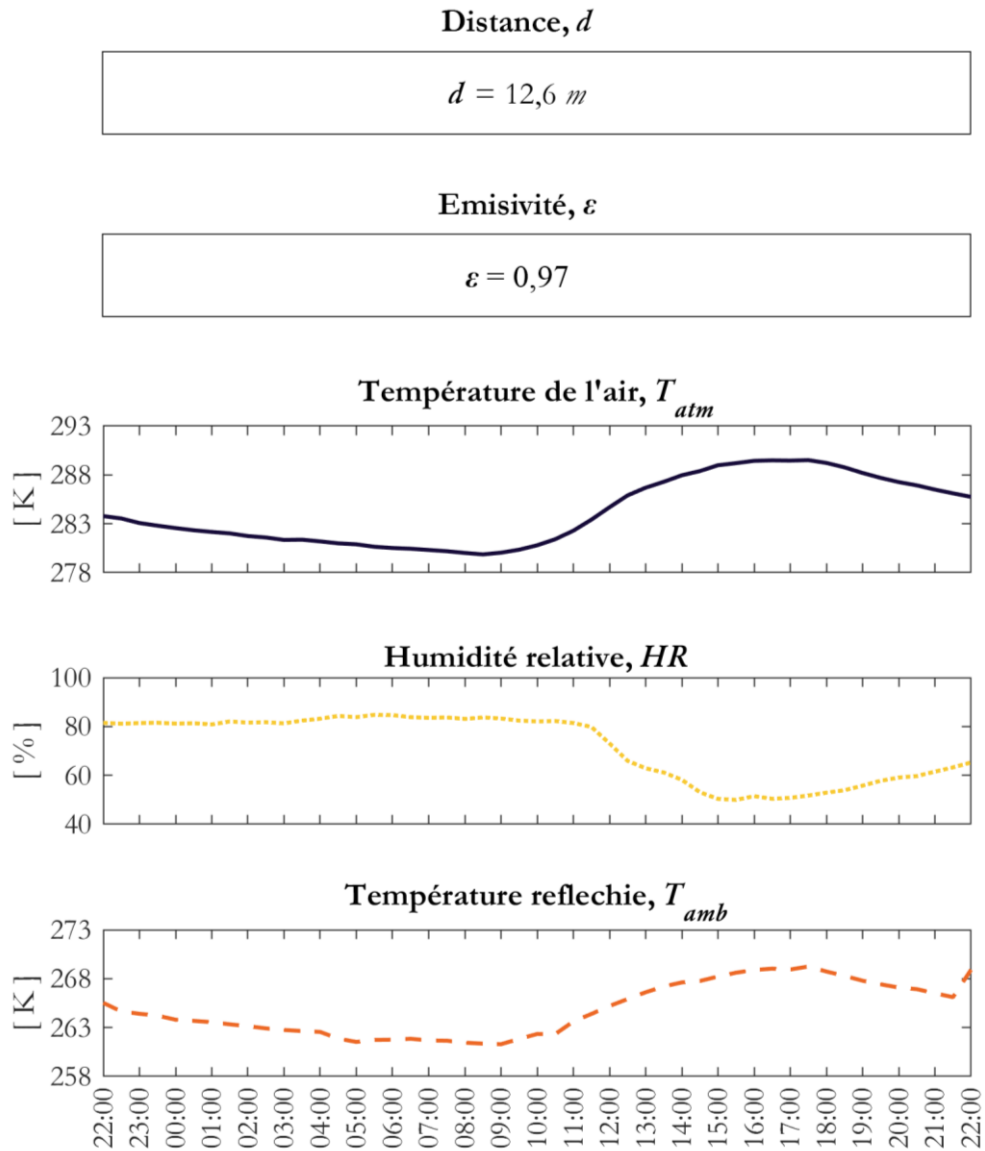


Figure 75. Résumé des conditions utilisées pour la correction de toutes les images de la séquence au point étudié

La Figure 76 montre les trois approches pour étudier la température de surface à partir des thermographies. Contrairement aux approches "corps noir" et "corps gris", dont la moyenne est supérieure de plus de 2 K à la valeur de référence, la correction proposée réduit cet écart à seulement 0,4 K et tous les points de mesure sont proches de la moyenne. L'écart maximum est de 1,17 K.

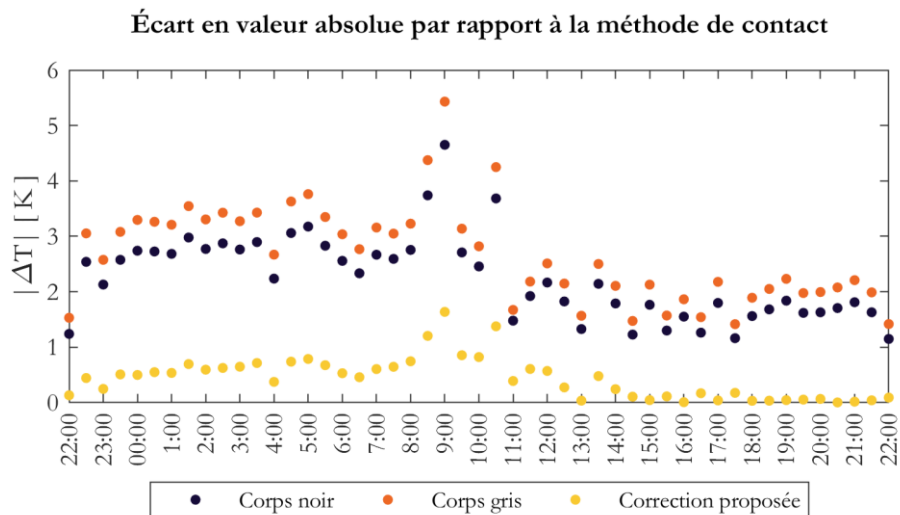


Figure 76. Valeur absolue de l'écart entre l'approche du corps noir, du corps gris et les corrections proposées par rapport à la température de contact.

Ainsi, les résultats obtenus par la correction proposée s'avèrent favorables. Elle réduit l'écart de la température de surface mesurée avec une caméra thermique en la plaçant dans la plage d'erreur de la méthode de référence. Alors cette correction est appliquée à 10 des 12 points où la température a été mesurée par les deux méthodes. Les deux points placés en haut de la façade nord n'ont pas été utilisés en raison de l'incertitude causée par la résolution spatiale de la caméra. À une telle distance et avec un grand angle d'incidence, la surface couverte par un pixel de la caméra est plus grande que la surface mesurée par contact, il semble donc inapproprié de les utiliser à des fins de comparaison.

Cependant, la différence de température moyenne des 10 points corrigés est de 0,5 K, ce qui invite à généraliser l'application de cette correction à tous les points de l'image en perspective.

Cela permet de tirer parti de la caractéristique spatiale de la thermographie, permettant de mesurer, avec précision, la température de surface en de multiples points de la scène. Puisque ce type de mesure est lié à la géométrie de l'environnement, son résultat visuel facilite son analyse.

4.7. Application à la thermographie en perspective

Le même principe de correction peut être appliqué à toute la thermographie. Une thermographie est une matrice de valeurs de température et sa taille dépend des dimensions du capteur.

Chaque valeur est mesurée par un pixel correspondant à une direction. Ainsi, en partant de l'image, on peut identifier les zones correspondant à chacun des plans du modèle 3D et en utilisant le vecteur de direction qui passe par le centre de chacun des pixels, on trouve leur point d'intersection. De cette façon, on peut projeter tous les pixels de l'image sur le modèle géométrique.

Les Figures 77 et 78 sont des exemples de ce processus. La première représente les points de la scène (qui ont été mesurés) observés à partir de la position de la caméra, c'est-à-dire à la distance 0. En avançant de 100 m le long de l'axe du canyon, on arrive à la position de la deuxième image. Sur celle-ci, on peut voir que la densité des points de mesure est beaucoup plus faible.

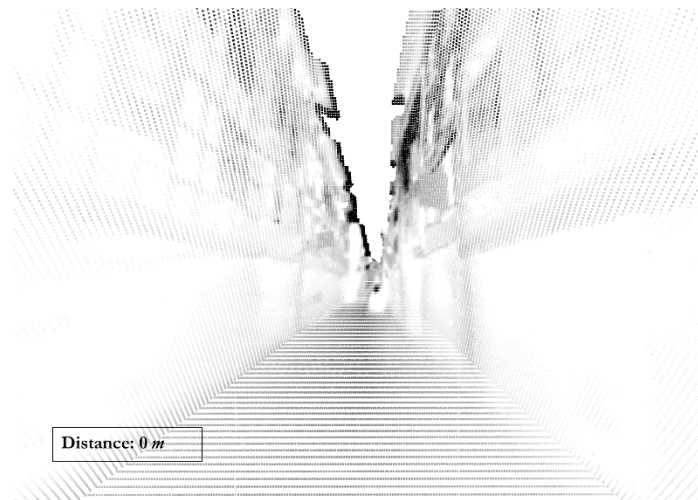


Figure 77. Nuage de points reconstitué à partir d'une image prise dans la Rue Tonneliers vue depuis la position de la caméra

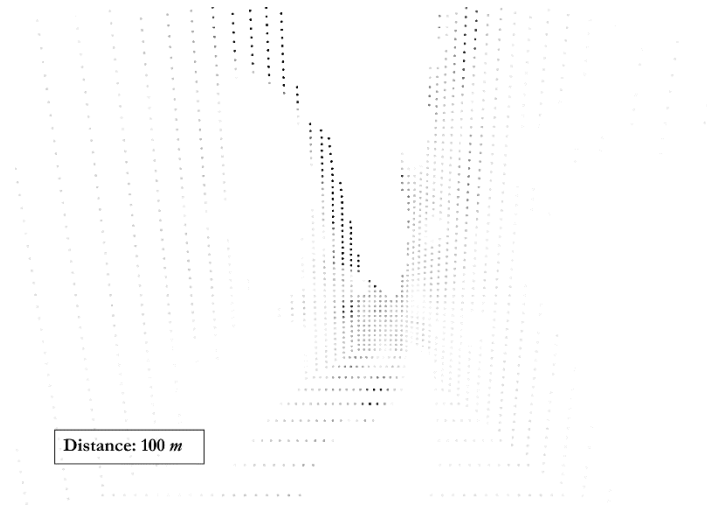


Figure 78. Nuage de points reconstitué à partir d'une image prise dans la Rue Tonneliers vue à 100m de la position de la caméra

Les deux images montrent chaque point mesuré par le capteur de la caméra thermique dans une seule prise de vue, ce qui permet de mieux comprendre le concept de résolution spatiale ou IFOV. Celui-ci indique l'angle solide auquel un élément du capteur du plan focal mesure le rayonnement provenant de l'objet et donc affecte la qualité de l'image. La relation entre l'IFOV et la distance nous permet de connaître la taille minimale d'un objet pour qu'il puisse occuper un pixel. En d'autres termes, il s'agit du niveau maximal de détail observable à une distance donnée. Ici, on peut voir comment tous les éléments situés à proximité de la caméra ont été échantillonnés plusieurs fois dans une petite zone (Figure 77). Au fur et à mesure que la distance augmente, les points de mesure sont répartis sur une plus grande surface (Figure 78). Par conséquent, à une distance plus éloignée de la caméra, la valeur de la température par pixel correspond à la moyenne sur une plus grande surface. Cela ne limite pas l'étude en perspective puisque cela dépend strictement du matériel utilisé ; de la caméra et de son objectif.

Pour corriger la thermographie, il est nécessaire de traiter chaque pixel individuellement. Les modifications qu'elles produisent peuvent être étudiées grâce à une analyse graphique.

Filtres

La correction des images peut se faire par l'utilisation de filtres. Ce sont des matrices de mêmes dimensions que la thermographie originale, où chaque pixel contient des informations nécessaires à sa correction.

Cependant, avant l'application des filtres il est nécessaire de corriger les effets liés au réglage de la caméra. Celle-ci étant calibrée en fonction d'un corps noir, elle sous-estime l'émission atmosphérique [Kruczek 2015]. Puisque, l'émission atmosphérique est une composante du flux reçu par chaque capteur de la caméra et que celui-ci est indépendant de la géométrie de la scène cette correction s'applique à toute l'image. Celle-ci dépend fortement de la température de l'air. Par conséquent, pour l'appliquer à chaque pixel, une température de l'air est associée à chacun d'eux.

La Figure 79 montre la répartition de la température de l'air sur le modèle à un instant donné. Les températures de l'air présentées dans cette figure, pour trois hauteurs différentes, sont considérées comme égales le long du canyon, invariables sur le plan XY. On considère que la variation de la température de l'air à l'intérieur du canyon sur l'axe Z est linéaire.

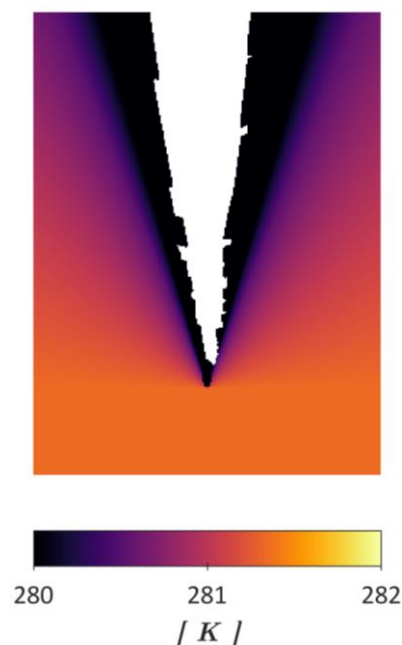


Figure 79. Température de l'air correspondant à chaque pixel de l'image pour le 19 février 2019 à 22h00

Comme décrit auparavant, cette correction affecte principalement le ciel mais aussi les surfaces qui le réfléchissent, générant une augmentation de la température mesurée par une caméra thermique.

En effet, un phénomène similaire peut être observé dans le spectre visible et sert à illustrer l'idée. La Figure 80 est une photographie de la scène alignée avec l'axe de la rue et avec un angle d'élévation de $\pi/2$ radians. Dans celle-ci on observe le reflet du ciel principalement sur les vitrages, mais aussi sur certains volets et sur la structure de bois de la façade. En conséquence, cette correction affecte également tous les éléments de la scène où la réflexion infrarouge du ciel est importante.



Figure 80. Photographie de la scène pointant vers le zénith. Le reflet du ciel est visible sur les fenêtres mais aussi sur certains éléments en bois de la scène.

La Figure 81 regroupe trois images. Ayant traité individuellement la correction de la température du ciel dans une section précédente, cette section se concentre sur l'effet de celle-ci sur les bâtiments. Pour ce faire et afin de gagner en précision, la température du ciel se trouve au-delà de l'échelle des températures du bâti.

La première image est la thermographie originale. Dans celle-ci, on suppose que la scène entière a une émissivité égale à 1 et que la distance entre la caméra et l'objet d'étude est nulle. Par conséquent, les températures représentées sur cette image ont un caractère apparent. La deuxième image montre la thermographie corrigée par rapport à la fenêtre atmosphérique. Les deux images sont exprimées avec la même échelle et celle-ci a été ajustée de manière à ce que le plus grand nombre possible de détails de la façade soient visibles.

En comparant visuellement les deux images, on s'aperçoit qu'après avoir appliqué la correction, les détails de la partie supérieure du canyon sont mieux définis. La troisième image de cette figure représente la différence entre l'image corrigée et l'image originale. Celle-ci permet une évaluation quantitative de la modification introduite par la correction qui est représentée par une barre de couleur divergente.

On peut voir que cette correction affecte les vitres et les zones apparemment plus froides de l'image en augmentant leur température entre 2 et 5 K. Dans les points les plus chauds de l'image, qui correspondent aux luminaires et aux appareils électriques, l'effet est inverse. Dans ce cas, cette correction réduit leur température de 3 à 8 K. Dans le reste de l'image, l'influence de cette correction est faible. Elle est souvent comprise entre $\pm 0,4$ K

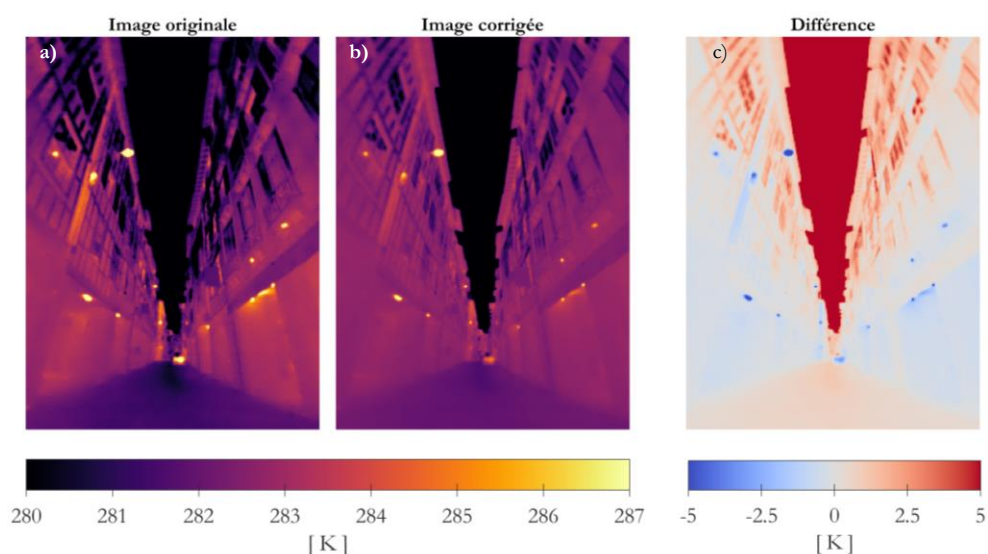


Figure 81. Correction de l'image par rapport à la fenêtre atmosphérique.
a) image originale b) image corrigée c) différence

Toutes les autres corrections s'appliquent ci-dessous. Parmi les cinq variables qui modifient la température mesurée par une caméra thermique, la distance, la température de l'air et l'humidité relative forment, ensemble, un filtre qui correspond à la transmittance de l'atmosphère. L'émissivité et la température réfléchie peuvent être appliquées comme des filtres indépendants.

Transmittance de l'atmosphère

Des trois paramètres (distance, température de l'air et humidité relative) intervenant dans le calcul de la transmission atmosphérique, seule l'humidité relative est considérée constante pour tous les pixels, alors que les deux autres sont évolutives le long du canyon urbain.

Le nuage de points construit à partir de la thermographie et du modèle géométrique permet de générer une matrice qui représente la distance entre la caméra et chacun des points visibles de la scène (Figure 82).



Figure 82. Distance par pixel

La Figure 83 représente la transmittance de l'atmosphère τ_{atm} au moment de la première thermographie de la série. Dans cette scène avec ces conditions climatiques, l'atmosphère est essentiellement transparente.

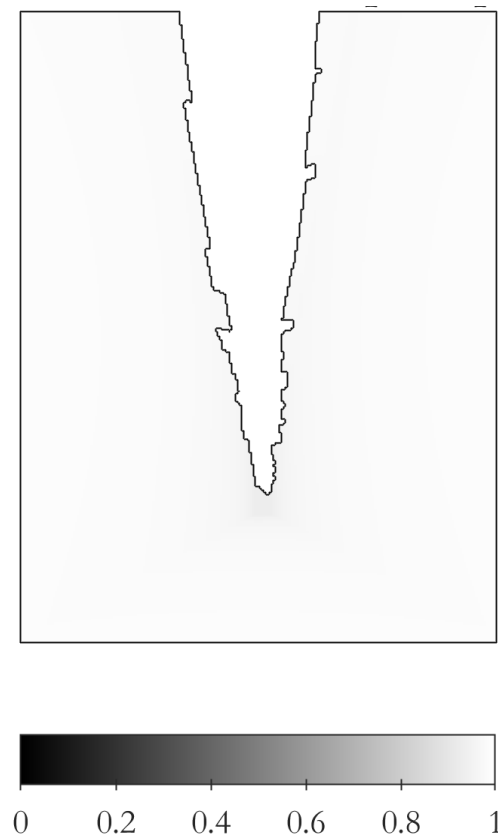


Figure 83. Valeur de transmittance atmosphérique calculée pour chaque pixel de l'image pour le 19 février 2019 à 22h

En appliquant cette correction à l'image originale, son effet est presque imperceptible. L'atténuation atmosphérique à des distances comme celle de ce canyon urbain est très limitée. Les principales différences sont observées aux points hauts des façades, en raison de la différence de température de l'air, et au fond du canyon en raison de la distance.

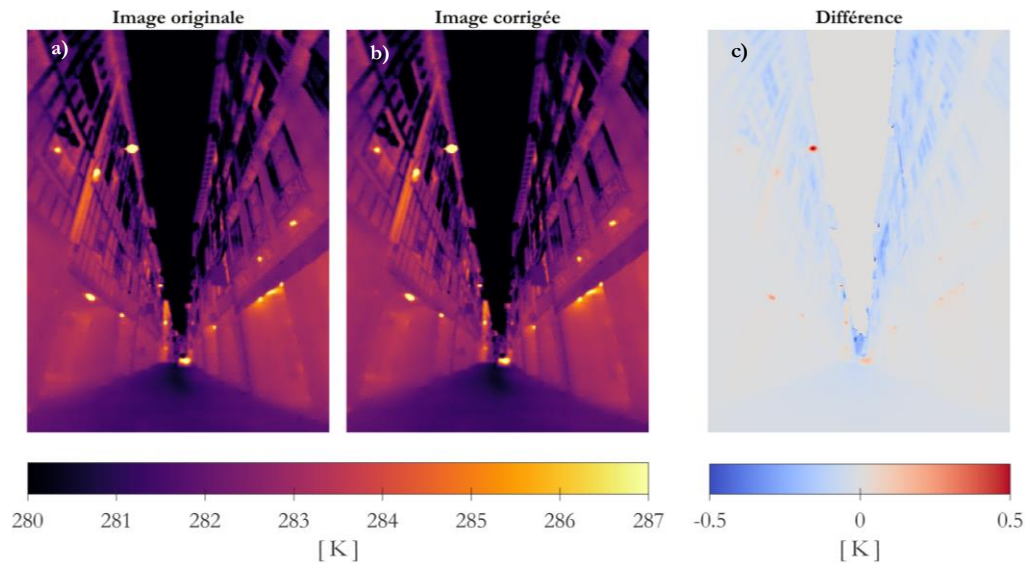


Figure 84. Correction de l'image par rapport à la transmittance atmosphérique.
a) image originale b) image corrigée c) différence

Ce qu'on peut voir ici correspond à la radiation atmosphérique (Figure 84). L'image corrigée est légèrement plus froide que l'image originale, à l'exception des lampes et appareils électriques qui eux sont plus chauds. Ainsi la température corrigée montre de plus grands contrastes. Les surfaces froides seront plus froides et les plus chaudes seront plus chaudes. Ces différences s'expliquent par le fait que l'atmosphère par sa présence atténue le rayonnement des éléments de la scène.

Émissivité

Dans le cadre d'une étude dans un environnement urbain, la complexité de la scène rend la détermination de l'émissivité propre à chaque matériau impossible. L'étude de l'émissivité de plusieurs matériaux de construction traditionnels montre qu'en général, leur émissivité est similaire et très élevée. Toutefois, le verre a une émissivité plus faible.

C'est pourquoi ce filtre a été construit selon deux émissivités. Pour les deux cas une émissivité hémisphérique totale a été considérée. Soit une valeur de 0.82 pour le verre et 0.97 pour tous les autres matériaux présents dans la scène. Ces valeurs sont proches de valeurs proposées par différents manuels et études [McIntosh 2018].

La Figure 85 montre le filtre correspondant à l'émissivité. Il est composé de deux masques définis manuellement. Le premier permet de séparer les bâtiments et le ciel. Le second isole les fenêtres. La présence de volets partiellement fermés et de croisillons rend l'identification des zones de vitrage assez complexe, rendant le second masque peu régulier. Sur la base de ces deux masques, les émissivités sont attribuées aux surfaces de la scène.

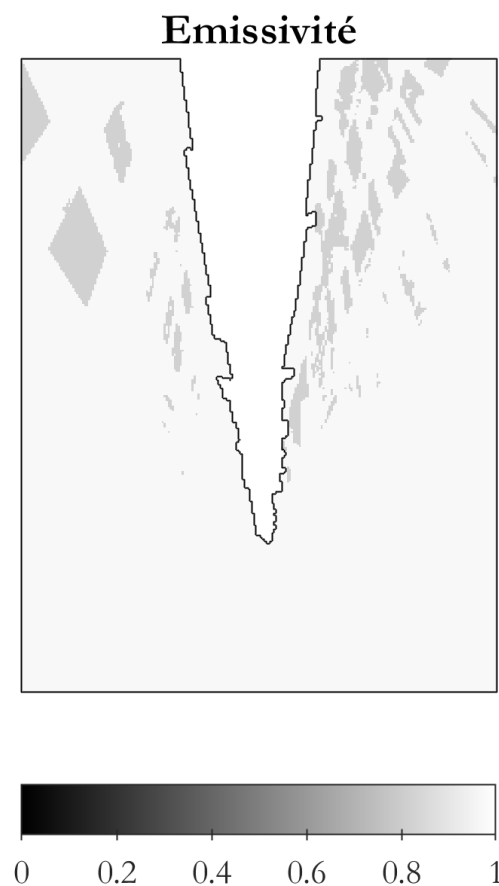


Figure 85. Valeurs d'émissivité pour les matériaux de la scène. Tous les matériaux de la scène sont approximés en utilisant une seule émissivité de 0,97, sauf le verre. Pour le verre, l'émissivité est de 0,82.

Sur la Figure 86, on peut voir que l'effet de ce filtre impacte principalement les fenêtres en les refroidissant d'environ 2 K. En revanche, les autres matériaux de la scène ayant une émissivité très proche de 1, l'effet du filtre est plus faible.

Cependant, la réduction de l'émissivité entraîne des modifications pour les autres paramètres. Par exemple, une émissivité plus basse donne plus d'importance à la température réfléchie.

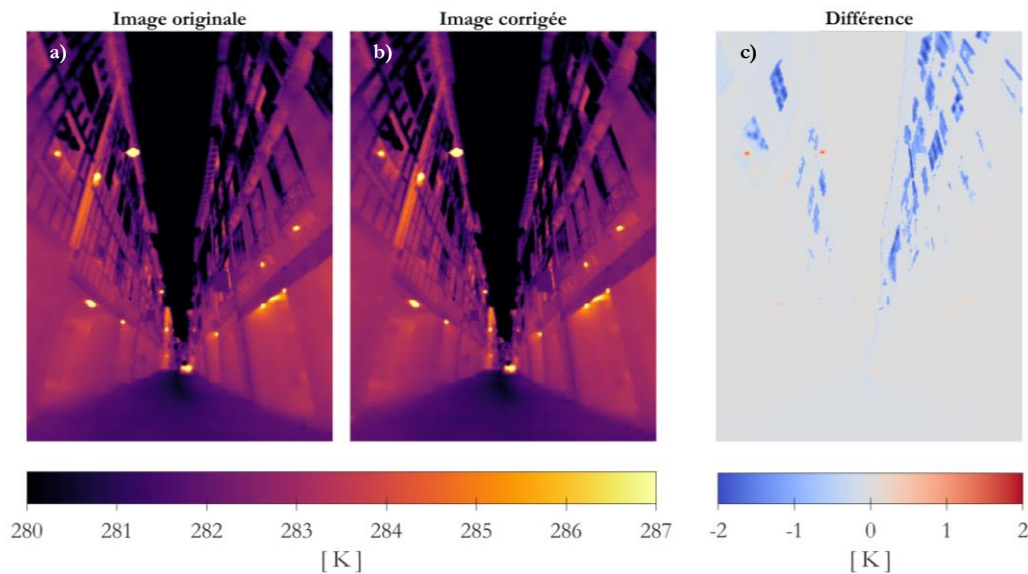


Figure 86. Correction de l'image par rapport à l'émissivité.
a) image originale b) image corrigée c) différence

Température réfléchie

L'étape suivante consiste à corriger le flux réfléchi. Pour estimer la température réfléchie, il est nécessaire de déterminer quel élément est observé par réflexion et sa température correspondante. Le processus se fait simplement à partir de la direction du rayon réfléchi et de l'intersection avec les autres plans de la scène. Ainsi, les images de la Figure 87 montrent chaque zone de l'image et l'endroit où elle est réfléchi selon le calcul effectué sur le modèle géométrique simplifié. Les façades des bâtiments correspondent aux zones 1 et 2, la zone 3 correspond à la rue et la zone 4 au ciel (Figure 87a).

L'image Figure 87b montre un découpage des réflexions en zones. Sur cette image, on peut voir que les parties correspondant aux avant-toits et aux points supérieurs des façades, reflètent les mêmes zones, soit la zone 1 pour la façade Sud et la zone 2 pour la façade Nord. En descendant, à mi-hauteur, les façades reflètent le ciel, c'est-à-dire la zone 4. Sous cette partie, le reflet correspond à la façade opposée, et en pied de façades, la rue. En regardant la rue, le reflet au centre de celle-ci correspond au ciel et aux extrémités à la façade correspondante.

La troisième image de la Figure 87 correspond à la thermographie (Figure 70) exprimée en seulement 8 nuances et comprise dans une plage de deux degrés. Dans

celle-ci, on apprécie un profil similaire à celui présenté dans les autres images. Les différences sont principalement dues à la simplification de la géométrie. La partie du milieu à mi-hauteur des façades et la partie centrale de la rue semble plus froide que le reste des surfaces. Cela est dû au contraste de leur température avec la température réfléchie du ciel.

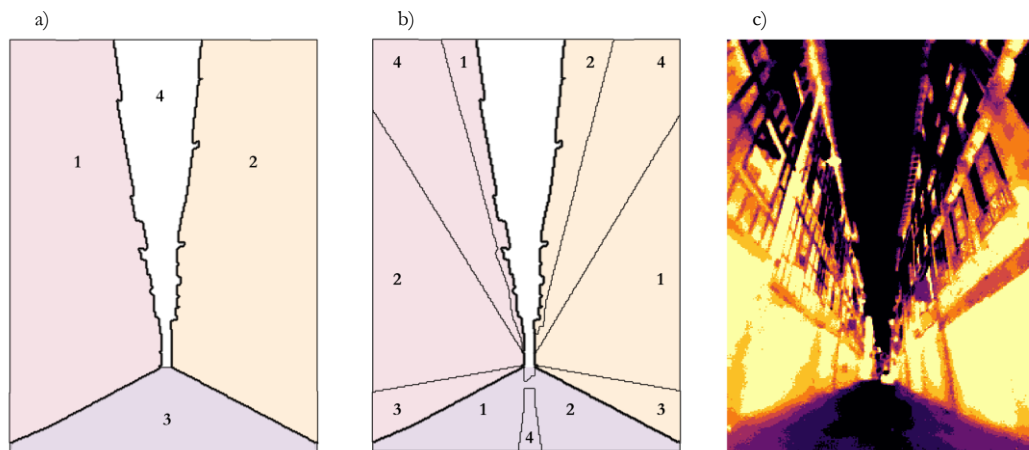


Figure 87. Analyse des réflexions sur la scène.

- a) Segmentation de la scène en quatre plans :
plan 1 (façade sud), plan 2 (façade nord), plan 3 (sol) et plan 4 (ciel).
b) Identification du plan visible par réflexion en utilisant la segmentation précédente.
c) Température apparente, avec une plage ajustée pour voir l'influence des autres éléments sur les surfaces.

À partir de cette carte de réflexion (Figure 87b), il est possible de déterminer la température réfléchie. Lorsque la réflexion est dirigée vers le ciel, son angle d'élévation permet de l'associer à la température du ciel correspondante.

De même, lorsque la réflexion est dirigée vers une façade, la température réfléchie varie en fonction d'un profil de température apparent de la façade. Dans la littérature pour l'utilisation d'une caméra thermique, il est indiqué que la température réfléchie peut être déterminée à partir d'un élément à très faible émissivité, par exemple une feuille d'aluminium. Pour cette étude le profil de température utilisé correspond à la descente d'eau pluviale. Il s'agit d'un tube métallique, droit et lisse de hauteur égale à la façade. Le profil donné par cet élément est ensuite reporté pour toute la longueur de la façade.

La Figure 88 représente les réflexions dans la scène selon les températures de chaque zone (1 à 4).

La température réfléchie pour les avant toits apparaît constante puisqu'il n'existe pas de contraste entre sa propre température et celle de sa réflexion. Quand la façade reflète le ciel, la température varie par rapport à l'angle d'élévation. Du fait de la

perspective, dans la zone plus proche de la caméra, l'angle d'élévation est grand, alors, la température réfléchie s'approche de la température du zénith. Dû à la perspective cet angle d'élévation diminue le long du canyon.



Figure 88. Température réfléchie calculée pour chaque pixel de l'image pour le 19 février 2019 à 22h00

En corrigeant l'image par rapport à la température réfléchie, les zones les plus impactées par ce filtre sont celles qui réfléchissent le ciel. Globalement la thermographie corrigée est plus chaude.

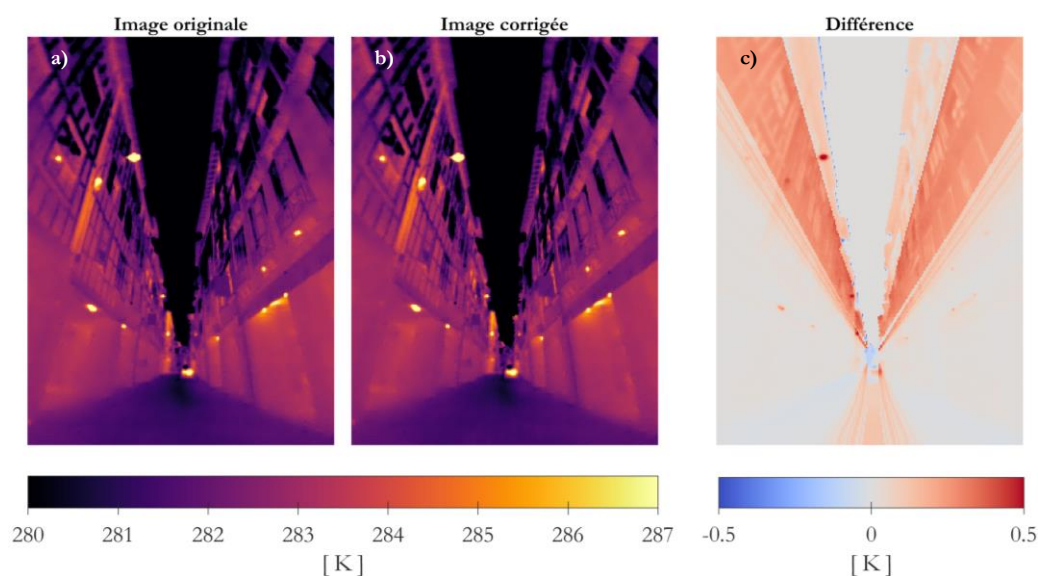


Figure 89. Correction de l'image par rapport à la température réfléchie.
a) image originale b) image corrigée c) différence

Correction complète

Une caméra mesure le rayonnement des surfaces dans la scène. La radiance correspond au flux émis, au flux réfléchi, au flux transmis ou au flux reçu par unité d'angle solide. Par conséquent, pour évaluer la température de surface, les corrections présentées filtrent les flux parasites pour déterminer l'émittance des surfaces de la scène, c'est-à-dire uniquement le flux émis par la surface.

Chacun des filtres appliqués individuellement engendre des modifications de l'image originale, la plupart d'entre elles sont quasiment imperceptibles. Ceci est dû au fait que l'effet de chacun des paramètres est interdépendant.

Par exemple, l'atténuation atmosphérique, telle que présentée ci-dessus, est une fonction de trois variables et est ainsi indépendante des autres facteurs de la scène. Cependant, son effet sur la thermographie est également affecté par l'émissivité et la température réfléchie.

On peut le voir aisément lorsqu'on écrit dans une équation le modèle mathématique sur lequel fonctionne la caméra thermique. Dans cette équation, s est le signal mesuré par le capteur et correspond à l'intensité totale du rayonnement thermique qui atteint le capteur. s_{ob} correspond au rayonnement thermique qui provient de la surface étudiée et s_{ob} qui correspond donc au rayonnement d'un corps noir à la température ambiante dite aussi température réfléchie.

$$s = \varepsilon_{ob}\tau_{atm}s_{ob} + \tau_{atm}(1 - \varepsilon_{ob})s_{env} + (1 - \tau_{atm})s_{atm} \quad (61)$$

L'effet combiné de tous les filtres donne l'image de la Figure 90b. Par rapport à l'image originale, la plus grande différence se situe au sommet des façades et dans le ciel. De plus, les fenêtres apparaissent plus chaudes que dans l'image non corrigée. En raison du processus manuel de sélection des masques de fenêtre, il existe certains artefacts tels que les cadres de fenêtre. Les façades ainsi que le sol de la scène sont eux plus uniformes après la correction. Cependant, il est encore possible d'observer que le centre du canyon urbain et la partie supérieure des façades sont légèrement plus froids que le reste de la scène.

La réflexion du rayonnement infrarouge sur les surfaces de la scène a une composante spéculaire importante. En effet dans cette étude, la réflexion a été considérée comme 100% spéculaire, on observe certaines lignes qui suivent la

perspective de la rue. Puisque la géométrie a été simplifiée, sa réflexion ne suit pas parfaitement le profil que l'on peut observer sur les fenêtres ; cependant, l'approximation est correcte.

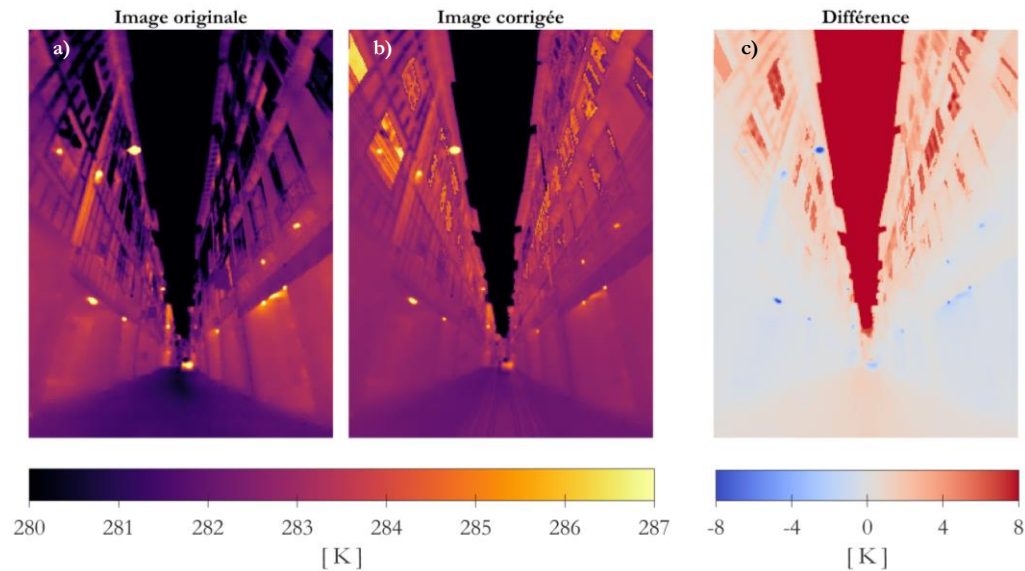


Figure 90. Correction de l'image en utilisant tous les filtres au même temps.
a) image originale b) image corrigée c) différence

Quand on regarde la Figure 90c, on peut voir que l'effet combiné des filtres a un effet opposé à l'effet des certains filtres pris indépendamment. Par exemple, en regardant les fenêtres, la combinaison de tous les filtres donne une température plus élevée, alors que si seule l'émissivité est corrigée, le résultat est une température plus basse.

La Figure 91a montre la radiosité, celle-ci caractérise le rayonnement total qui quitte la surface ; elle est composée de l'émission et la réflexion du rayonnement. L'application de toutes les corrections permet de filtrer tous les flux parasites pour déterminer l'exitance des surfaces de la scène (Figure 91b), c'est-à-dire le flux émis par la surface uniquement. Cela permettra de parler des températures de surface (Figure 91d) plutôt que des températures apparentes (Figure 91c).

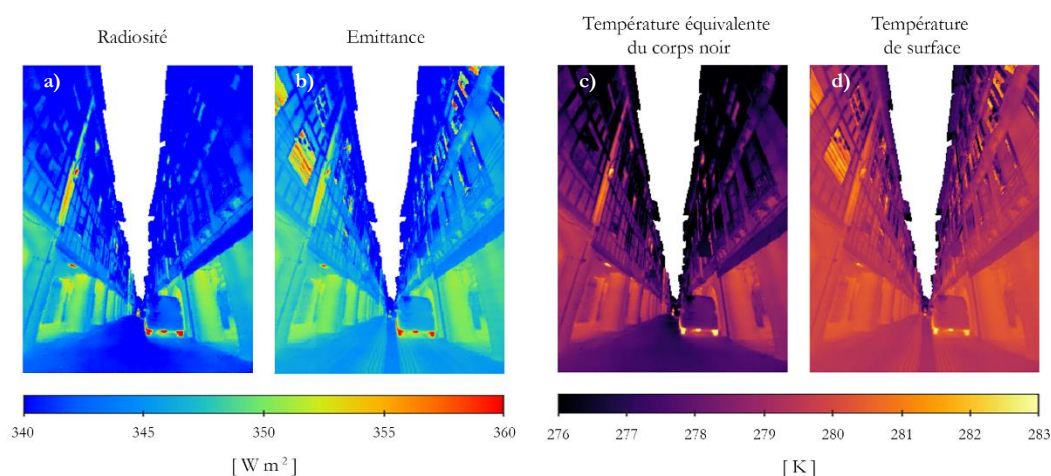


Figure 91. La rue des Tonneliers le 19 février 2019 à 8 :30 heures, avant et après la correction.

Ces images représentent la Rue des Tonneliers le 20 février 2019 à 8 : 30, une demie heure après le lever du soleil, lorsque la température extérieure atteint son point le plus bas. La correction des images révèle des informations qui jusque-là n'étaient pas visibles. Certaines fenêtres de la rue sont chaudes. Bien que la correction ait également un impact sur d'autres parties de l'image, celles-ci restent les éléments les plus contrastés.

En hiver, la température de la surface extérieure est basse et le transfert de chaleur par les fenêtres est généralement plus important que par les murs, c'est pourquoi il faut s'attendre à une température de surface du verre plus élevée que celle des murs.

Dans les ondes courtes, il est facile d'observer la présence d'habitants dans les logements notamment grâce à l'éclairage artificiel, même si les fenêtres ne sont pas complètement transparentes. En ondes longues, des observations similaires peuvent être faites en regardant la température du vitrage. À Bayonne, dans le centre-ville, comme dans d'autres villes européennes où les bâtiments n'ont que du simple vitrage, cet écart de température visible de l'extérieur correspond essentiellement à des déperditions à travers les vitrages.

Une observation de ce type permet d'avoir un aperçu de l'efficacité énergétique du bâtiment et de tirer des conclusions sur la consommation d'énergie de l'habitant.

La méthode présentée ici permet de corriger aisément les thermographies, en utilisant des thermomètres à contact comme référence. L'image est corrigée pixel par pixel à l'aide d'un tracé de rayons et d'un modèle géométrique très simplifié du canyon urbain.

La possibilité de couvrir une grande partie de la scène urbaine en une seule prise de vue et son résultat visuel font de la thermographie en perspective une technique au grand potentiel en termes de mesure dans l'environnement urbain. Mais elle présente un autre avantage, celui d'être une méthode sans contact. Ceci est particulièrement important pour l'observation de matériaux à haute transmittance thermique comme le verre, car, contrairement aux autres méthodes, elle n'influence pas la température de surface.

4.8. Discussion sur l'application

Dans le cas d'une étude dans un environnement urbain, la façade est l'élément le plus accessible. Elle fait le lien entre l'extérieur et l'intérieur, donc son observation détaillée permet de comprendre les échanges d'énergie qui ont lieu à travers elle et l'un de ses principaux constituant est la fenêtre.

La quantité de surface vitrée dans un contexte urbain dépend de différents facteurs tels que le climat, l'orientation, les réglementations urbaines et même la fonction donnée au bâtiment. Selon la réglementation, les fenêtres représentent au minimum 1/6 de la surface habitable, ce qui équivaut à environ 30 % de la surface des façades.

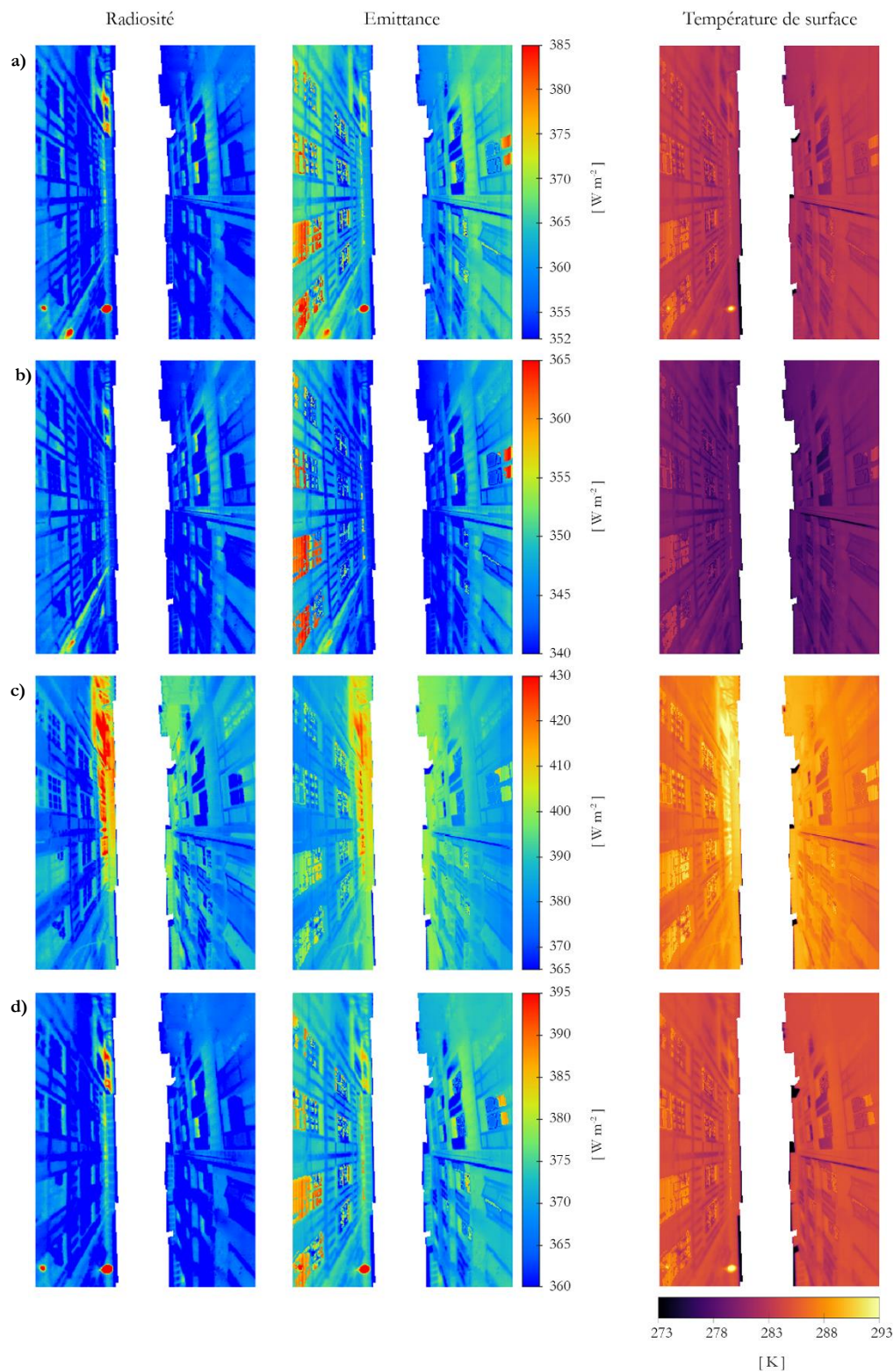
En raison de leurs caractéristiques matérielles, les fenêtres sont un facteur important dans le bilan thermique d'un bâtiment. Le simple vitrage a une transmittance thermique élevée, de sorte que même si les murs sont bien isolés, une grande partie de la chaleur est perdue à travers le verre. Alors, il est possible de faire l'hypothèse que, pendant l'hiver, s'ils sont plus chauds que les autres surfaces extérieures, cela est dû à l'utilisation d'un système de chauffage au sein de l'habitation.

Afin de mieux voir les fenêtres, il est nécessaire d'orienter la caméra vers le zénith. Dans cette position, les fenêtres prennent plus de place. La Figure 92 montre quatre trios d'images. Chaque trio est composé de la radiosité de la scène (flux non filtré), de l'émittance (flux filtré) et de la température de surface correspondante. Ces images représentent différents moments de la journée. La radiosité et l'émittance sont toutes deux représentées à l'aide d'échelles de couleurs propres à chaque image, tandis que toutes les images qui représentent la température de surface sont associées à une seule échelle de couleurs. Cela permet d'observer l'évolution de la température pendant les 24 heures et en même temps d'observer les variations des flux à chaque moment.

L'image a) correspond à la première image de la campagne de mesures et l'image d) à la dernière, les deux capturées à 22 h mais avec 24 heures de différence. Les images

b) et c) montrent la scène lorsque les températures de surface ont atteint les extrêmes. La température de l'air extérieur la plus basse a été enregistrée à 8h30 (Figure 92b)) et la plus haute à 17h30 (Figure 92c)).

En comparant visuellement la radiosité et l'exitance de la scène, on peut voir qu'une fois les flux parasites filtrés, le flux sortant des fenêtres est visible. Comme tout objet, le vitrage émet de l'énergie en fonction de sa température. En règle générale cette température se situe entre la température de l'air à l'intérieur et celle de l'extérieure. En hiver dans le moment le plus froid de la journée, avec l'utilisation du chauffage cet écart de température est plus important, et donc plus visible (Figure 92b)). Les corrections proposées permettent l'identification visuelle des fenêtres par lesquelles l'énergie du chauffage se perd. Dans le cas de la Rue des Tonneliers, ce sont les fenêtres situées sur la façade sud. Ce premier résultat qualitatif semble curieux puisque les appartements orientés vers le sud sont souvent considérés comme plus avantageux face aux apports solaires et donc liés à une consommation énergétique moindre.



En regardant la température de surface, à l'exception des fenêtres, on peut voir que la distribution de la température des façades est homogène à l'exception de l'image c) en raison de la tache solaire sur la partie supérieure de la façade sud.

Pour analyser chaque moment de cette série, en comparant les images les unes aux autres, les images sont représentées de manière relative à la température de l'air (Figure 93). [García Nevado 2019b] propose cette stratégie pour comparer des images sous différents climats. Cependant, dans cette étude, elle a été adaptée pour comparer quatre captures d'une même séquence.

Les images a), b) et d) de la Figure 93 sont très similaires. Seule la présence de la lampe chaude dans le coin inférieur gauche les différencie. Cela permet de reconnaître que les images a) et d) correspondent à des captures nocturnes. Hormis ce détail, les trois images sont essentiellement égales. En décrivant plus en détail chacune des images de la série, la première image montre la différence entre la température de l'air et la température de surface à 22 h. À ce moment, la quasi-totalité de la scène a une température de surface inférieure à la température de l'air. Cette différence est faible et reste inférieure à 1 K, sauf sur quelques éléments en bois de la façade. Ceux-ci présentent une différence légèrement plus importante. Cela vient du fait qu'une émissivité différente pour ces éléments n'a pas été prise en compte. Bien que les valeurs d'émissivité des matériaux de la scène puissent être très semblables, elles ne sont pas exactement les mêmes.

Les zones de l'image où la différence est positive correspondent aux fenêtres. Celles-ci sont jusqu'à 2,5 K au-dessus de la température de l'air. La deuxième image montre la scène à 8h30 et elle est très similaire à la précédente mais a, en général, des températures légèrement plus basses et la quatrième image montre la scène à 22h.

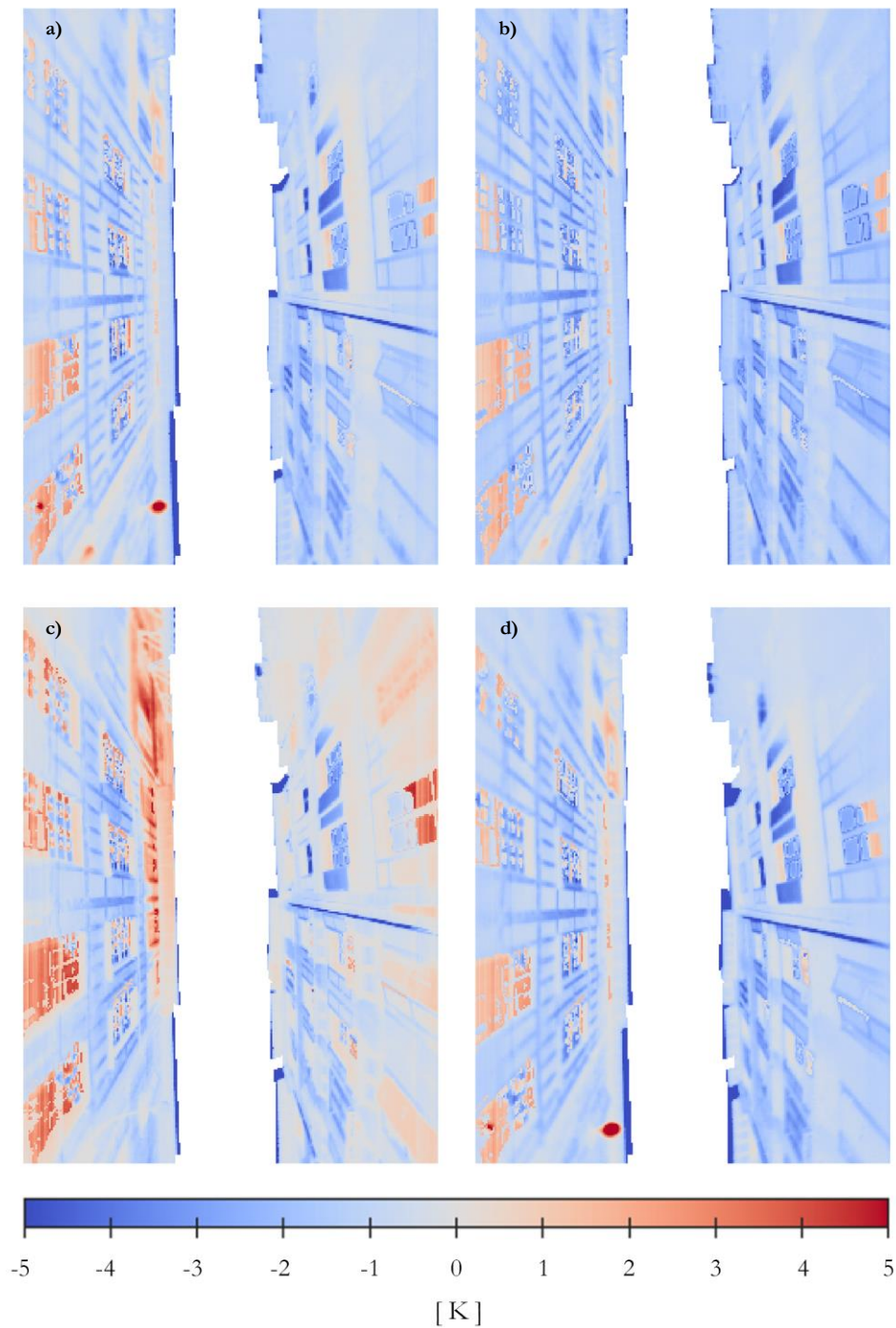


Figure 93. Quatre moments de la journée représentés relativement à la distribution de la température de l'air correspondant à chacun d'entre eux.

- a) Première image de la série à 22 : 00 le 19 Février
- b) Le moment le plus froid de la journée à 08 : 30 le 20 Février
- c) Le moment le plus chaud de la journée à 17 : 30 le 20 Février
- d) Dernière image de la série à 22 : 00 le 20 Février

La troisième image, montre la scène à 17h30. Cette image est différente des autres. La température de l'air et les températures de surface enregistrées à ce moment sont les plus élevées de toute la campagne de mesures. Le 20 février 2019, le soleil a atteint sa position la plus élevée dans le ciel à 13h20. Compte tenu de l'inertie des matériaux de la ville, on s'attend à ce que la température la plus élevée de la journée soit ressentie quelque temps après midi. Cependant, celle-ci a été mesurée une heure avant la tombée de la nuit. Cela est dû à la configuration de la rue.

Dans cette scène, la portion de ciel visible est réduite et, en raison de la période de l'année, le soleil touche, à peine, la partie supérieure de la façade sud. Par conséquent, la contribution solaire dans la scène est essentiellement limitée au rayonnement diffus. Lorsque la partie supérieure de la façade sud reçoit le soleil, elle reflète une partie de l'énergie mais en raison de sa haute émissivité, une grande partie de l'énergie est absorbée. Ainsi, cette partie de la façade se réchauffe et chauffe la partie basse de la façade opposée.

Ainsi, la partie basse de la façade sud est toujours plus froide, ce qui explique pourquoi ses habitants ont tendance à chauffer plus que leurs voisins. Sachant que Bayonne ne présente pas de climats extrêmes à aucun moment de l'année, on peut imaginer que le rayonnement provenant de la partie supérieure de la façade sud fournit suffisamment d'énergie à la façade nord pour faire une différence.

Dans un environnement urbain compact et sous un climat comme celui de Bayonne, un petit apport solaire peut avoir un impact sur la consommation énergétique des habitants et le résultat peut être visible de l'extérieur.

La mesure de la température de l'air intérieur dans deux appartements d'un même immeuble vient appuyer cette affirmation (Figure 94). Dans le premier appartement, les habitants utilisent le chauffage, dans le second, ils ne le font pas. On observe que pendant la nuit, la différence de température est d'environ 2,5 K, tandis que pendant la journée, cette différence est moindre, se rapprochant de 1 K.

Ces deux mesures représentent respectivement les appartements du troisième et du deuxième étage de la façade sud. À l'étage supérieur, l'action du thermostat est visible pendant les heures de nuit. Le chauffage s'arrête à 9h30 et après, la température ne baisse que d'un degré. À l'étage inférieur, la température varie moins pendant la journée et reste relativement stable à environ 289,5 K.

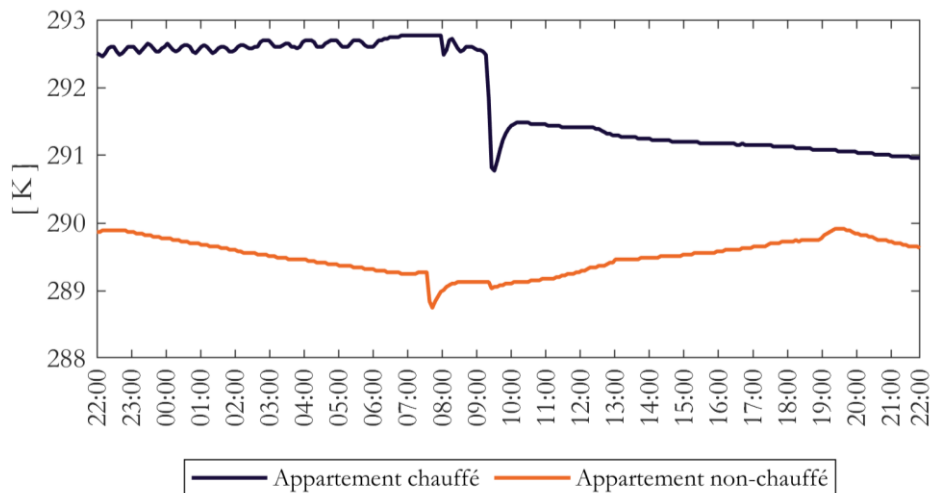


Figure 94. Température de l'air intérieur dans deux appartement de la façade sud.

En comparant la température de l'air de ces deux appartements pendant la journée, lorsque le chauffage est éteint dans les deux cas, on constate que la température de l'appartement supérieur est plus élevée. Cela est probablement dû aux apports solaires qui, dans un canyon urbain, augmentent avec la hauteur au-dessus du niveau de la rue.

L'évolution de la température au deuxième étage montre une relation avec la température de l'air extérieur. Elle diminue le matin jusqu'au lever du soleil et augmente jusqu'au coucher du soleil. Au contraire, lorsque le chauffage est éteint, la température dans l'appartement du troisième étage continue à baisser très lentement pendant le reste de la journée. Cela suggère que cet appartement a une inertie plus élevée. À Bayonne, il est plus courant de trouver des appartements comme ceux du deuxième étage.

Des observations comme celles-ci permettent non seulement d'identifier quelles sont les habitations utilisant un système de chauffage, mais aussi, de comprendre les raisons de cette utilisation. C'est alors qu'on voit l'importance des multi-réflexions, souvent oubliées lors des études. Celles-ci doivent être prises en compte pour la thermique en ondes longues, comme c'est le cas pour la lumière, en onde courtes [Bugeat 2020]. Il s'agit d'un outil performant pour les urbanistes lors de la conception de leurs projets, puisque ces informations, sont utiles pour déterminer à quel moment les habitants allument le chauffage, et comment ils peuvent modifier l'état d'une rue pour favoriser un apport de chaleur naturelle.

4.9. Conclusion

La méthode sans contact présentée dans ce chapitre permet de retrouver la température de surface d'une scène en perspective dans un milieu urbain. Cette méthode combine la thermographie, un modèle 3D simplifié et le lancer de rayons. Elle considère la réflexion parfaitement spéculaire, l'émission parfaitement diffuse et une température de l'air qui varie en fonction de l'altitude du canyon urbain. La répartition de cette dernière doit être correctement évaluée puisque les corrections proposées sont sensibles à la température de l'air.

Le résultat est validé en comparant à plusieurs sondes de températures (thermomètre de contact) disposés à différents endroits de la scène dans le champ de vue de la caméra thermique. Dans tous les cas la déviation est réduite à 0.5 K, ce qui améliore considérablement les méthodes du corps noir et du corps gris (environ 75 %). Cette étude montre qu'une grande partie de la différence entre la température équivalente du corps noir et la température de surface correspond à des paramètres faciles à évaluer, tels que la température réfléchie et la distance. En appliquant cette correction à tous les pixels, l'image obtenue peut être considérée comme fiable. Cependant, tous les filtres doivent être utilisés simultanément pour corriger l'image, une correction partielle conduit à des résultats erronés, car les filtres sont interdépendants.

La thermographie en perspective présente deux avantages. Dans une prise, les points mesurés sur la scène équivalent au nombre de pixels du capteur, ce qui permet une mesure plus efficace et fine de la scène urbaine tout en conservant la distribution spatiale. La thermographie évite les interférences que les méthodes de contact peuvent introduire, ce qui permet d'évaluer la température de surface des matériaux comme le verre qui pose des problèmes pour les autres méthodes en raison de sa haute transmittance thermique.

Dans une scène urbaine, cette caractéristique du verre permet d'observer les échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. En hiver, ces observations indiquent l'utilisation d'un système de chauffage au sein d'un bâtiment.

La réalisation d'une séquence temporelle permet d'observer l'évolution de la température de façade et met en lumière l'importance des multi-réflexions pour les ondes longues. On observe leur incidence dans les apports thermiques, qui souvent, est oubliée.

Cette méthode est la seule capable de se concentrer sur les façades urbaines. Celles-ci représentent la plus grande surface au sein d'une ville et seulement leurs

observations permettent d'avoir des indices sur le comportement de l'habitant. Une étude soignée des températures de surface permet d'observer ce comportement et de l'expliquer. Cette explication est peu évidente, et impossible à trouver en utilisant une autre méthode.

La précision apportée par cette méthode permettrait de calibrer des simulations et la combinaison entre la thermographie et la simulation offrirait la possibilité d'étudier des phénomènes physiques difficilement évaluables sur site.

5. Conclusions générales et perspectives

Conclusions

Par rapport à la production importante d'images satellitaires, l'imagerie acquise à hauteur d'homme n'a été utilisée qu'occasionnellement dans la recherche sur le climat urbain.

Nous proposons un dispositif facile à utiliser et bien adapté pour l'observation en milieu urbain. Celui-ci est constitué d'un trépied équipé d'une tête panoramique programmable sur laquelle est placée une caméra, thermographique ou photographique. Avec le matériel utilisé, une caméra thermique LWIR, d'une résolution de 320 x 240 pixels et un objectif possédant un champ de vision de 90° x 73°, plus d'un million de points de la scène sont mesurés lors d'une rotation qui prend environ trois minutes. La brièveté avec laquelle les mesures peuvent être prises réduit les perturbations dues à l'inertie de l'appareil de mesure. Ainsi, on peut étudier une scène à la fois dans le temps, l'espace et le spectre.

Les deux applications ici présentées apportent des connaissances fondamentales sur le paysage radiatif de la ville et montrent bien la relation entre la géométrie et le rayonnement.

Depuis le centre de la scène analysée, la première application se concentre sur la construction et l'exploitation des panoramas sphériques radiométriques sur deux bandes : 380 nm - 780 nm et 7.5 μm - 13 μm qui peuvent être extrapolés à tout le spectre. Ce flux radiatif intégré sert à calculer la température rayonnante moyenne.

Quinze mesures ont été faites sous des conditions différentes : de jour, de nuit, en été à Cordoue et en hiver à Bayonne. Le résultat obtenu par la méthode 4π est validé par comparaison avec un thermomètre de globe noir. La différence est inférieure à deux degrés dans tous les cas.

Nous avons montré que dans le cas des revêtements de sol, sous un climat chaud il est préférable de favoriser les sols lisses aux sols rugueux. Ce choix peut réduire la température de trois degrés pendant la journée et d'un degré pendant la nuit (Figure 62).

La seconde application porte sur l'exploitation de l'image en perspective pour observer les échanges thermiques entre les surfaces d'une rue de type canyon. À cause des distorsions importantes induites par la perspective, un travail additionnel de correction est nécessaire.

Nous proposons un lancer de rayons sur un modèle 3D simplifié pour identifier et éliminer les flux parasites qui influencent la mesure de la température de surface capturée par chaque pixel de la caméra thermique.

Cette procédure prend en compte les effets de l'atmosphère, de l'émissivité et de l'environnement, mais aussi les effets liés au réglage de la caméra. Celle-ci étant calibrée en fonction d'un corps noir, elle sous-estime l'émission atmosphérique.

Les mesures se sont déroulées sur 24 heures avec une prise d'image toutes les demi-heures, lors d'une journée d'hiver. Dix thermomètres de contact ont été disposés à différents endroits de la scène afin d'évaluer la déviation des températures de surface déterminées à partir de la thermométrie par télédétection. Dans tous les cas la différence est inférieure à 0.5 K.

Cette approche souple et robuste est applicable à toute campagne de mesure quelle que soit la complexité de la surface urbaine. Les thermographies corrigées révèlent des phénomènes qui n'étaient pas visibles auparavant, les écarts de température des fenêtres étant les plus notables (Figure 92).

La thermographie présente l'avantage d'apporter des résultats tant qualitatifs que quantitatifs par une méthode sans contact. Cela permet de mesurer la température de surface d'un matériau comme le verre, difficile à déterminer autrement en raison de sa haute transmittance thermique. En hiver, les déperditions énergétiques à travers l'enveloppe du bâtiment sont clairement visibles, plus particulièrement dans le cas du simple vitrage. L'approche utilisée est une alternative non intrusive pour identifier les « passoires thermiques ».

La réalisation d'une séquence temporelle permet d'observer l'évolution de la température de façade et met en lumière l'importance des réflexions multiples pour les échanges thermiques. L'observation de phénomènes inattendus dans deux bandes spectrales montre l'intérêt d'inclure une troisième bande pour mieux comprendre le passage de la réflexion diffuse à la réflexion spéculaire. Cette bande serait celle de l'infrarouge proche pour l'étude de la scène minérale urbaine (Figure 93).

Perspectives

Au-delà des travaux décrits dans le cadre de cette thèse, j'ai participé au travail d'équipe de la Chaire « Architecture et Physique Urbaine ». L'objectif principal a été de mettre au point des simulations par la méthode des éléments finis des échanges thermiques complets à l'échelle d'une rue. Le choix s'est porté naturellement sur la rue des Tonneliers à Bayonne, avec les étapes suivantes :

- Première campagne de thermographies au printemps 2017 [García Nevado 2019a] ;
- Réalisation d'un modèle CAO détaillé de la rue à l'automne 2017 [Acuña Paz y Miño 2018] ;
- Premières simulations sur Cast3m au printemps 2018 [Aguerre 2019] ;
- Deuxième campagne de thermographies en hiver 2019 [Acuña Paz y Miño, décrite dans cette thèse] ;
- Secondes simulations sur Cast3m au printemps 2019 (sur la base du modèle CAO détaillé [Aguerre 2020] [Duport 2019]).



Figure 95. Modèle détaillé de la Rue des Tonnelliers et de ses alentours.

Pour reproduire de manière simple et précise les caractéristiques complexes de la scène urbaine, un maillage conforme d'éléments principalement hexaédriques a été utilisé. Les hexaèdres ont l'avantage de reconstruire avec précision et avec peu d'éléments les scènes étudiées.

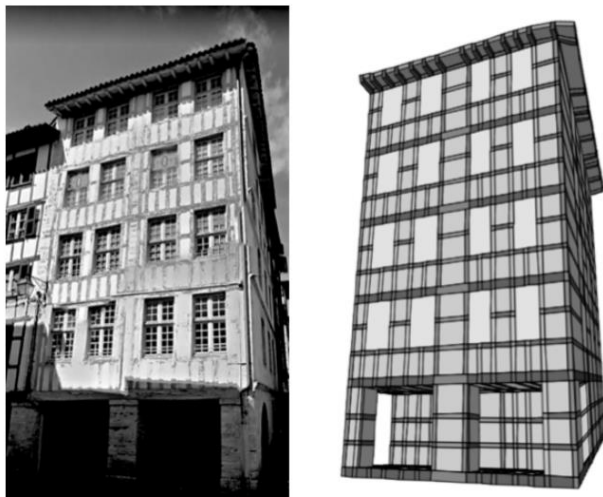


Figure 96. Photographie du 13 Rue des Tonnelliers et son modèle comportant 5729 éléments.

Ce modèle inclut les espaces intérieurs, ce qui permet l'étude multi-échelle.

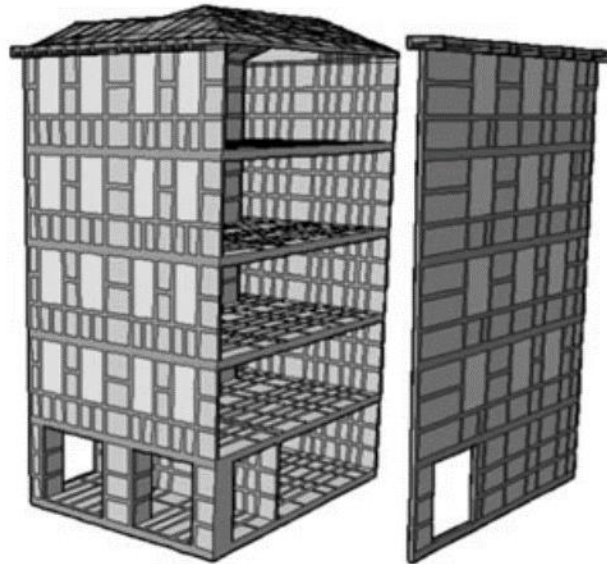


Figure 97. Modèle du 13 Rue des Tonneliers

La Figure 98 montre un premier résultat (comparaison mesure – simulation)

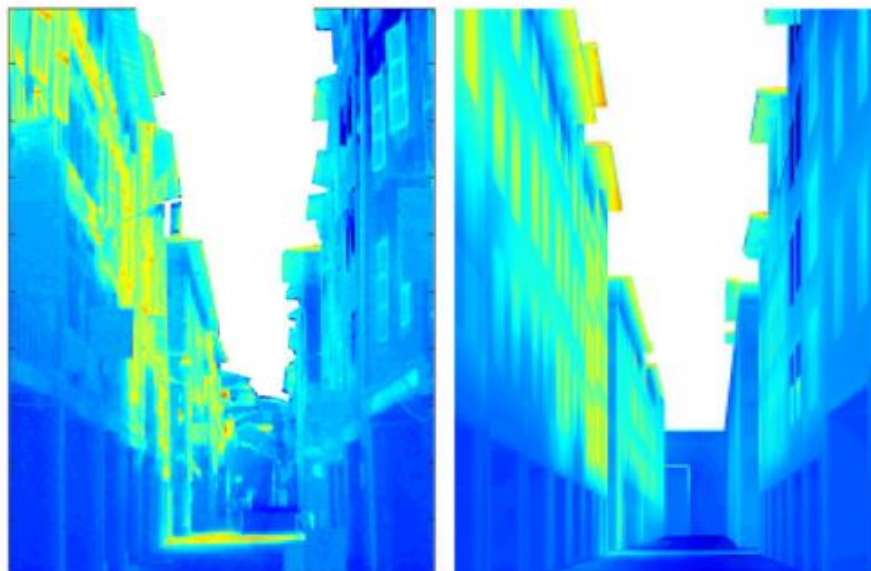


Figure 98. Comparaison entre la mesure et la simulation.

Quant aux simulations à venir, les résultats de cette thèse montrent :

- Que des représentations telles que celles du chapitre 3 sont assez parlantes et synthétiques pour faire un état des lieux des échanges thermiques à l'échelle du quartier qui soit utile pour le projet urbain, la simulation permettrait d'automatiser ces descriptions et de réaliser plus rapidement des essais de modification ;
- Qu'il est possible de comparer des thermographies simulées et mesurées, à condition de corriger ces dernières comme indiqué dans le chapitre 4 ;

Qu'il faudrait mesurer et simuler dans des bandes spectrales plus fines que celles retenues habituellement (ondes courtes et ondes longues), en espérant que les comparaisons entre mesure et simulation permettent de préciser les propriétés optiques des surfaces de la scène.

Références

A

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. *À la pointe du BIM: Ingénierie et architecture, enseignement et recherche*, p.103.

Acuña Paz y Miño, J., Lawrence, C. and Beckers, B., 2019. 4π thermography: a projection to Understand Thermal Balance, in: *Proceedings of the 16th IBPSA Conference*, Rome, Italy, Sept. 2-4, 2019.

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.

Adderley, C., Christen, A. and Voogt, J.A., 2015. The effect of radiometer placement and view on inferred directional and hemispheric radiometric temperatures of an urban canopy. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(7), pp.2699-2714.

Aguerre, J.P., Nahon, R., García-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, J.P., García-Nevado, E., Acuña Paz y Miño, J., Fernández, E. and Beckers, B., 2020, June. Physically Based Simulation and Rendering of Urban Thermography. In *Computer Graphics Forum*.

Aguerreberre, C., Delon, J., Gousseau, Y. and Musé, P., 2014. Best algorithms for HDR image generation. A study of performance bounds. *SLAM Journal on Imaging Sciences*, 7(1), pp.1-34.

Akbari, H., Cartalis, C., Kolokotsa, D., Muscio, A., Pisello, A.L., Rossi, F., Santamouris, M., Synnefa, A., Wong, N.H. and Zinzi, M., 2016. Local climate change and urban heat island mitigation techniques—the state of the art. *Journal of Civil Engineering and Management*, 22(1), pp.1-16.

- Albatici, R., Passerini, F., Tonelli, A.M. and Gialanella, S., 2013. Assessment of the thermal emissivity value of building materials using an infrared thermovision technique emissometer. *Energy and buildings*, 66, pp.33-40.
- Albatici, R., Tonelli, A.M. and Chiogna, M., 2015. A comprehensive experimental approach for the validation of quantitative infrared thermography in the evaluation of building thermal transmittance. *Applied energy*, 141, pp.218-228.
- Al Bitar, A., Landier, L., Guilleron, J., Lauret, N., Gastellu-Etchegorry, J.P., Tiangang, Y., Feigenwinter, C., Mitraka, Z. and Chrysoulakis, N., 2017, March. Assessing urban canopies 3d radiative and energy budgets with remote sensing and dart model. In *2017 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)* (pp. 1-4). IEEE.
- 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.
- Arnfield, A.J., 1982. An approach to the estimation of the surface radiative properties and radiation budgets of cities. *Physical Geography*, 3(2), pp.97-122.
- Artis, D.A. and Carnahan, W.H., 1982. Survey of emissivity variability in thermography of urban areas. *Remote sensing of Environment*, 12(4), pp.313-329.
- Asano, K., Hoyano, A. and Matsunaga, T., 1996, June. Development of an urban thermal environment measurement system using a new spherical thermography technique. In *Infrared Technology and Applications XXII* (Vol. 2744, pp. 620-631). International Society for Optics and Photonics.
- Asdrubali, F., Baldinelli, G. and Bianchi, F., 2012. A quantitative methodology to evaluate thermal bridges in buildings. *Applied Energy*, 97, pp.365-373.
- ASHRAE, Fundamentals Handbook, 2001. SI Edition, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, USA.
- Avdelidis, N.P. and Moropoulou, A., 2003. Emissivity considerations in building thermography. *Energy and Buildings*, 35(7), pp.663-667.

B

Balaras, C.A. and Argiriou, A.A., 2002. Infrared thermography for building diagnostics. *Energy and buildings*, 34(2), pp.171-183.

Barthelemy, M., 2019. Modeling cities. *Comptes Rendus Physique*, 20(4), pp.293-307.

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, B., Masset, L. and Beckers, P., 2007. Enrichment of the visual experience by a wider choice of projections, 11th Intern. In Conf. on Comp. Supported Cooperative Work in Design (pp. 26-28).

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, 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, B., 2013. Worldwide aspects of solar radiation impact. *Solar energy at urban scale*, pp.99-118.

Beckers, B. and Beckers, P., 2014. Reconciliation of geometry and perception in radiation physics. Wiley-ISTE.

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.

Beckers, B., Acuña Paz y Miño, J., and Lawrence, C., 2020. How Can Reflected Light Modify Solar Gains in a Compact Urban District?. In *Renewable Energy and Sustainable Buildings* (pp. 699-707). Springer, Cham.

Bedford, T. and Warner, C.G., 1934. The globe thermometer in studies of heating and ventilation. *Epidemiology & Infection*, 34(4), pp.458-473.

Berdahl, P. and Fromberg, R., 1982. The thermal radiance of clear skies. *Solar energy*, 29(4), pp.299-314.

- Berdahl, P. and Martin, M., 1984. Emissivity of clear skies. *Solar Energy*, 32(5), pp.663-664.
- Berk, A., Bernstein, L.S. and Robertson, D.C., 1989. MODTRAN: A Moderate Resolution Model for LOWTRAN 7 (GL-TR-89-0122). *Air Force Geophysics Laboratory, Bedford, Mass.*
- Blocken, B. and Carmeliet, J., 2004. Pedestrian wind environment around buildings: Literature review and practical examples. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 28(2), pp.107-159.
- Bouguet, J.Y., 2015. MATLAB calibration tool. URL http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc.
- Brady, J., 2010. A Phased Approach for Large Building Infrared Inspections. URL <https://irinfo.org/04-01-2010-brady/>
- Brown, R.J., Cihlar, J. and Teillet, P.M., 1981. Quantitative residential heat loss study. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 47(9), pp.1327-1333.
- Brown, J.R. and Hamilton, H.R., 2013. Quantitative infrared thermography inspection for FRP applied to concrete using single pixel analysis. *Construction and Building Materials*, 38, pp.1292-1302.
- Bugeat, A., Beckers, B. and Fernández, E., 2020. Improving the daylighting performance of residential light wells by reflecting and redirecting approaches. *Solar Energy*, 207, pp.1434-1444.

C

- Cao, B., Liu, Q., Du, Y., Roujean, J.L., Gastellu-Etchegorry, J.P., Trigo, I.F., Zhan, W., Yu, Y., Cheng, J., Jacob, F. and Lagouarde, J.P., 2019. A review of earth surface thermal radiation directionality observing and modeling: Historical development, current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 232, p.111304.
- Capeluto, I.G., 2003. The influence of the urban environment on the availability of daylighting in office buildings in Israel. *Building and Environment*, 38(5), pp.745-752.

- Carlson, T.N., Dodd, J.K., Benjamin, S.G. and Cooper, J.N., 1981. Satellite estimation of the surface energy balance, moisture availability and thermal inertia. *Journal of Applied Meteorology*, 20(1), pp.67-87.
- Chandler, D., 2011. The big picture on energy loss. URL <https://news.mit.edu/2011/ir-scanning-energy-0316>
- Chen, F., Kusaka, H., Bornstein, R., Ching, J., Grimmond, C.S.B., Grossman-Clarke, S., Loridan, T., Manning, K.W., Martilli, A., Miao, S. and Sailor, D., 2011. The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems. *International Journal of Climatology*, 31(2), pp.273-288.
- Chen, L. and Ng, E., 2012. Outdoor thermal comfort and outdoor activities: A review of research in the past decade. *Cities*, 29(2), pp.118-125.
- Choi, G.S., Kim, K.W., Kang, J.S. and Lee, S.E., 2007. Evaluation on thermal performance combined with measurement and simulation for development of on-site evaluation method. *Proceeding: Building Simulation 2007*, pp.175-182.
- Christen, A. and Vogt, R., 2004. Energy and radiation balance of a central European city. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 24(11), pp.1395-1421.
- Christen, A., Meier, F. and Scherer, D., 2012. High-frequency fluctuations of surface temperatures in an urban environment. *Theoretical and Applied Climatology*, 108(1-2), pp.301-324.
- Chrysoulakis, N., Grimmond, S., Feigenwinter, C., Lindberg, F., Gastellu-Etchegorry, J.P., Marconcini, M., Mitraka, Z., Stagakis, S., Crawford, B., Olofson, F. and Landier, L., 2018. Urban energy exchanges monitoring from space. *Scientific reports*, 8(1), pp.1-8.
- CIE - Commission internationale de l'éclairage 2020. *Definition Of Radiance*. [online] Available at: <<http://cilv.cie.co.at/term/1012>> [Accessed on March 2020].
- 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).

Clausing, L.T. and Level III, P.A.C.N., 2007. Emissivity: Understanding the difference between apparent and actual infrared temperatures. Fluke Application Note, Fluke Education Partnership Program, www.fluke.com.

Cros, B., Durand, P., Cachier, H., Drobinski, P., Frejafon, E., Kottmeier, C., Perros, P.E., Peuch, V.H., Ponche, J.L., Robin, D. and Saïd, F., 2004. The ESCOMPTE program: an overview. *Atmospheric Research*, 69(3-4), pp.241-279.

D

Datcu, S., Ibos, L., Candau, Y. and Matteï, S., 2005. Improvement of building wall surface temperature measurements by infrared thermography. *Infrared physics & technology*, 46(6), pp.451-467.

De Dear, R., 1988. Ping-pong globe thermometers for mean radiant temperatures. *H and V Engineer*, 60(681), pp.10-11.

Debevec, P.E. and Malik, J., 2008. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. In *ACM SIGGRAPH 2008 classes* (pp. 1-10).

Doulos, L., Santamouris, M. and Livada, I., 2004. Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials. *Solar energy*, 77(2), pp.231-249.

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

E

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.

Eliasson, I., 1996. Urban nocturnal temperatures, street geometry and land use. *Atmospheric Environment*, 30(3), pp.379-392.

F

Fanger, P.O., 1972. Thermal comfort, analysis and application in environmental engineering.

Fiala, D., Havenith, G., Bröde, P., Kampmann, B. and Jendritzky, G., 2012. UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *International journal of biometeorology*, 56(3), pp.429-441.

Fokaides, P.A. and Kalogirou, S.A., 2011. Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes. *Applied energy*, 88(12), pp.4358-4365.

Fox, M., Coley, D., De Wilde, P. and Goodhew, S.M.R., 2012. Comparing transient simulation with thermography time series.

Fox, M., Coley, D., Goodhew, S. and De Wilde, P., 2015. Time-lapse thermography for building defect detection. *Energy and Buildings*, 92, pp.95-106.

G

Gade, R. and Moeslund, T.B., 2014. Thermal cameras and applications: a survey. *Machine vision and applications*, 25(1), pp.245-262.

Gagge, A.P., Stolwijk, J.A.J. and Hardy, J.D., 1967. Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures. *Environmental research*, 1(1), pp.1-20.

García Nevado, E., 2019a. Termografía del cañón urbano: uso de la perspectiva para una evaluación térmica global de la calle. Thèse doctoral, Universida Politecnica de Catalunya.

García Nevado, E., Roura, H.C. and Beckers, B., 2019b, 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.

- Gastellu-Etchegorry, J.P., Grau, E. and Lauret, N., 2012. DART: A 3D model for remote sensing images and radiative budget of earth surfaces. *Modeling and simulation in engineering*, (2).
- 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, B., 1998. *Climate considerations in building and urban design*. John Wiley & Sons.
- González-Aguilera, D., Lagueela, S., Rodríguez-Gonzálvez, P. and Hernández-López, D., 2013. Image-based thermographic modeling for assessing energy efficiency of buildings façades. *Energy and Buildings*, 65, pp.29-36.
- Goodhew, J., Pahl, S., Auburn, T. and Goodhew, S., 2015. Making heat visible: promoting energy conservation behaviors through thermal imaging. *Environment and Behavior*, 47(10), pp.1059-1088.
- Grau, E. and Gastellu-Etchegorry, J.P., 2013. Radiative transfer modeling in the Earth–Atmosphere system with DART model. *Remote Sensing of Environment*, 139, pp.149-170.
- Grimmond, C.S.B. and Oke, T.R., 2002. Turbulent heat fluxes in urban areas: Observations and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS). *Journal of Applied Meteorology*, 41(7), pp.792-810.
- Grimmond, C.S.B., Blackett, M., Best, M.J., Barlow, J., Baik, J.J., Belcher, S.E., Bohnenstengel, S.I., Calmet, I., Chen, F., Dandou, A. and Fortuniak, K., 2010. The international urban energy balance models comparison project: first results from phase 1. *Journal of applied meteorology and climatology*, 49(6), pp.1268-1292.
- Grinzato, E., Vavilov, V. and Kauppinen, T., 1998. Quantitative infrared thermography in buildings. *Energy and buildings*, 29(1), pp.1-9.
- Grinzato, E., Cadelano, G. and Bison, P., 2010. Moisture map by IR thermography. *Journal of Modern Optics*, 57(18), pp.1770-1778.
- Grossberg, M.D. and Nayar, S.K., 2003. Determining the camera response from images: What is knowable?. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 25(11), pp.1455-1467.

H

Hammerle, A., Meier, F., Heini, M., Egger, A. and Leitinger, G., 2017. Implications of atmospheric conditions for analysis of surface temperature variability derived from landscape-scale thermography. *International journal of biometeorology*, 61(4), pp.575-588.

Harman, I.N., Best, M.J. and Belcher, S.E., 2004. Radiative exchange in an urban street canyon. *Boundary-Layer Meteorology*, 110(2), pp.301-316.

Hart, J.M., 1991. A practical guide to infra-red thermography for building surveys. Bracknell: Building Research Establishment.

Hénon, A., Mestayer, P.G., Lagouarde, J.P. and Voogt, J.A., 2012. An urban neighborhood temperature and energy study from the CAPITOUL experiment with the SOLENE model. *Theoretical and Applied Climatology*, 110(1-2), pp.177-196.

Hogan, R.J., 2019. An exponential model of urban geometry for use in radiative transfer applications. *Boundary-Layer Meteorology*, 170(3), pp.357-372.

Holst, G.C., 2000. Common sense approach to thermal imaging (pp. 90-109). Washington: SPIE Optical Engineering Press.

Höppe, P., 1999. The physiological equivalent temperature—a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International journal of Biometeorology*, 43(2), pp.71-75.

Hurter, F. and Driffeld, V.C., 1890. Photochemical investigations and a new method of determination of the sensitiveness of photographic plates. *Journal of the Society of the Chemical Industry*, 9, pp.455-469.

J

Jensen, J.R., 2009. Remote sensing of the environment: An earth resource perspective 2/e. Pearson Education India.

K

Kántor, N. and Unger, J., 2011. The most problematic variable in the course of human-biometeorological comfort assessment—the mean radiant temperature. *Open Geosciences*, 3(1), pp.90-100.

Kasten, F. and Young, A.T., 1989. Revised optical air mass tables and approximation formula. *Applied optics*, 28(22), pp.4735-4738.

Koch, W., 1961. A Method of Calibrating Two-Sphere Non-directional Radiometers. *Nature*, 192(4806), p.960.

Kominsky, J.R., Luckino, J.S. and Martin, T.F., 2007. Passive infrared thermography—a qualitative method for detecting moisture anomalies in building envelopes. *Tedford Pond*, 2005, pp.1-11.

Krayenhoff, E.S. and Voogt, J.A., 2007. A microscale three-dimensional urban energy balance model for studying surface temperatures. *Boundary-Layer Meteorology*, 123(3), pp.433-461.

Kruczek, T., 2015. Conditions for the use of infrared camera diagnostics in energy auditing of the objects exposed to open air space at isothermal sky. *Archives of Thermodynamics*, 36.

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, 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.

Lagouarde, J.P., Dayau, S., Moreau, P. and Guyon, D., 2013. Directional anisotropy of brightness surface temperature over vineyards: Case study over the Medoc region (SW France). *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(2), pp.574-578.

Lagüela, S., Armesto, J., Arias, P. and Herráez, J., 2012. Automation of thermographic 3D modelling through image fusion and image matching techniques. *Automation in Construction*, 27, pp.24-31.

Lapaine, M., 2011. Mollweide Map Projection. *KoG*, 15(15.), pp.7-16.

Lee, I., Voogt, J.A. and Gillespie, T.J., 2018. Analysis and comparison of shading strategies to increase human thermal comfort in urban areas. *Atmosphere*, 9(3), p.91.

Lee, S., Moon, H., Choi, Y. and Yoon, D.K., 2018. Analyzing thermal characteristics of urban streets using a thermal imaging camera: A case study on commercial streets in Seoul, Korea. *Sustainability*, 10(2), p.519.

Lehmann, B., Wakili, K.G., Frank, T., Collado, B.V. and Tanner, C., 2013. Effects of individual climatic parameters on the infrared thermography of buildings. *Applied Energy*, 110, pp.29-43.

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.

Lindberg, F. and Grimmond, C.S.B., 2011. Nature of vegetation and building morphology characteristics across a city: influence on shadow patterns and mean radiant temperatures in London. *Urban Ecosystems*, 14(4), pp.617-634.

Lindberg, F., Grimmond, C.S.B., Gabey, A., Huang, B., Kent, C.W., Sun, T., Theeuwes, N.E., Järvi, L., Ward, H.C., Capel-Timms, I. and Chang, Y., 2018. Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP): An integrated tool for city-based climate services. *Environmental modelling & software*, 99, pp.70-87.

Littlefield, R., 2006. Theory of the “No-Parallax” Point in Panorama Photography. [online] Available at: <<http://www.janrik.net/PanoPostings/NoParallaxPoint/TheoryOfTheNoParallaxPoint.pdf>> [Accessed on September 2018].

M

Maldague, X., 2001. Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing.

- Masson, V., 2000. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-layer meteorology*, 94(3), pp.357-397.
- Masson, V., 2006. Urban surface modeling and the meso-scale impact of cities. *Theoretical and applied climatology*, 84(1-3), pp.35-45.
- Masson, V., Gomes, L., Pigeon, G., Lioussé, C., Pont, V., Lagouarde, J.P., Voogt, J., Salmond, J., Oke, T.R., Hidalgo, J. and Legain, D., 2008. The canopy and aerosol particles interactions in Toulouse urban layer (CAPITOU) experiment. *Meteorology and atmospheric physics*, 102(3-4), p.135.
- Martilli, A., 2003. A two-dimensional numerical study of the impact of a city on atmospheric circulation and pollutant dispersion in a coastal environment. *Boundary-Layer Meteorology*, 108(1), pp.91-119.
- Maroy, K., Carbonez, K., Steeman, M. and Van Den Bossche, N., 2017. Assessing the thermal performance of insulating glass units with infrared thermography: Potential and limitations. *Energy and Buildings*, 138, pp.175-192.
- Martin, M. and Berdahl, P., 1984a. Summary of results for the spectral and angular sky radiation measurement program. *Solar Energy*, 33(3), pp.241-252.
- Martin, M. and Berdahl, P., 1984b. Characteristics of infrared sky radiation in the United States. *Solar energy*, 33(3-4), pp.321-336.
- McIntosh, G. and Huff, R., 2018, May. Emissivity considerations for thermographic fieldwork: why table values don't work. In *Thermosense: Thermal Infrared Applications XL* (Vol. 10661, p. 1066107). International Society for Optics and Photonics.
- Martinez-De Dios, J.R. and Ollero, A., 2006, July. Automatic detection of windows thermal heat losses in buildings using UAVs. In *2006 world automation congress* (pp. 1-6). IEEE.
- Mauree, D., Coccolo, S., Kaempf, J. and Scartezzini, J.L., 2017. Multi-scale modelling to evaluate building energy consumption at the neighbourhood scale. *PLoS one*, 12(9), p.e0183437.
- Meier, F., Scherer, D., Richters, J. and Christen, A., 2011. Atmospheric correction of thermal-infrared imagery of the 3-D urban environment acquired in oblique viewing geometry. *Atmos Meas Tech*, 4(5), pp.909-922.
- Mestayer, P.G., Durand, P., Augustin, P., Bastin, S., Bonnefond, J.M., Bénech, B., Campistron, B., Coppalle, A., Delbarre, H., Dousset, B. and Drobinski, P., 2005.

The urban boundary-layer field campaign in Marseille (UBL/CLU-ESCOMPTE): set-up and first results. *Boundary-Layer Meteorology*, 114(2), pp.315-365.

Minkina, W. and Dudzik, S., 2009. *Infrared thermography: errors and uncertainties*. John Wiley & Sons.

Minkina, W. and Klecha, D., 2015. 1.4-Modeling of Atmospheric Transmission Coefficient in Infrared for Thermovision Measurements. *Proceedings IRS² 2015*, pp.903-907.

Monks, P.S., Granier, C., Fuzzi, S., Stohl, A., Williams, M.L., Akimoto, H., Amann, M., Baklanov, A., Baltensperger, U., Bey, I. and Blake, N., 2009. Atmospheric composition change—global and regional air quality. *Atmospheric environment*, 43(33), pp.5268-5350.

Morrison, W., Kotthaus, S., Grimmond, C.S.B., Inagaki, A., Yin, T., Gastellu-Etchegorry, J.P., Kanda, M. and Merchant, C.J., 2018. A novel method to obtain three-dimensional urban surface temperature from ground-based thermography. *Remote sensing of environment*, 215, pp.268-283.

Morrison, W., Yin, T., Lauret, N., Guilleux, J., Kotthaus, S., Gastellu-Etchegorry, J.P., Norford, L. and Grimmond, S., 2020. Atmospheric and emissivity corrections for ground-based thermography using 3D radiative transfer modelling. *Remote Sensing of Environment*, 237, p.111524.

N

Nahon, R., Acuña Paz y Miño, J., and Beckers, B., 2019. Exploring the Sky Longwave Radiance Distribution in the French Basque Country., in: *Proceedings of the 16th IBPSA Conference*, Rome, Italy, Sept. 2-4, 2019.

Nikolopoulou, M. and Lykoudis, S., 2007. Use of outdoor spaces and microclimate in a Mediterranean urban area. *Building and environment*, 42(10), pp.3691-3707.

Nunez, M. and Oke, T.R., 1977. The energy balance of an urban canyon. *Journal of Applied Meteorology*, 16(1), pp.11-19.

O

Offerle, B., Eliasson, I., Grimmond, C.S.B. and Holmer, B., 2007. Surface heating in relation to air temperature, wind and turbulence in an urban street canyon. *Boundary-Layer Meteorology*, 122(2), pp.273-292.

O'Grady, M., Lechowska, A.A. and Harte, A.M., 2017. Infrared thermography technique as an in-situ method of assessing heat loss through thermal bridging. *Energy and Buildings*, 135, pp.20-32.

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

Oke, T.R. and Cleugh, H.A., 1987. Urban heat storage derived as energy balance residuals. *Boundary-Layer Meteorology*, 39(3), pp.233-245.

Oke, T.R., 1988. The urban energy balance. *Progress in Physical geography*, 12(4), pp.471-508.

P

Pajani, D., 2012. La thermographie du bâtiment: Principes et applications du diagnostic thermographique. Editions Eyrolles.

Pearlmutter, D., Berliner, P. and Shaviv, E., 2006. Physical modeling of pedestrian energy exchange within the urban canopy. *Building and environment*, 41(6), pp.783-795.

Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J. and Stewart, R., 1990. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar energy*, 44(5), pp.271-289.

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.

Porras-Amores, C., Mazarrón, F.R. and Cañas, I., 2013. Using quantitative infrared thermography to determine indoor air temperature. *Energy and Buildings*, 65, pp.292-298.

Poynton, C., 2003. Digital video and HDTV algorithms and interfaces. *Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco*, 260, p.292.

Q

Qi, J., Xie, D., Yin, T., Yan, G., Gastellu-Etchegorry, J.P., Li, L., Zhang, W., Mu, X. and Norford, L.K., 2019. LESS: Large-Scale remote sensing data and image simulation framework over heterogeneous 3D scenes. *Remote Sensing of Environment*, 221, pp.695-706.

R

Reinhard, E., Heidrich, W., Debevec, P., Pattanaik, S., Ward, G. and Myszkowski, K., 2010. *High dynamic range imaging: acquisition, display, and image-based lighting*. Morgan Kaufmann.

Ren, C., Ng, E.Y.Y. and Katzschner, L., 2011. Urban climatic map studies: a review. *International journal of climatology*, 31(15), pp.2213-2233.

Richards, C.H., Stoll, A.M. and Hardy, J.D., 1951. The panradiometer: An absolute measuring instrument for environmental radiation. *Review of Scientific Instruments*, 22(12), pp.925-934.

Robertson, M.A., Borman, S. and Stevenson, R.L., 2003. Estimation-theoretic approach to dynamic range enhancement using multiple exposures. *Journal of Electronic Imaging*, 12(2), pp.219-229.

Rotach, M.W., Vogt, R., Bernhofer, C., Batchvarova, E., Christen, A., Clappier, A., Feddersen, B., Gryning, S.E., Martucci, G., Mayer, H. and Mitev, V., 2005. BUBBLE—an urban boundary layer meteorology project. *Theoretical and Applied Climatology*, 81(3-4), pp.231-261.

Roth, M. and Oke, T.R., 1994. Comparison of Modelled and 'Measured' Heat Storage in Suburban Terrain. *Beitrage zur Physik der Atmosphere-Contributions to Atmospheric Physics*, 67(2), pp.149-156.

S

Sacadura, J.O., 1972. Influence de la rugosité sur le rayonnement thermique émis par les surfaces opaques: Essai de modèle. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 15(8), pp.1451-1465.

Sakuma, F., 1982. Establishing a Practical Temperature Standard by Using a Narrow-Band Radiation Thermometer with a Silicon Detector. *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry*, 5, pp.421-427.

Salamanca, F., Krpo, A., Martilli, A. and Clappier, A., 2010. A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations—part I. formulation, verification, and sensitivity analysis of the model. *Theoretical and applied climatology*, 99(3-4), p.331.

Santamouris, M., Papanikolaou, N., Livada, I., Koronakis, I., Georgakis, C., Argiriou, A. and Assimakopoulos, D.N., 2001. On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings. *Solar energy*, 70(3), pp.201-216.

Santamouris, M., 2014. Cooling the cities—a review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar energy*, 103, pp.682-703.

Schmid, H.P. and Oke, T.R., 1992. *Scaling North American urban climates by lines, lanes, and rows*. The Guildford Press: New York.

Sobrino, J.A., Mattar, C., Gastellu-Etchegorry, J.P., Jimenez-Munoz, J.C. and Grau, E., 2011. Evaluation of the DART 3D model in the thermal domain using satellite/airborne imagery and ground-based measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 32(22), pp.7453-7477.

Souch, C. and Grimmond, S., 2006. Applied climatology: urban climate. *Progress in physical geography*, 30(2), pp.270-279.

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 nighttime. *Physical review letters*, 120(10), p.108701.

Spencer, J.W., 1971. Fourier series representation of the position of the sun. *Search*, 2(5), p.172

T

Takagi, T. and Matsui, M., 1967. Spectral radiance of sky and terrain in the middle infrared region. *Journal of the Spectroscopical Society of Japan*, 3(16), pp.112-118.

Takebayashi, H. and Moriyama, M., 2007. Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. *Building and environment*, 42(8), pp.2971-2979.

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.

Taylor, T., Counsell, J. and Gill, S., 2013. Energy efficiency is more than skin deep: Improving construction quality control in new-build housing using thermography. *Energy and Buildings*, 66, pp.222-231.

Teitelbaum, E., Chen, K.W., Meggers, F., Guo, H., Houchois, N., Pantelic, J. and Rysanek, A., 2020. Globe thermometer free convection error potentials. *Scientific Reports*, 10(1), pp.1-13.

Tejedor, B., Casals, M., Gangoellis, M. and Roca, X., 2017. Quantitative internal infrared thermography for determining in-situ thermal behaviour of façades. *Energy and Buildings*, 151, pp.187-197.

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.

Titman, D.J., 2001. Applications of thermography in non-destructive testing of structures. *NDT & e International*, 34(2), pp.149-154.

U

Usamentiaga, R., Venegas, P., Guerediaga, J., Vega, L., Molleda, J. and Bulnes, F.G., 2014. Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing. *Sensors*, 14(7), pp.12305-12348.

V

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

Vollmer, M. and Möllmann, K.P., 2017. Infrared thermal imaging: fundamentals, research and applications. John Wiley & Sons.

Voogt, J.A. and Oke, T.R., 1997. Complete urban surface temperatures. *Journal of applied meteorology*, 36(9), pp.1117-1132.

Voogt, J.A. and Grimmond, C.S.B., 2000. Modeling surface sensible heat flux using surface radiative temperatures in a simple urban area. *Journal of Applied Meteorology*, 39(10), pp.1679-1699.

Voogt, J.A. 2002. Urban Heat Island. In Munn, T. (ed.) *Encyclopedia of Global Environmental Change*, Vol. 3. Chichester: John Wiley and Sons.

Voogt, J.A. and Oke, T.R., 2003. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote sensing of environment*, 86(3), pp.370-384.

W

Wang, D., Chen, Y., Cui, Y. and Sun, H., 2018. A geometric model to simulate urban thermal anisotropy for simplified neighborhoods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(8), pp.4930-4944.

Weng, Q., 2009. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(4), pp.335-344.

Y

Yap, D. and Oke, T.R., 1974. Sensible heat fluxes over an urban area—Vancouver, BC. *Journal of Applied Meteorology*, 13(8), pp.880-890.

Yin, T., Lauret, N. and Gastellu-Etchegorry, J.P., 2015. Simulating images of passive sensors with finite field of view by coupling 3-D radiative transfer model and sensor perspective projection. *Remote Sensing of Environment*, 162, pp.169-185.

Annexe : Procédures MATLAB®

Cette annexe comprend les fonctions MATLAB® utilisées pour reproduire les tests présentés dans ce travail.

HEMISPHERE_PARTITION.m

Hemi_equi_LMTV.m

inc.m

SPHERE_HDR.m

hdrDebevec.m

weightingFunction.m

SPHERE_IR.m

vect_pix.m

draw_mollweide.m

drawSky.m

drawSky_eq.m

drawSky_stereo.m

Perez_Sky_on_Beckers.m

solve_Kepler.m

SunPosition

read_EPW.m

Martin_Berdahl_on_Beckers.m

IR_FILTRE.m

newTemp.m

skyBrightToTemp.m

CameraPlankValues.m

TransAtmos.m.

CameraAtmosphericTransValues.m

prof_sky_temp.m

air_temp_matrix.m

findDistance.m

findIncidentAngle.m

findIntersection.m

findReflected.m

getEmi.m

HEMISPHERE_PARTITION.m

Cette procédure permet de projeter des données sur un hémisphère maillé selon la méthode proposée par [Beckers 2012].

Il s'agit du partitionnement de la voûte céleste basé sur un nombre de carreaux défini par l'utilisateur. Les carreaux ont le même angle solide et un rapport d'aspect proche de l'unité. Tous les carreaux sont délimités par des parallèles et des méridiens.

La procédure fait appel aux fonctions : Hemi_equi_LMTV.m, inc.m, drawSky.m
drawSky_eq.m et drawSky_stereo.m

```
%-----%
% HEMISPHERE_PARTITION allows to easily project data on a hemisphere.
%
%% The following MATLAB functions are required to run this code:
%
%     - Hemi_equi_LMTV.m
%     - inc.m
%
% This code generates 4 representations of the hemisphere.
% 3 MATLAB functions are used to project the hemisphere:
%
%     - drawSky.m (Interactive 3D / Orthographic projection if seen from
%       the zenith)
%     - drawSky_eq.m (Equivalent projection)
%     - drawSky_stereo.m (Stereographic projection)
%
% To project data on the partition, the number of values must correspond to
% the number of patches. The number of patches determines the final
% resolution.
%
% Reference:
%
% [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.
%
% Notes:
%
% *****
% | The order and direction of the patches is IMPORTANT. The first patch |
% | is at the zenith and for each of the following rings the partition   |
% | starts south and moves clockwise.                                     |
% *****
```

```

%-----%
%% Resolution selection

prompt = {'Enter custom resolution / number of patches:'};
dims = [1 55];
definput = {'145'};
answer = questdlg('Choose a resolution / number of patches', ...
    'Hemisphere Partition', ...
    'Low / 1000','Hi / 10 000','Custom','Custom');
switch answer
% Low Resolution (working)
    case 'Low / 3 000'
        disp('3 000 patches for hemisphere partition.')
        npatch = 3000;
% High Resolution (Presentaion)
    case 'Hi / 50 000'
        disp('50 000 patches for hemisphere partition.')
        npatch = 50000;
% Higher Resolutions are possible but they take longtime
    case 'Custom'
        % npatch: number of pachtes. MAY BE DEFINED by user, resolution of the final image
        npatch = double(string((inputdlg(prompt,'Hemisphere Partition',...
            dims,definput)))));
        disp(strcat(string(npatch),' patches for hemisphere partition.'))
end

%-----%

%% Hemisphere partition

% nucel: cumulated number of patches for each rings [1 x nrings], starting with
the zenith
nucel=inc(npatch);
% skymesh: zenithal angle [rad], azimuth (0:south) [rad] and solid angle [sr] of
every patch [npatch x 3]
% rzone: unitary vector pointing the center of every patch [npatch x 3]
[skymesh, rzone]=Hemi_equi_LMTV(nucel);

%-----%

%% Hemisphere's Data
Cdata=zeros(npatch,1);
% Data to plot on the hemisphere. Cdata must be npatch size.

%-----%

%% 3D Hemisphere

figure(); drawSky(Cdata,nucel,skymesh,'lat',...
    'Label',1,white);
colorbar 'delete';
set(gcf,'color','w')
view(0,45)

```

```
%-----%

%% Stereographic projection of the sphere

figure(); drawSky_stereo(Cdata,nucel,skymesh,'lat',...
    'Label',1,white);
colorbar 'delete';
set(gcf,'color','w')
title({'Stereographic Projection';' '})

%-----%

%% Equivalent projection of the sphere

figure(); drawSky_eq(Cdata,nucel,skymesh,'lat',...
    'Label',1,white);
colorbar 'delete';
set(gcf,'color','w')
title({'Equivalent Projection';' '})

%-----%

%% Orthographic projection of the sphere

figure(); drawSky(Cdata,nucel,skymesh,'lat',...
    'Label',1,white);
colorbar 'delete';
set(gcf,'color','w')
title({'Orthographic Projection';' '})
```

drawSky.m

```
function drawSky(Cdata,nucel,skymesh,lat,ylabel_fig,rep_mesh,...
    cmap,Cmin,Cmax)
hold on;
nan=size(nucel,2);
% Number of rings
vr=zeros(nan,1); disc_area=zeros(nan,1);

%% Computation of the radii of the equal area projection [Beckers 2013]
%-----%
a=2*pi/nucel(end);
% Hemisphere area
disc_area(1)=a;
% Zenithal patch area
for i=2:nan
    disc_area(i)=(nucel(i)-nucel(i-1))*a;
end
for i=1:nan
    vr(i)=sqrt(sum(disc_area(1:i))/pi);
end
```

```

%% Determination of the colatitud of the rings
%-----%
th=2*asin(vr(:)/2);

%% Angular discretization for the representation of the parallels
%-----%
aradians=(0:360)*pi/180;
x=sin(th(1))*cos(aradians);
% Zenithal patch representation
y=sin(th(1))*sin(aradians);
z=cos(th(1))*ones(size(aradians));
p=patch(x,y,z,0,'facecolor','flat','FaceVertexCData',Cdata(1),...
        'CDataMapping','scaled'); set(p,'EdgeColor','none');

Nptm=100;
% Nptm: number of intermediate points on the meridian
for ir=2:nan
    th1=th(ir); th2=th(ir-1);
% th1 & th2: limiting parallels of the ring
    Nc_ir=nucel(ir)-nucel(ir-1);
% Nc_ir: number of patches on the ring
    m_step=skymesh(nucel(ir),2)-skymesh(nucel(ir)-1,2);
% m_step: Angle step of the meridians of the ring

    for ic=1:Nc_ir
        m1=(ic-1)*m_step; m2=ic*m_step;
% m1 & m2: limiting meridians of the patch
        vm=(m1:(m2-m1)/Nptm:m2)';
        Pt=[-sin(th1)*sin(vm) -sin(th1)*cos(vm) cos(th1)*ones(size(vm))
            -sin(th2)*sin(vm) -sin(th2)*cos(vm) cos(th2)*ones(size(vm))];
% Upper vertices of the patch
% Lower vertices of the patch
        T3=[(1:Nptm)' (2:Nptm+1)' Nptm+1+(1:Nptm)'
            (2:Nptm+1)' Nptm+1+(1:Nptm)' Nptm+2+(1:Nptm)'];
        p=patch('faces',T3,'vertices',Pt,'facecolor','flat',...
            'FaceVertexCData',Cdata(nucel(ir-1)+ic),...
            'CDataMapping','scaled');
        set(p,'EdgeColor','none');
        if rep_mesh==1
            plot3([Pt(1:Nptm+1,1);Pt(end:-1:Nptm+2,1)],...
                [Pt(1:Nptm+1,2);Pt(end:-1:Nptm+2,2)], [Pt(1:Nptm+1,3);...
                Pt(end:-1:Nptm+2,3)], 'k');
        end
    end
end

hold off
axis equal; axis tight; axis off;

if nargin<7; end; colormap(cmap); colorbar('delete');
if nargin<8; Cmin=min(Cdata); Cmax=max(Cdata); end
if Cmin>=Cmax; Cmin=Cmax; end
if Cmin==Cmax; Cmin=Cmin-1; Cmax=Cmax+1; end

```

```

set(gca,'CLim',[Cmin,Cmax]);
ylabel(ylabel_fig,'FontSize',10);
c=colorbar('location','eastoutside');
c.Label.String=ylabel_fig; c.Label.FontSize=12;
c.Label.FontName='Calibri'; c.Label.Margin=5;
end

```

drawSky_eq.m

```

function drawSky_eq(Cdata,nucel,skymesh,lat,ylabel_fig,rep_mesh,...
    cmap,Cmin,Cmax)
hold on;
nan=size(nucel,2);
% Number of rings
vr=zeros(nan,1); disc_area=zeros(nan,1);

%% Computation of the radii of the equal area projection [Beckers 2013]
%-----%

a=2*pi/nucel(end);
% Hemisphere area
disc_area(1)=a;
% Zenithal patch area
for i=2:nan
    disc_area(i)=(nucel(i)-nucel(i-1))*a;
end
for i=1:nan
    vr(i)=sqrt(sum(disc_area(1:i))/pi);
end

%% Determination of the colatitud of the rings
%-----%

th=2*asin(vr(:)/2);

%% Angular discretization for the representation of the parallels
%-----%

aradians=(0:360)*pi/180;
x=2*sin(th(1)/2)*cos(aradians); %
Zenithal patch representation
y=2*sin(th(1)/2)*sin(aradians);
p=patch(x,y,0,'facecolor','flat','FaceVertexCData',Cdata(1),...
    'CDataMapping','scaled','EdgeColor','none');

Nptm=100;
% Nptm: number of intermediate points on the meridian
for ir=2:nan
    th1=th(ir); th2=th(ir-1);

```

```

% th1 & th2: limiting parallels of the ring
    Nc_ir=nucel(ir)-nucel(ir-1);
% Nc_ir: number of patches on the ring
    m_step=skymesh(nucel(ir),2)-skymesh(nucel(ir)-1,2);
% m_step: Angle step of the meridians of the ring

    for ic=1:Nc_ir
        m1=(ic-1)*m_step; m2=ic*m_step;
% m1 & m2: limiting meridians of the patch
        vm=(m1:(m2-m1)/Nptm:m2)';
        Pt=[-2*sin(th1/2)*sin(vm)  -2*sin(th1/2)*cos(vm)
% Upper vertices of the patch
            -2*sin(th2/2)*sin(vm)  -2*sin(th2/2)*cos(vm)];
% Lower vertices of the patch
        T3=[(1:Nptm)' (2:Nptm+1)' Nptm+1+(1:Nptm)'
            (2:Nptm+1)' Nptm+1+(1:Nptm)' Nptm+2+(1:Nptm)'];
        p=patch('faces' ,T3,'vertices',Pt);
        set(p,'facecolor','flat','FaceVertexCData',...
            Cdata(nucel(ir-1)+ic),'CDataMapping','scaled',...
            'EdgeColor','none')
        if rep_mesh==1; plot([Pt(1:Nptm+1,1);Pt(end:-1:Nptm+2,1)],...
            [Pt(1:Nptm+1,2);Pt(end:-1:Nptm+2,2)],'k');
        end
    end
end

hold off
axis equal; axis tight; axis off;

if nargin<7; end; colormap(cmap); colorbar('delete');
if nargin<8; Cmin=min(Cdata); Cmax=max(Cdata); end
if Cmin==Cmax; Cmin=Cmin-1; Cmax=Cmax+1; end
set(gca,'CLim',[Cmin,Cmax]);
ylabel(ylabel_fig,'FontSize',10);
c=colorbar('location','eastoutside');
c.Label.String=ylabel_fig; c.Label.FontSize=12;
c.Label.FontName='Calibri'; c.Label.Margin=5;

end

```

drawSky_stereo.m

```

function drawSky_stereo(Cdata,nucel,skymesh,lat,ylabel_fig,rep_mesh,...
    cmap,Cmin,Cmax)
hold on;
nan=size(nucel,2);
% Number of rings
vr=zeros(nan,1); disc_area=zeros(nan,1);
%% Computation of the radii of the equal area projection [Beckers 2013]
%-----%
a=2*pi/nucel(end);

```

```

% Hemisphere area
disc_area(1)=a;
% Zenithal patch area
for i=2:nan
    disc_area(i)=(nucl(i)-nucl(i-1))*a;
end
for i=1:nan
    vr(i)=sqrt(sum(disc_area(1:i))/pi);
end

%% Determination of the colatitud of the rings
%-----%
th=2*asin(vr(:)/2);

%% Angular discretization for the representation of the parallels
%-----%
aradians=(0:360)*pi/180;
x=tan(th(1)/2)*cos(aradians); %
Zenithal patch representation
y=tan(th(1)/2)*sin(aradians);
p=patch(x,y,0,'facecolor','flat','FaceVertexCData',Cdata(1),...
    'CDataMapping','scaled','EdgeColor','none');

Nptm=100; % Nptm:
number of intermediate points on the meridian
for ir=2:nan
    th1=th(ir); th2=th(ir-1); % th1 &
th2: limiting parallels of the ring
    Nc_ir=nucl(ir)-nucl(ir-1); %
Nc_ir: number of patches on the ring
    m_step=skymesh(nucl(ir),2)-skymesh(nucl(ir)-1,2); %
m_step: Angle step of the meridians of the ring

    for ic=1:Nc_ir
        m1=(ic-1)*m_step; m2=ic*m_step; % m1 &
m2: limiting meridians of the patch
        vm=(m1:(m2-m1)/Nptm:m2)';
        Pt=[-tan(th1/2)*sin(vm) -tan(th1/2)*cos(vm) % Upper
vertices of the patch
            -tan(th2/2)*sin(vm) -tan(th2/2)*cos(vm)]; % Lower
vertices of the patch
        T3=[(1:Nptm)' (2:Nptm+1)' Nptm+1+(1:Nptm)'
            (2:Nptm+1)' Nptm+1+(1:Nptm)' Nptm+2+(1:Nptm)'];
        p=patch('faces',T3,'vertices',Pt);
        set(p,'facecolor','flat','FaceVertexCData',...
            Cdata(nucl(ir-1)+ic),'CDataMapping','scaled',...
            'EdgeColor','none');
        if rep_mesh==1; plot([Pt(1:Nptm+1,1);Pt(end:-1:Nptm+2,1)],...
            [Pt(1:Nptm+1,2);Pt(end:-1:Nptm+2,2)],'k');
        end
    end
end
end

```

```

hold off
axis equal; axis tight; axis off;

if nargin<7; end; colormap(cmap); colorbar('delete');
if nargin<8; Cmin=min(Cdata); Cmax=max(Cdata); end
if Cmin==Cmax; Cmin=Cmin-1; Cmax=Cmax+1; end
set(gca,'CLim',[Cmin,Cmax]);
ylabel(ylabel_fig,'FontSize',10);
c=colorbar('location','eastoutside');
c.Label.String=ylabel_fig; c.Label.FontSize=12;
c.Label.FontName='Calibri'; c.Label.Margin=5;

end

```

Hemi_equi_LMTV.m

```

function [skymesh, rzone, lati_b_cell]=Hemi_equi_LMTV(nucl)

nan=size(nucl,2);           % number of sky rings
lat=zeros(nucl(nan),1);     % patch latitud
lon=zeros(nucl(nan),1);     % patch longitud
rzone=zeros(nucl(nan),3);   % patch direction

% plotting of meridian segments
vr=ones(nan,1);
for i=2:nan;
    vr(i)=vr(i-1)*sqrt(nucl(i)/nucl(i-1));
end
vr = vr/vr(nan);

hauteur = zeros(nan,1);
dis = ones(nan,1);
lati_b_cell = zeros(nan,1);
lati_cell = zeros(nan,1);

for i=1:nan;
    hauteur(i)=sqrt((1-vr(i)^2)^2/(2-vr(i)^2));
    dis(i)=sqrt(hauteur(i)^2+vr(i)^2);
    lati_b_cell(i)=(acos(vr(i)/dis(i))); % latitude of boundary
end

lati_cell(1)=0;
for i=1:nan-1;
    lati_cell(i+1)=(lati_b_cell(i)+lati_b_cell(i+1))/2;
end

ipoi=1;
for i=1:nan-1;
    nmerid=nucl(i+1)-nucl(i); % number of cells in 1 ring
    longi = -pi/nmerid;
    for j=1:nmerid;

```

```

        ipoi=ipoi+1;
        lat(ipoi)=lati_cell(i+1);
        longi=longi+2*pi/nmerid;
        lon(ipoi)=longi;
    end;
end;

% Display of cell latitudes and longitudes in radians
nmesh=size(lat,1);
AS = ones(nmesh,1)*(2*pi/nmesh); % Solid angle of each cell (assumed equal)
lat=pi/2-lat; lat(1)=0;
skymesh=[lat lon AS];

for iv=1:nmesh % loop on the vectors towards each tile
    lat = skymesh(iv,1);
    lon = skymesh(iv,2);
    vect = [-sin(lon)*sin(lat) -cos(lon)*sin(lat) cos(lat)];
    rzone(iv,:) = vect;
end

```

inc.m

```

function [nuce1] = inc(Ncell)
% Only data: Ncell - imposed number of cells of aspect ratio = 1
% Output: nuce1 vector - for each ring of the hemisphere the number of sky tiles
% of aspect ratio 1

tim1 = pi/2;
rim1 = 2*sin(tim1/2);

%idep = 145; %idep = 172; % idep = 400; % idep = 5000; % other input data
idep = Ncell; % Input data

cim1 = idep;
% Finding a tentative realistic number of rings
nring = floor(sqrt(idep));
ac = zeros(1,nring); as=zeros(1,nring); n=zeros(1,nring); % initializations
% nuce1 = zeros(1,nring); % initializations
nan = 0;
for i=1:nring;
    n(i) = cim1; % Number of cells in ring i
    ti = tim1-rim1*sqrt(pi/cim1);
    as(i) = 2*pi/idep/(ti-tim1)^2; % Aspect ratio on the sphere
    ri = 2*sin(ti/2);
    ac(i) = 2*pi/idep/(ri-rim1)^2; % Aspect ratio on the disk
    ci = round(cim1*(ri/rim1)^2);
    tim1 = ti;
    rim1 = ri;
    cim1 = ci;
% Forcing the presence of a central disk
    if cim1 == 2;
        cim1=1;
    end
end

```

```
        ci=1;
    end
    if cim1 == 0;
        cim1=1;
        ci=1;
    end
    if cim1 == 1;
        if nan ==0;
            nan=i+1;
        end
    end
    end
    kk=nan+1;
    for i=1:nan;
        kk=kk-1;
        nuce1(kk)=n(i);
    end
    % [ n(1:nan)' ac(1:nan)' as(1:nan)'] % intermediate results
    nuce1(1:nan); % Output - Final result
end
```

skyBrightToTemp.m

Cette fonction permet de corriger l'effet de la fenêtre atmosphérique lors des observations avec une caméra thermique en suivant la proposition de [Kruczek 2014].

```
function Tsky=skyBrightToTemp(Tbr,Tat)

h=6.626070040e-34; % constante de Planck [J.s]
kb=1.38064852e-23; % constante de Boltzmann [J/K]
c=299792458; % vitesse de la lumière [m/s]
sigma=5.67e-8; % Stefan-Boltzmann constant

Tat=Tat+273.15;
Tbr=Tbr+273.15;
lbd_r1=[4e-6 4.8e-6];
lbd_r2=[4.8e-6 7.5e-6];
lbd_r3=[7.5e-6 13e-6];
lbd_r4=[13e-6 100e-6];
lbd_step=10e-9;
i=0; L_T=zeros(size(Tbr,1),1);
% L_T_glo=zeros(size(Tbr,1),size(lbd_r1(1):lbd_step:lbd_r4(2),2));
for lbd=lbd_r1(1):lbd_step:lbd_r1(2)
    i=i+1;
    L_T_glo=2*h*c^2./lbd^5*1./(exp(h*c./(lbd*kb*Tbr))-1); % luminance
    monochromatique [w.m-2.sr-1.m-1]
    L_T=L_T+L_T_glo*lbd_step;
end
for lbd=lbd_r2(1):lbd_step:lbd_r2(2)
    i=i+1;
    L_T_glo=2*h*c^2./lbd^5*1./(exp(h*c./(lbd*kb*Tat))-1); % luminance
    monochromatique [w.m-2.sr-1.m-1]
    L_T=L_T+L_T_glo*lbd_step;
end
for lbd=lbd_r3(1):lbd_step:lbd_r3(2)
    i=i+1;
    L_T_glo=2*h*c^2./lbd^5*1./(exp(h*c./(lbd*kb*Tbr))-1); % luminance
    monochromatique [w.m-2.sr-1.m-1]
    L_T=L_T+L_T_glo*lbd_step;
end
for lbd=lbd_r4(1):lbd_step:lbd_r4(2)
    i=i+1;
    L_T_glo=2*h*c^2./lbd^5*1./(exp(h*c./(lbd*kb*Tat))-1); % luminance
    monochromatique [w.m-2.sr-1.m-1]
    L_T=L_T+L_T_glo*lbd_step;
end
Tsky=(pi/sigma*L_T).^(1/4)-273.15; % real sky temperature [°C]
end
```

newTemp.m

Cette fonction permet de retrouver le signal arrivé au capteur et de traiter chaque pixel d'une thermographie. Cette fonction en utilise deux autres :

CameraPlankValues.m et TransAtmos.m.

Cette dernière appelle : CameraAtmosphericTransValues.m

```
function newTemp(fname,E_ob,T_amb,T_atm,HR,dist)

% HR=input('Input measured relative humidity [%] ');
%RELATIVE HUMIDITY
% dist=input('Input distance with observed object [m] ');
%DISTANCE TO OBJECT
% T_atm=input('Input atmospheric temperature [°C] ');
%ATMOSPHERIC TEMPERATURE [K]
% T_amb=input('Input ambient temperature [°C] ');
%ATMOSPHERIC TEMPERATURE / REFLECTED TEMPERATURE [K]
% E_ob=input('Input object emissivity value [0-1] ');
%OBJECT'S EMISSIVITY VALUE

[R1,B,F,O,R2]=CameraPlankValues('EXIF.jpg');%edited_FLIR0571 'EXIF.jpg'

TT_atm=TransAtmos(dist,HR,T_atm);

s_ob=R1./(R2.*(exp(B./(fname+273.15))-F))-O;
%signal from objects temperature
S_amb=R1./(R2.*(exp(B./(T_amb+273.15))-F))-O;
%signal from ambient temperature
S_atm=R1./(R2.*(exp(B./(T_atm+273.15))-F))-O;
%signal from air temperature
new_s_ob=s_ob./(E_ob.*TT_atm)-(((1-E_ob)./E_ob).*S_amb...
    +((1-TT_atm)./(E_ob.*TT_atm)).*S_atm);
%Calculates new signal values based on user set parameters
new_T_ob=(B./log(R1./(R2.*(new_s_ob+O))+F)-273.15);
%Calculates new object's temperature from signal
end
```