



HAL
open science

Approches physiques de création d'îlots de fraîcheur urbains : application à des cours d'écoles Parisiennes

Ghid Karam

► **To cite this version:**

Ghid Karam. Approches physiques de création d'îlots de fraîcheur urbains : application à des cours d'écoles Parisiennes. Physique Atmosphérique et Océanique [physics.ao-ph]. Université Paris Cité, 2023. Français. NNT : 2023UNIP7014 . tel-04395918

HAL Id: tel-04395918

<https://theses.hal.science/tel-04395918v1>

Submitted on 15 Jan 2024

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

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



Université Paris Cité
Ecole Doctorale **Physique en Île-de-France 564**
Laboratoire Interdisciplinaire des Energies de Demain
UMR CNRS 8236

**Approches physiques de création d'îlots de fraîcheur
urbains :
Application à des cours d'écoles parisiennes**

Réalisée par **GHID KARAM**

Thèse de Doctorat en
Physique

Soutenue le 01/06/2023

| | | |
|------------------|--|-------------------|
| MASSON VALÉRY | ICPEF, CNRS-MÉTÉO-FRANCE | Rapporteur |
| MUSY MARJORIE | DIRECTRICE DE RECHERCHE, CEREMA OUEST | Rapporteuse |
| LASSUE STÉPHANE | PROFESSEUR, UNIVERSITÉ D'ARTOIS | Président du jury |
| LECONTE FRANÇOIS | MAÎTRE DE CONFÉRENCE, UNIVERSITÉ DE LORRAINE | Invité |
| ROYON LAURENT | PROFESSEUR, UNIVERSITÉ PARIS CITÉ | Directeur |
| HENDEL MARTIN | PROFESSEUR ASSOCIÉ, ESIEE PARIS | Encadrant, invité |

Titre : Approches physiques de création d'îlots de fraîcheur urbains : Application à des cours d'écoles Parisiennes

Résumé : Le dérèglement climatique sera à l'origine de vagues de chaleur plus fréquentes, plus intenses et de plus longue durée à l'horizon 2050. Ces épisodes caniculaires sont amplifiés par les phénomènes d'îlots de chaleur urbains (ICU) qui sont liés à différents paramètres de la ville : végétation, albédo et imperméabilité des matériaux, densité et morphologie. Dans le cadre de sa Stratégie de Résilience et du Plan Climat adoptés en 2017, la Ville de Paris met en place de stratégies de rafraîchissement qui visent à diminuer les conséquences sanitaires des événements extrêmes, renforcer le lien social, et atteindre les objectifs de sobriété énergétique. Le programme Oasis vise à créer un maillage d'îlots de fraîcheur à partir de la transformation des cours d'écoles parisiennes en espaces débitumés et végétalisés. Le programme prévoit d'avoir transformé l'ensemble du parc scolaire parisien à l'horizon 2050. Dans le cadre du projet FEDER UIA OASIS porté par la Ville de Paris, 10 cours pilotes font l'objet d'un suivi scientifique interdisciplinaire visant à informer la suite du programme. Cette thèse porte sur l'évaluation thermique et microclimatique des 10 cours pilotes, en particulier en termes d'amélioration du stress thermique des enfants et de lutte contre l'îlot de chaleur urbain. Pour cela, différentes approches et échelles d'analyse sont mobilisées croisant notamment outils d'aide à la décision ou à la conception à l'échelle d'une cour, mesures microclimatiques fixes et mobiles in situ ainsi qu'expérimentations en laboratoire de caractérisation de revêtements. A l'échelle du laboratoire, le comportement thermique des structures de revêtement des cours d'écoles est caractérisé dans des conditions similaires à celles d'une vague de chaleur parisienne. Les résultats obtenus permettent d'éclairer et de discuter les choix de revêtements effectués au sein des cours OASIS au regard de l'objectif de réduction du stress thermique et d'atténuation d'ICU. A l'échelle du terrain, un réseau de mesure de 19 stations météorologiques est déployé dans Paris intra-muros pour l'évaluation de l'impact microclimatique des transformations des cours observées en 2019 (avant travaux) et 2022 (après travaux). Une méthode d'analyse statistique est utilisée pour déterminer les effets microclimatiques de la transformation de chaque cour pilote. Un prétraitement est proposé pour améliorer la qualité des analyses microclimatiques lorsqu'il y a des variations d'ensoleillement significatives au cours de la période de mesure. En complément, un protocole de mesures mobiles couplé aux mesures fixes est appliqué aux dix cours pilotes visant à mettre en évidence les variations spatiales du stress thermique des usagers pouvant exister au sein d'une même cour. La méthodologie tient compte des variations météorologiques à différents horizons temporels. Outre les mesures expérimentales, un diagnostic préliminaire est réalisé

en amont de la sélection des cours pilotes visant à identifier les cours parisiennes les plus minérales et exposées aux apports solaires directs. Par la suite, cette analyse est affinée comme indicateur de l'accumulation de chaleur par les cours par temps anticyclonique, appelé indicateur de potentiel de rafraîchissement. Il est utilisé pour l'aide à la conception, afin d'optimiser les projets de transformation des cours. Cet indicateur peut être croisé avec des données socio-économiques dans le cadre d'analyses de vulnérabilité à la chaleur. Ces différentes approches d'évaluation sont comparées et discutées. Les données obtenues par le réseau de stations OASIS a permis de créer une base de données météorologiques couvrant plus de 3 années qui pourront nourrir de futures études microclimatiques tout aussi bien expérimentales que numériques.

Mots-clés : Adaptation au changement climatique, Rafraîchissement urbain, évaluation microclimatiques, îlot de chaleur urbain, stress thermique, matériaux, SIG.

Title : Urban cooling islands as a heat mitigation strategy : A case study in Parisian schoolyards

Abstract : In addition to the increase in average annual temperatures, climate change will cause more frequent, intense and longer-lasting heatwaves by 2050. These heat waves are amplified by the phenomena of urban heat islands (UHIs), which are linked to the city properties : centrality of spaces, mineralogy, imperviousness, and building density. As part of its Climate Plan and resilience strategy adopted in 2017, the City of Paris is implementing sustainable cooling strategies that aim to reduce the health consequences of extreme events, strengthen social ties, and decrease energy demands. The OASIS project thus aims to create a network of urban cool islands that would benefit surrounding neighborhoods with schoolyards offering increased vegetation fractions, unsealed soils and nature-based designs. This manuscript focuses on the implementation of a thermal and microclimatic evaluation protocol for the transformation of 10 schoolyards, the monitoring of which was co-financed by the UIA initiative of the European Regional Development Fund. First, the implementation of a network of 19 fixed meteorological stations at the scale of the Paris metropolis is presented, as well as the field data collected between 2019 and 2022. A statistical analysis method is used to determine the microclimatic effects of schoolyard transformations. This method is refined to account for synoptic weather conditions change across time. To complement fixed measurements, a mobile measurement protocol is developed. The methodology is applied to the corpus of ten instrumented schoolyards, and allows to map the thermal stress within the school at the meter scale. The methodology takes into account the synoptic changes from one year to another. In addition, a laboratory experiment is used to assess the thermal performance of schoolyard paving structures under heatwave like conditions. The samples undergo a 24-hour cycle and are equipped with surface and depth temperature and heat flux captors. The results obtained allow to discuss the relevance of OASIS schoolyard paving solutions with regard to thermal stress improvement and UHI mitigation. The last part of this manuscript deals with the preliminary phase of the project. A GIS indicator is developed in order to identify the priority schoolyards. Out of 670 facilities, we identified 38 schoolyards with a high cooling potential. This indicator is a decision making support tool based on physical parameters, which can be cross-referenced with a socio-economic information. The obtained cooling potential maps are confronted with field results. This work aims to develop a methodology for assessing the impact of work that span through years, taking into account the difficulties of the field and the synoptic conditions. The method is implemented within the framework of the ERDF UIA OASIS project in

10 pilot schoolyards and is intended to be disseminated to other cities and communities. Prior to the project, a decision-making GIS tool was developed in order to prioritize urban cooling interventions. The establishment of a 19 weather stations network across the Parisian metropolis provides a meteorological database on a microclimatic scale covering more than 3 summers. This field data will be the basis for future microclimatic studies, both experimental and numerical.

Keywords : climate change adaptation, heat mitigation strategies, microclimatic assessment, Urban Heating Island, thermal comfort, GIS, material

Remerciements Ce manuscrit condense des travaux de thèse entamés en février 2019 qui se sont terminés par une soutenance en juin 2023. Ces années ont été marquées par la pandémie de COVID et l’explosion du port de Beyrouth. Mes remerciements seront à l’image de cette période : chaotiques.

Je commencerai par remercier Laurent et Martin de m’avoir accueillie au sein de l’équipe CEMU du LIED, d’abord pour un stage en géomatique, puis de m’avoir donné l’opportunité de travailler sur le projet FEDER OASIS, et tout le lot d’activités connexes : collaborations, colloques, conférences, séminaires... Même si je ne maîtrise toujours pas la technique du café de la machine italienne barista-friendly, je ressors de ces 4 années avec un bilan de formation très positif, notamment des capacités de stand-up en présentations orales décuplées et un permis biporteur-tripporteur très utile pour cartographier et silloner les îlots d’intérêts de Paris. Je remercie par là même Patricia Bordin et Brice Tréméac qui, au cours des différents comités de suivi, m’ont rassurée sur la pertinence des travaux et leur apport scientifique.

Je remercie mes rapporteurs Valéry Masson et Marjorie Musy, ainsi que mes examinateurs, Stéphane Lassue, et François Leconte pour avoir accepté de faire partie de mon jury, pour la relecture de mon manuscrit, ainsi que pour les échanges et discussions qui ont suivi.

Je souhaite aussi remercier l’ensemble du consortium FEDER OASIS avec qui il m’a été donné de collaborer. L’équipe de ESIEE Paris notamment Marie-Laure Lequeux, les directeurs et directrices d’écoles, l’équipe du CAUE 75, les différentes équipes de la ville, et en particulier Raphaëlle Thiollier, coordinatrice du projet. Je souhaite de même remercier l’atelier Deleusseux, SLG et Captec ainsi que le LEP en particulier Céline et Jérôme.

Le LIED est un très beau labo, qui s’est donné pour mission de favoriser l’interdisciplinarité. J’y ai eu l’occasion de côtoyer des géographes, des économistes, des biologistes, des éco-physiologistes, des historiens, des sociologues et des physiciens, lors de journées et de séminaires internes. Une pensée particulière pour Petros et Eric qui organisaient ces séminaires et avec qui j’ai pu discuter (et manifester) de l’avenir de la recherche, et à Lucille avec qui nous avons essayé de « cramer des plantes » en toute rigueur scientifique (désolée pour les plants de tomates, j’avais oublié qu’ils ne résistaient pas à l’eau bouillante). Je souhaite aussi remercier Catherine et Fred pour leur présence et leur aide au quotidien. Je continuerai de suivre de près et de loin les aventures de ce labo, en espérant que les thématiques de recherche puissent toujours susciter l’intérêt de chercheurs de tous bords, pour répondre aux problématiques de la question climatique, par essence interdisciplinaire.

Le laboratoire ne fonctionne pas sans les non-permanents qui sont les forces vives de la recherche. Je remercie tous les doctorants et post docs avec qui j’ai passé de bons moments

en présentiel et en distanciel : Les blinks test du confinement avec Philippe, les (rares, mais intenses) cours de Horton avec Melina, les surenchères de jeux de mots avec Valentin, les chroniques de l'or noir de Jean-Louis et tant d'autres. J'ai une pensée affectueuse pour Marie-Cécile et Francesca du LIED avec qui nous avons beaucoup échangé sur les affres de la recherche, de l'interdisciplinarité et de la vie, de la suprématie des fromages italiens et des intrications entre arts et science. Je remercie particulièrement ma découverte de thèse préférée : Rémy, post-doc malicieux qui est très rapidement devenu un ami précieux. Pensée particulière à tous mes compagnons de galère de l'équipe CEMU. Je commence par la doyenne des doctorant.e.s, Sophie, avec qui j'ai pu monter mes premières stations météo, mesurer des albédos de feuille de lierre, chercher des rats-laveurs au Canada, et discuter féminisme sur fond de Cardi B. Chaumont, le co-thésard amateur de débats enflammés et de gastronomie, Frère, roi du code et des défis dessins, Maxence, la chillitude incarnée, et Mailys, sans qui les étés 2019, 2020, 2021, et 2022 auraient été de longues traversées du désert sans mirage d'Oasis pour se consoler. Je pose ici en vrac des souvenirs estivaux de mare aux pigeons imprévue, de roversé, de station tour de Pise, de virées à vélib et de matcha de rédac. Au cours de ces étés, j'ai eu l'opportunité d'encadrer des stagiaires, qui m'ont épaulée lors des mesures de terrain. Pensée particulière à Nejma, Jeanne et Thomas qui ont grandement contribué aux travaux exposés dans ce manuscrit.

Au delà du labo, je souhaite remercier les personnes qui m'ont accompagnée et soutenue pendant les montagnes russes de la thèse. Merci à Roxane, qui a partagé mon goût pour la recherche depuis le collège, du Liban au Québec. Merci au noyau dur de la prépa, Pierre, Nassim, Thierry, Gabriel, et surtout France et Axelle, soutien moral de fer dans des gants de velours. Merci au cercle PC1 et affiliés : Antoine, Simon, Vincent, Romaine, avec qui j'ai craqué, Laetitia, Clotilde, Florence, Cecilia, avec qui j'ai craqué, et tous les autres... avec qui j'ai craqué aussi. Nous étions beaucoup à faire des thèses, et l'union dans l'adversité n'a fait que renforcer nos amitiés. Merci au cercle mino-polytechnicien, en particulier à Solène, compagne de la danse, à Louise et Solenne G, qui m'avez beaucoup écoutée lors des derniers mois. Merci à l'équipe des restos du coeur du Mercredi, Marc, Letizia, Mickaela, Pierre, Elise, Quentin (le meilleur - et en plus il est partout), Maher, Maximilien, et tous les autres. Les distributions du mercredi étaient un phare dans la nuit des incertitudes. Autre repère de ces années, les cours de danse avec Tiphaine, Maxime et Jens, véritable planche de salut du confinement et de la rédaction.

Le confinement revient souvent, et pour cause, il fut longtemps présent. C'est l'occasion de se remémorer les 54 (si le compte est bon) premiers jours passés dans un périmètre de

10 Km de Cachan. Une pensée affectueuse aux voisins de Cachan, Joseph, Déo, Juliette la coloc-Arcueil-Arak. À mes meilleurs voisins qui m'ont initiée à la randonnée et aux sorties réglementaires, Maxime et Aliénor, merci pour tout. Enfin, à celles et ceux dont j'ai partagé le canapé, les pâtes, les plantes, à qui j'ai imposé l'ail et l'oignon à tous les repas, avec qui j'ai réfléchi, ri, pleuré, crisé, crié, bu de la tisane et du café, Gauthier et Camille. Une pensée pour Clara avec qui j'ai entamé la dernière année de thèse et la dernière année à Cachan, mangé des lasagnes et regardé des séries d'anthologie.

Et comme on dit chez nous, Misk al Khitam. Je remercie ma famille sans qui rien n'eut été possible. Ma famille de France, Nadette, Jad, Tatevik, Jeff, Joelle, Joris, Ramez et Marie. Au Liban, Samar et Ohaila. Mon père, ma mère, ma soeur, qui ont traversé des étés plus éprouvants que mille canicules, mais ont toujours veillé à ce que je sois bien entourée, motivée, requinquée, malgré la distance. Enfin, la personne qui m'a aidé à traverser les derniers mètres, au moment où je désespérai de voir la lumière au bout du tunnel. À mon mécène, soutien financier et moral, avocat du diable mais ange gardien de la rédac, mon grand petit frère, Farid, Merci.

Table des matières

| | |
|---|--------------|
| Table des matières | xii |
| Liste des Figures | xvi |
| Liste des Tableaux | xviii |
| Acronymes | xix |
| Glossaire | xxi |
| 1 Introduction | 1 |
| 2 État de l’art | 7 |
| 2.1 Introduction à la climatologie urbaine | 8 |
| 2.1.1 Les échelles du climat urbain | 8 |
| 2.1.2 ICU et vagues de chaleur | 11 |
| 2.1.3 Bilans thermiques en ville | 13 |
| 2.2 Stress thermique en milieu urbain | 17 |
| 2.2.1 Bilan radiatif du piéton en milieu urbain | 17 |
| 2.2.2 Indicateurs de stress thermique | 20 |
| 2.3 Stratégies de rafraîchissement urbain | 24 |
| 2.3.1 Solutions grises | 25 |
| 2.3.2 Solutions basées sur la nature | 27 |
| 2.4 Évaluation du rafraîchissement | 30 |
| 2.4.1 Simulations | 32 |
| 2.4.2 Mesures fixes | 33 |
| 2.4.3 Mesures mobiles | 34 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 2.5 | Services climatiques | 35 |
| 2.5.1 | Données du climat urbain | 36 |
| 2.5.2 | Outils pour l'aide à la décision | 37 |
| 3 | Evaluation thermo-climatique des matériaux de revêtement des cours OASIS | 41 |
| 3.1 | Matériel et méthodes | 42 |
| 3.1.1 | Bilan thermique de la couche de surface d'un revêtement | 42 |
| 3.1.2 | Instrumentation en laboratoire | 45 |
| 3.1.3 | Mesure d'albédo | 50 |
| 3.2 | Résultats | 52 |
| 3.2.1 | Températures de surface | 52 |
| 3.2.2 | Températures en profondeur | 54 |
| 3.2.3 | Flux de chaleur | 56 |
| 3.2.4 | Impacts microclimatiques | 58 |
| 3.3 | Conclusion | 62 |
| 4 | Evaluation microclimatique continue dans le temps par mesures fixes | 65 |
| 4.1 | Matériel et méthodes | 66 |
| 4.1.1 | Réseau OASIS | 66 |
| 4.1.2 | Analyse statistique | 72 |
| 4.2 | Cas d'étude : L'école maternelle Tandou | 78 |
| 4.2.1 | Profil interstation moyen | 80 |
| 4.2.2 | Impacts microclimatiques $I_{x_1,OASIS}$ | 82 |
| 4.2.3 | Prétraitement des masques solaires | 89 |
| 4.2.4 | Résultats | 94 |
| 4.3 | Résultats généraux et discussion | 99 |
| 4.3.1 | Impact microclimatique des travaux OASIS au sein des cours pilotes | 99 |
| 4.3.2 | Augmentation du nombre d'observations par extension de la période de mesure | 102 |
| 4.4 | Conclusion | 105 |
| 5 | Evaluation microclimatique continue dans l'espace par mesures mobiles | 109 |
| 5.1 | Matériel et méthodes | 110 |
| 5.1.1 | Instruments et protocole d'observation | 110 |
| 5.1.2 | Indicateurs climatiques | 112 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.2 | Cas d'étude : EM M. Hilsz | 116 |
| 5.2.1 | Résultats | 121 |
| 5.3 | Discussion et perspectives | 130 |
| 5.3.1 | Protocole de mesure et d'observation | 130 |
| 5.3.2 | Effet de l'albédo et de la végétation sur le stress thermique | 132 |
| 5.4 | Conclusion | 132 |
| 6 | Description du stress thermique à l'échelle du piéton : Indicateur de Potentiel de Rafraîchissement | 135 |
| 6.1 | Méthodologie | 137 |
| 6.1.1 | Approche géomatique de l'indicateur de potentiel de rafraîchissement | 137 |
| 6.1.2 | Implémentation géomatique | 141 |
| 6.1.3 | Expression de l'indicateur de potentiel de rafraîchissement | 145 |
| 6.1.4 | Cas d'étude : groupe scolaire M. Hilsz | 148 |
| 6.2 | Résultats et discussions | 153 |
| 6.2.1 | Confrontation entre mesures mobiles et IPR | 154 |
| 6.2.2 | IPR et échanges radiatifs | 156 |
| 6.3 | Conclusion | 159 |
| 7 | Conclusion | 161 |
| 7.1 | Une méthodologie d'évaluation à différentes échelles | 162 |
| 7.1.1 | Évaluation des matériaux à l'échelle du laboratoire | 163 |
| 7.1.2 | Évaluation des travaux OASIS à l'aide d'un réseau de stations fixes : un suivi continu dans le temps. | 163 |
| 7.1.3 | Évaluation des travaux OASIS à l'aide de mesures mobiles : un suivi continu dans l'espace. | 165 |
| 7.1.4 | L'indicateur de potentiel de rafraîchissement pour le diagnostic climatique | 166 |
| 7.2 | Discussions et perspectives | 167 |
| 7.2.1 | Evaluation du comportement thermoclimatique des matériaux : du laboratoire au terrain. | 168 |
| 7.2.2 | Impacts microclimatiques : limite, enseignements, effet d'échelle . | 169 |
| 7.2.3 | Au-delà de l'impact local | 170 |
| 7.3 | Perspectives générales | 171 |
| 7.3.1 | Un nouveau paradigme pour les données du climat urbain | 172 |

| | | |
|----------------|---|------------|
| 7.3.2 | Les métadonnées du climat urbain : articulation techno-politique . | 173 |
| Annexes | | 175 |
| A | Impact microclimatique des travaux de rénovation au sein des cours pilotes | |
| | OASIS | 177 |

Table des figures

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Une station de métro à Paris inondée en août 2022 après des pluies diluviennes. Source : Twitter/Clément Parrot | 3 |
| 1.2 | À gauche, logo du projet OASIS : Openness, Adaptation, Sensitisation, Innovation and Social ties. A droite, partenaires du consortium FEDER UIA OASIS | 4 |
| 2.1 | Échelles du climat urbain, d'après Leroyer (2006). La CLA correspond à la Couche Limite Atmosphérique, tandis que la CLU correspond à la Couche Limite Urbaine. | 9 |
| 2.2 | D'après Stewart and Oke (2012), classification en Zones Climatiques Locales (source Cordeau et al. (2015)). | 11 |
| 2.3 | D'après Park et al. (2017), représentation conceptuelle du SVF pour un point d'observation dans un site urbain. À gauche, la ligne orange relie les bâtiments obstruant l'horizon du point d'observation. À droite, le graphe polaire illustre le SVF projeté sur un plan. Le cercle extérieur représente l'horizon pour une surface libre. L'horizon local relie quant à lui les bordures des obstructions. Il s'agit de la ligne orange. | 11 |
| 2.4 | Profil de la température de l'air à 2 m simulée pour une nuit de canicule typique de l'été 2003. D'après Météo France et le CAUE. | 12 |
| 2.5 | Bilan énergétique d'une surface. | 14 |
| 2.6 | Bilan thermique d'un volume urbain, d'après Hendel (2020). | 16 |
| 2.7 | D'après Parison (2020), bilan thermique d'un être humain. M correspond à l'activité métabolique. | 18 |
| 2.8 | D'après Parison (2020), bilan thermique appliqué à un thermomètre à globe. Les flux de chaleurs gagnés et perdus par le globe sont isotropes. Les températures sont exprimées en Kelvins | 19 |

| | | |
|------|---|----|
| 3.1 | Bilan thermique de la couche de surface d'un matériau d'épaisseur dz | 43 |
| 3.2 | Dispositif expérimental (d'après Hendel et al. (2018)). | 45 |
| 3.3 | Irradiance spectrale du rayonnement solaire global horizontal AM 1.5 et de la lampe halogène dans la bande spectrale 200-1700 nm (d'après Hendel et al. (2018)). | 46 |
| 3.4 | Structures de revêtement. | 47 |
| 3.5 | Schéma représentant le bilan thermique de surface d'un revêtement (d'après Parison et al. (2020a)). | 48 |
| 3.6 | Températures de surface. | 53 |
| 3.7 | Températures mesurées à 6 cm de profondeur. | 55 |
| 3.8 | Températures mesurées à 14 cm (gauche) et 25 cm (droite) de profondeur. | 56 |
| 3.9 | Flux de chaleur mesurés à 6 cm et 14 cm de profondeur au sein des différents échantillons sur un cycle de 24h en enceinte climatique. | 57 |
| 3.10 | Comparaison des termes convectifs nocturne et diurne pour chaque matériau. | 58 |
| 3.11 | Radiosité cumulée des matériaux au courtes et grandes longueur d'onde. | 60 |
| 4.1 | Plan des stations météorologiques OASIS. | 67 |
| 4.2 | Schéma d'une station météo fixe. | 68 |
| 4.3 | Site Maryse Hilsz | 69 |
| 4.4 | Méthodologie BACI | 72 |
| 4.5 | Échantillonnage BACI | 74 |
| 4.6 | Modèle linéaire mixte | 75 |
| 4.7 | Aménagement du site Tandou | 79 |
| 4.8 | Profil moyen de vent mesuré à la paire de stations du site Tandou à l'été 2021 | 80 |
| 4.9 | Profil interstation moyen établi sur la base des journées de référence 2019 sur le site Tandou pour la température de l'air (a), l'humidité absolue (b), la charge radiante (c), l'UTCI (d), le rayonnement net (e) et la vitesse du vent (f). L'heure est indiquée en temps local (UTC + 2). | 81 |
| 4.10 | Impact microclimatique des travaux OASIS sur les grandeurs observées | 84 |
| 4.11 | Rayonnement net enregistré à Tandou par les stations météo témoin et d'étude sur différentes journées radiatives de l'été, attribuables uniquement aux variations d'ombrage. | 85 |
| 4.12 | Diagramme solaire | 87 |
| 4.13 | Ensoleillement et profils moyens | 88 |

| | | |
|------|---|-----|
| 4.14 | Trajectoire diurne du Soleil pour les solstices et les équinoxes dans l'hémisphère nord. | 89 |
| 4.15 | Tableau logique de l'état d'ensoleillement d'une paire de stations d'un site donné. | 90 |
| 4.16 | Charge radiante (gauche) et binarisation de celle-ci (droite) pour les stations d'étude (haut) et témoin (bas) du site Tandou en période P1. | 92 |
| 4.17 | Profil binarisé d'ensoleillement | 93 |
| 4.18 | Impact microclimatique des travaux OASIS sur la température de l'air, l'humidité absolue, la charge radiante et l'UTCI après application du filtre de masques solaires. | 94 |
| 4.19 | Impact microclimatique des travaux OASIS sur la température de l'air (a), l'humidité absolue (b), la charge radiante (c) et l'UTCI (d) après travaux avec un été supplémentaire (2022). | 96 |
| 4.20 | Ensoleillement mensuel à Paris | 103 |
| 4.21 | Courbe d'ensoleillement de la paire de stations du site Tandou le 1 ^{er} avril 2020. | 104 |
| 5.1 | Schéma des stations fixes et mobiles. | 111 |
| 5.2 | Carte de chaleur de la surchauffe UTCI | 114 |
| 5.3 | Groupe scolaire Maryse Hilsz | 116 |
| 5.4 | Emplacement des paires de stations fixes pour le site Hilsz. | 117 |
| 5.5 | Évolution des paramètres au sein de la cour | 118 |
| 5.6 | Points de mesure | 120 |
| 5.7 | Photo des points de mesure | 121 |
| 5.8 | Écart des différents paramètres microclimatiques mesurés entre la station EM M. Hilsz et la station EE Keller en 2019. Les bandes bleues et vertes représentent les périodes de mesures mobiles avant (2020) et après (2021) travaux qui seront exploitées. | 122 |
| 5.9 | Cartographie de la surchauffe atmosphérique | 123 |
| 5.10 | Cartographie de la surcharge radiante | 125 |
| 5.11 | Cartographie de la suppression de vapeur d'eau | 127 |
| 5.12 | Cartographie de la surchauffe UTCI | 129 |

| | | |
|------|--|-----|
| 6.1 | Représentation schématique des échanges thermiques entre un piéton, la voûte céleste, l'air (couche de canopée urbaine), le bâti, la végétation haute et basse, le sol et l'air de la couche de surface, par mode d'échange thermique. Les segments qui en croisent d'autres sont représentés en pointillés pour une meilleure lisibilité. | 138 |
| 6.2 | Représentation schématique simplifiée des échanges thermiques retenus pour l'IPR entre un piéton, la voûte céleste, l'air de la canopée urbaine, le bâti, la végétation haute et basse, le sol et l'air de la couche de surface, par mode d'échange thermique. Les liaisons et les modes négligés sont en gris clair. | 140 |
| 6.3 | Modélisation géomatique des échanges thermiques. | 141 |
| 6.4 | Modélisation géomatique d'un arbre. | 143 |
| 6.5 | Cartographie de l'IPR | 149 |
| 6.6 | Circuits de mesures mobiles reportés sur la cartographie d'IPR des cours EE et EM M. Hilsz avant (haut) et après (bas) travaux. | 150 |
| 6.7 | Variations de l'IPR suite aux travaux de rénovation des cours EE et EM M. Hilsz. | 153 |
| 6.8 | Stress thermique relatif mesuré sur site lors de balades thermiques en fonction de la valeur moyenne de l'IPR au même point. | 155 |
| 6.9 | Valeurs d'albédo associées aux stress thermiques relatifs mesurées pour les points ensoleillés de type minéral. | 157 |
| 6.10 | prise en compte de l'arbre en un point de mesure de l'école Octave Gréard. | 158 |
| 7.1 | Réseau de stations météo LUTECE | 172 |
| A.1 | Collège Pierre Alviset | 178 |
| A.2 | Collège Octave Gréard | 179 |
| A.3 | Élémentaire Keller | 180 |
| A.4 | Élémentaire Jeanne D'Arc | 181 |
| A.5 | Maternelle Jean Dolent | 182 |
| A.6 | Maternelle Emériaux | 183 |
| A.7 | Élémentaire Maryse Hilsz | 184 |
| A.8 | Maternelle Maryse Hilsz | 185 |

Liste des tableaux

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | D'après Nazarian et al. (2022) , différentes échelles d'observation et méthodologies associées pour l'évaluation de la surchauffe urbaine | 31 |
| 2.2 | Stratégies et actions pour l'amélioration du climat urbain, d'après Ren et al. (2011) . L'objectif est d'atténuer l'effet d'îlot de chaleur urbain, d'améliorer la ventilation urbaine, la qualité de l'air et le confort thermique. | 36 |
| 3.1 | Caractéristiques des phases diurnes et nocturnes en enceinte climatique. | 46 |
| 3.2 | Bilan radiatif typique d'une ville de moyenne latitude d'une population d'un million d'habitants sous un ciel clair en été avec des vents faibles. | 47 |
| 3.3 | Propriétés des capteurs thermiques utilisés pour l'instrumentation des échantillons. | 49 |
| 3.4 | Rayonnement de courte et grande longueur d'onde reçu par les échantillons dans l'enceinte climatique. | 50 |
| 3.5 | Albédos calculés pour les matériaux testés en enceinte. | 51 |
| 4.2 | Paramètres mesurés et instrumentation des stations fixes. Les instruments sont fabriqués par LSI Lastem | 68 |
| 4.4 | Nombre de jours d'observation par site d'étude. | 76 |
| 4.1 | Date d'installation de la paire de station OASIS et des périodes de travaux au sein des cours OASIS durant lesquelles les stations ont été déposées. | 77 |
| 4.3 | Caractéristiques du réseau de stations d'observation. | 77 |
| 4.5 | Nombre de jours radiatifs retenus sur le site Tandou | 78 |
| 4.6 | Synthèse de l'analyse statistique pour la température de l'air pour les différents jeux de données bruts et filtrés | 97 |
| 4.7 | Synthèse de l'analyse statistique pour l'humidité absolue pour les différents jeux de données bruts et filtrés. | 98 |

| | | |
|------|--|-----|
| 4.8 | Synthèse de l'analyse statistique pour la charge radiante pour les différents jeux de données bruts et filtrés. | 98 |
| 4.9 | Synthèse de l'analyse statistique pour l'UTCI pour les différents jeux de données bruts et filtrés | 98 |
| 4.11 | Analyse statistique en journée | 100 |
| 4.10 | Analyse statistique sur 24h | 100 |
| 4.12 | Analyse statistique en soirée | 101 |
| 5.1 | Paramètres mesurés et instrumentation de la station de mesure mobile. . . | 110 |
| 5.2 | Dates et horaires des mesures mobiles effectuées entre 2019 et 2021. | 112 |
| 5.3 | Valeurs d'albédo mesurées au points de mesure avant et après travaux selon la norme ASTM E1918-16 (2016) | 121 |
| 5.4 | Estimation des incertitudes de répétabilité | 122 |
| 5.5 | Comparaison des surchauffes thermiques avant (2020) et après (2021) travaux. 128 | |
| 5.6 | Évolution du point fixe avant et après travaux mesurée à la station EM Hilsz par rapport à la station EP Hilsz. | 131 |
| 6.1 | Valeurs du score γ en fonction du type de végétation | 145 |
| 6.2 | Valeurs de l'UTCI, de stress thermique relatif et de l'IPR calculé en chaque point de mesure mobile avant et après travaux au sein des écoles EE et EM M. Hilsz. | 151 |
| 6.3 | Valeurs moyennes d'IPR, de la fraction végétalisée et de l'albédo de la surface de la cour calculées pour les sites Oasis avant et après travaux. | 154 |
| 7.1 | Instrumentation de terrain | 168 |

Acronymes

| | |
|--------|---|
| APUR | Atelier Parisien d'URbanisme |
| BACI | Before-After-Control-Impact |
| CAUE | Conseil d'Architecture, d'Urbanisme et de l'Environnement |
| CLO | Courte Longueur d'Onde, $0,3 - 3\mu m$ |
| EPICEA | Etude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à l'Echelle de l'Agglomération parisienne |
| FEDER | Fond Européen de DEveloppement Régional |
| GIEC | Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat |
| GLO | Grande Longueur d'Onde, $3 - 100\mu m$ |
| ICU | Ilot de Chaleur Urbain |
| IPR | Indicateur de Potentiel de Rafraîchissement |
| IR | Infrarouge |
| ITS | Index of Thermal Stress |
| LCZ | Local Climate Zone |
| MCZ | Microclimate Zone |
| MNE | Modèle Numérique d'Elevation |
| OASIS | Ouverture, Adaptation, Sensibilisation, Innovation, Solidarité |
| OMM | Organisation Mondiale de Météorologie |
| OMS | Organisation Mondiale de la Santé |
| PET | Physiological Equivalent Temperature |
| PMV | Predicted Mean Vote |
| SIG | Système d'Information Géographique |
| SVF | Sky View Factor |
| UIA | Urban Innovative Action |
| UTCI | Universal Thermal Climate Index |

VdP Ville de Paris

Glossaire

| | |
|--------------------|--|
| AH | Humidité absolue, g/m^3 |
| C | Capacité calorifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$ |
| G | Densité de flux conductif, W/m^2 |
| H | Densité de flux convectif, W/m^2 |
| H/W | Ratio de forme du canyon urbain, - |
| J | Radiosité, W/m^2 |
| L | Irradiance aux grandes longueurs d'onde, W/m^2 |
| L_{up} | Rayonnement émis aux grandes longueurs d'onde, W/m^2 |
| M_{eau} | Masse molaire de l'eau, $18,02g.mol^{-1}$ |
| Q_A | Densité de flux de chaleur par advection, W/m^2 |
| Q_F | Densité de flux de chaleur anthropique, W/m^2 |
| R | Constante des gaz parfaits, $8,314J.K^{-1}.mol^{-1}$ |
| RH | Humidité relative, g/m^3 |
| R_n | Rayonnement net, W/m^2 |
| S | Irradiance aux courtes longueurs d'onde, W/m^2 |
| S_{up} | Rayonnement réfléchi aux courtes longueurs d'onde, W/m^2 |
| T_a | Température de l'air, °C |
| T_g | Température de globe, °C |
| T_{mrt} | Température moyenne radiante, °C |
| T_s | Température de surface, °C |
| V | Densité de flux conductif, W/m^2 |
| ΔQ | Densité de flux de chaleur absorbée, W/m^2 |
| $\Delta T_{mrt,a}$ | Charge radiante, °C |
| α | Albédo d'une surface, - |

| | |
|-----------------|--|
| ϵ | Emissivité d'une surface, - |
| λ | Conductivité thermique, W/(m.K) |
| ρ | Masse volumique du matériau, kg/m ³ |
| σ | Constante de Stefan Boltzmann $\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} \approx 5,670\,374\,419 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ |
| φ_g | Densité de flux global, W/m ² |
| φ_{rad} | Densité de flux radiatif, W/m ² |
| dz | Epaisseur de la couche de surface du matériau, m |
| h | Coefficient d'échange convectif, (W/m ²)/K |
| lE | Densité de flux de chaleur latente, W/m ² |
| p_s | Pression de vapeur saturante, Pa |
| p_v | Pression partielle de vapeur d'eau, Pa |
| t | Période d'observation |
| v | vitesse de vent, m/s |
| x | Localisation du site |
| x_0 | Site témoin |
| x_1 | Site OASIS |

Chapitre 1

Introduction

En 1788, André Thouin, botaniste et bras droit du comte de Buffon au Jardin du Roi (aujourd'hui le Jardin des Plantes), jugeait indispensable que dans une ville aussi densément peuplée que Paris, des espaces libres de toute construction entièrement consacrés au public puissent subsister et que leur ventilation au sein des principaux quartiers de la ville soit suffisamment régulière pour que « les habitants pussent commodément et sans trop s'éloigner de leurs affaires, aller respirer un air libre et pur ». La question de la nature en ville, bien que présente depuis le Moyen-Âge, devient éminemment politique au XVIII^e siècle avec l'émergence d'un regard critique envers l'urbanisation chaotique et la ville "grise" opposée à la ville jardin idéale et d'une recherche de qualité environnementale (Synowiecki, 2020). Cette question résonne encore aujourd'hui, amplifiée par les crises sanitaires et climatiques (Ferrier Jacques, 2020). La pandémie de COVID-19 a mis en exergue le rôle bénéfique des espaces verts sur la santé mentale et le stress des citoyens, tout en révélant les inégalités d'accès à ces mêmes espaces verts au sein des milieux urbains (Heckert and Bristowe, 2021; Botton Hugo, 2020).

Aujourd'hui, plus de 56 % de la population mondiale est urbanisée, et ce pourcentage est estimé à 68 % en 2050, se traduisant par une augmentation de 2,2 milliards d'urbains, vivant principalement dans les régions africaines et asiatiques (UN-Habitat, 2022). Les villes et agglomérations urbaines sont des terrains à forts enjeux, car elles sont de par leur taille et densité un haut lieu de vulnérabilité et d'exposition aux risques climatiques et sanitaires où se cristallisent les inégalités sociales (OCDE and European Commission, 2020; Levinger et al., 2022; Vardoulakis and Kinney, 2019). Le GIEC prévoit en effet une amplification

des catastrophes naturelles en milieu urbain. En particulier, l'Europe subira des étés très chauds avec des températures pouvant avoisiner les 50 °C avec un risque accru d'inondations (Bednar-Friedl et al., 2022; Guerreiro et al., 2018). Ces résultats mettent en exergue la nécessité de développer de nouveaux modes de gouvernance et de gestion du risque et de repenser les services écosystémiques afin d'établir de solides stratégies d'adaptation.

Le dérèglement climatique sera à l'origine d'une hausse globale des températures annuelles en France de 2,9 à 8,2 °C par rapport à la référence actuelle (12,4 °C), avec des étés 30 % plus chauds que en température ainsi qu'une multiplication des épisodes caniculaires avec jusqu'à 25 jours de canicule par an d'ici à 2100 contre 1 jour actuellement (Bador et al., 2017; Ribes et al., 2022). Ces épisodes caniculaires sont amplifiés par le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) qui sont liés à différents paramètres de la ville : morphologie urbaine, minéralité et perméabilité des revêtements, ainsi que la densité d'activité humaine (Oke, 1982). Les synergies entre ICU et vagues de chaleur ont des répercussions dramatiques sur la situation sanitaire. L'été 2022 a été la saison la plus chaude jamais enregistrée en France et fait écho à la canicule meurtrière de 2003. Cette dernière a été à l'origine de 70 000 décès en Europe de l'Ouest et a particulièrement touché la ville de Paris avec une surmortalité de 141 % enregistrée les deux premières semaines d'août (Robine et al., 2008; Canouï-Poitrine et al., 2006). Outre les événements de chaleur extrême, le dérèglement climatique sera à l'origine d'une intensification des pluies et augmentera de 10 à 15 % le risque d'inondations (Guerreiro et al., 2018; Bernard, 2021). Il est donc primordial de réfléchir à de nouvelles pratiques de gestion de la ressource en eau du bassin parisien (Bernard, 2021).

Ces enjeux nécessitent donc de repenser l'espace public de sorte à répondre de manière systémique à des stress désormais chroniques. Suite à l'épisode caniculaire meurtrier de 2003, la Ville de Paris (2017a) s'est dotée dès 2007 d'un Plan Climat, réactualisé en 2012, 2017 et 2022. En complément, la Stratégie de Résilience de Paris a été adoptée en 2017, intégrant la lutte contre le dérèglement climatique dans un contexte plus global de mobilisation face aux risques majeurs sociaux, économiques, géopolitiques et environnementaux (Ville de Paris, 2017b). Ce dernier est structuré en trois piliers décliné en 35 actions principales. Parmi celles-ci, l'action 10 prévoit de "transformer les cours d'écoles en « oasis », véritables îlots de fraîcheur". Cette action-phare est aujourd'hui connue sous le nom de "programme Oasis".

Le réseau d'écoles géré par la Ville de Paris constitue un maillage dense du territoire : 656 écoles maternelles et élémentaires et 115 collèges. Ces espaces couvrent près de 73 hectares



FIG. 1.1 – Une station de métro à Paris inondée en août 2022 après des pluies diluviennes. Source : Twitter/Clément Parrot

et sont répartis de façon relativement homogène dans la capitale, étant situés à moins de 200 m de chaque habitant. Pour l’instant asphaltées et imperméables, ces cours contribuent fortement au phénomène d’ICU. La transformation de ces cours d’école en îlots de fraîcheur accessibles au public en dehors des périodes scolaires vise notamment à pallier le manque d’espace vert de la capitale (5,8 m²/habitant) et à limiter l’échauffement urbain parisien. La [Ville de Paris \(2017a\)](#) prévoit de transformer l’ensemble des cours d’écoles de la capitale en cours Oasis d’ici à 2050. Le maillage d’îlots de fraîcheur ainsi créé permettra de réintroduire de la nature dans la capitale et s’inscrit dans une stratégie de rafraîchissement urbain à la fois globale et de proximité.

La création des cours OASIS vise aussi à générer des cobénéfices socio-politiques, dans la mesure où les cours transformées seront accessibles en périodes extra scolaires aux riverains, renforçant la cohésion sociale et la vie de quartier et créant des espaces de partage et de dialogue démocratique ([Zask, 2022](#)). Dans ce cadre du programme Oasis, le projet européen FEDER UIA OASIS, lauréat de l’initiative Action Innovatrices Urbaines (Urban Innovative Action UIA) financée par le Fond Européen de Développement Régional (FEDER) de la Commission Européenne, cible l’évaluation de la transformation de 10 cours d’école pilotes de 2018 à 2022. Dans le cadre de ce projet de recherche-action, les cours pilotes bénéficient d’un suivi scientifique tout au long du projet (novembre 2018 à avril 2022) visant à évaluer



FIG. 1.2 – À gauche, logo du projet OASIS : Openness, Adaptation, Sensitisation, Innovation and Social ties. A droite, partenaires du consortium FEDER UIA OASIS

l'impact social et climatique du projet.

La transformation des cours sera le résultat d'un processus de co-conception mené avec les élèves et le corps enseignant dans chaque établissement. Les cours d'école seront renouvelées à l'aide de matériaux éco-innovants de sorte à créer des îlots de fraîcheur : dés-imperméabilisation, augmentation de la fraction végétale, création d'ombrage. La phase de co-conception permet de mobiliser l'intelligence collective des écoliers ou collégiens et du personnel enseignant avec des temps de sensibilisation et de formation pour petits et grands aux enjeux d'atténuation et d'adaptation au changement climatique.

Le projet est porté par la Ville de Paris et mobilise un consortium d'experts chargé d'accompagner les établissements sur les différents aspects du projet illustré à la Figure 1.2.

- Le Conseil d'Architecture, d'Urbanisme et de l'Environnement de Paris (CAUE 75) accompagne les établissements dans la démarche de co-conception des nouvelles cours d'école.
- La Ligue de l'enseignement anime les réflexions autour des nouveaux usages des cours transformées.
- Le Laboratoire Interdisciplinaire de l'Evaluation des Politiques Publiques (LIEPP) de Sciences Po s'occupe de l'évaluation de l'impact social des cours OASIS sur la sensibilisation des élèves aux enjeux environnementaux ainsi que sur l'usage des cours transformées.
- Météo-France et le Laboratoire Interdisciplinaire de Demain (LIED, UMR 8236 CNRS et Université Paris Cité) collaborent pour l'évaluation de l'impact microclimatique et thermique de la transformation des cours à l'échelle du quartier et de l'ICU parisien ainsi que sur le stress thermique des usagers par le biais de mesures de terrain et de simulations.

Le projet a été lancé fin 2018 pour une durée de trois ans et demi de novembre 2018 à avril 2022. Le projet FEDER OASIS vise à promouvoir la méthode OASIS qui offre, via la rénovation des cours, une solution systémique à la problématique d'atténuation des vagues de chaleur en ville. Le suivi météorologique de ces cours, avant et après transformation, permettra une évaluation concrète et expérimentale de l'impact microclimatique de cette initiative sur l'ICU et le confort thermique des usagers. C'est dans ce cadre que s'inscrit cette thèse qui s'est focalisée sur l'évaluation microclimatique de l'impact des transformations des cours pilotes sur le stress thermique des usagers.

L'évaluation in situ de la performance rafraîchissante des travaux est un enjeu important pour les collectivités. De plus, l'observation de l'évolution des sites avant et après application des stratégies de rafraîchissement est nécessaire à l'évaluation de l'efficacité de ces dernières. La problématique de ce travail est la suivante : quelle méthodologie d'évaluation expérimentale mobiliser pour un projet de rafraîchissement sur plusieurs années ?

Notre objectif vise à établir une méthodologie d'évaluation expérimentale pluriannuelle de l'impact microclimatique et thermique des travaux de transformation des cours d'école parisiennes sur le confort thermique des usagers. En parallèle de cette problématique, nous identifions d'autres sous-questions importantes dans le cadre du programme OASIS :

1. Quelles solutions de revêtement de sol sont les plus adaptées au rafraîchissement d'une cour d'école parisienne lors de fortes chaleurs ?
2. Quel est l'impact des solutions de végétalisation sur le rafraîchissement dans une cour d'école ?
3. Quelles sont les échelles spatio-temporelles de l'évaluation du rafraîchissement ?
4. Comment intégrer les techniques de rafraîchissement au sein de l'action des collectivités territoriales ?

Ces questions sont autant de pistes de recherche dont les résultats seront utiles aux collectivités visant à optimiser la mise en place de stratégies de rafraîchissement ainsi que pour la communauté scientifique. Afin d'y répondre, le chapitre 3 traitera de l'évaluation des performances thermiques de différents types de revêtement de sols implémentés au sein des cours d'écoles OASIS. Le chapitre 4 présentera le réseau de stations météorologiques fixes déployé dans le cadre du projet OASIS afin d'assurer un suivi temporellement continu de l'évolution des paramètres microclimatiques au sein des cours avant et après les travaux

de transformation. L'évaluation de l'impact microclimatique des travaux OASIS sera réalisée en appliquant la méthodologie d'évaluation statistique développée par [Parison et al. \(2020b\)](#). Afin d'augmenter la résolution spatiale de l'étude du confort thermique, une méthodologie d'évaluation couplant mesures fixes et mobiles sera proposée au chapitre 5. Enfin, le chapitre 6 introduira l'Indicateur de Potentiel de Rafraîchissement, indicateur pour l'optimisation du confort thermique à l'échelle du piéton.

Afin d'identifier les premiers éléments de réponse à la problématique qui figurent déjà dans la littérature scientifique, le chapitre 2 présentera un bref état de l'art des travaux en climatologie urbaine. Ce chapitre nous permettra de préciser les questions de recherche qui guideront la réflexion développée dans ce manuscrit.

Chapitre 2

État de l'art

| | | |
|-------|---|----|
| 2.1 | Introduction à la climatologie urbaine | 8 |
| 2.1.1 | Les échelles du climat urbain | 8 |
| 2.1.2 | ICU et vagues de chaleur | 11 |
| 2.1.3 | Bilans thermiques en ville | 13 |
| 2.2 | Stress thermique en milieu urbain | 17 |
| 2.2.1 | Bilan radiatif du piéton en milieu urbain | 17 |
| 2.2.2 | Indicateurs de stress thermique | 20 |
| 2.3 | Stratégies de rafraîchissement urbain | 24 |
| 2.3.1 | Solutions grises | 25 |
| 2.3.2 | Solutions basées sur la nature | 27 |
| 2.4 | Évaluation du rafraîchissement | 30 |
| 2.4.1 | Simulations | 32 |
| 2.4.2 | Mesures fixes | 33 |
| 2.4.3 | Mesures mobiles | 34 |
| 2.5 | Services climatiques | 35 |
| 2.5.1 | Données du climat urbain | 36 |
| 2.5.2 | Outils pour l'aide à la décision | 37 |

2.1 Introduction à la climatologie urbaine

L'établissement des premières activités humaines s'est inévitablement accompagné d'une modification de l'environnement qui persiste jusqu'à nos jours (Elbaz-Poulichet et al., 2020). En particulier, l'établissement des sociétés au sein d'agglomérations de plus en plus denses est à l'origine de phénomènes physiques et atmosphériques propres aux milieux urbanisés regroupés sous l'égide du climat urbain (Grimmond et al., 2016). Haut lieu de la pollution atmosphérique et ce depuis le Moyen-Âge, Londres est le terrain d'étude du pionnier de la climatologie urbaine Luke Howard (Landsberg, 1981). Ce dernier identifie en 1818 le smog urbain et des températures plus chaudes en centre-ville par rapport à la campagne environnante (Howard, 1833, 1820). Outre Manche, cet écart de température est aussi observé à Paris par le météorologiste Émilien Renou qui détermine aussi des conditions climatiques propices à l'amplification de cet écart (Renou, 1858). Soixante ans plus tard, Schmidt (1917) apporte une contribution majeure en introduisant les premières mesures mobiles qui permettent de cartographier ces différences de température caractéristiques du phénomène plus tard dénommé Ilot de Chaleur Urbain (Manley, 1958). Depuis, les travaux autour du climat urbain se sont développés, mettant en exergue l'effet du bâti sur l'atmosphère, explicitant les mécanismes de transfert de masse et de chaleur au sein des différentes couches du système ville-atmosphère et établissant des protocoles d'observation (Kratzer, 1956; Oke, 2002; Landsberg, 1981). Hebbert (2014) situe la naissance de la communauté scientifique en 1968 au Symposium de Bruxelles sur le climat urbain et la climatologie des bâtiments organisé par l'Organisation Mondiale de Météorologie et l'Organisation Mondiale de la Santé. Aujourd'hui, l'étude du climat urbain est un champ multidisciplinaire, dont les travaux s'ancrent dans les enjeux de la transition écologique et de la soutenabilité. (Cleugh and Grimmond, 2012; Qian et al., 2022; Lwasa et al., 2022)

2.1.1 Les échelles du climat urbain

Le phénomène d'ICU est la manifestation la plus répandue de l'influence des villes sur le climat urbain. Lowry (1977) a été le premier à établir un cadre théorique pour l'étude des effets urbains sur le climat. Les observations météorologiques peuvent être considérées comme une combinaison de trois variables. La première est liée au microclimat de la région et constitue une variable de fond, à laquelle viendrait s'ajouter une variable de climat local

liée à la topographie et au relief naturel et enfin une variable correspondant aux effets de l'urbanisation. Cette approche permet de rendre compte de la complexité du milieu urbain dont les multiples facettes (façade d'un immeuble, rue pavée, ...) et composantes (parcs, jardin, ...) présentent à leurs échelles des propriétés à l'origine d'effets urbains tels que les îlots de chaleur ou encore les îlots de pluie (Yoshino, 1975).

La Figure 2.1 schématise la structure verticale de l'atmosphère au-dessus d'un milieu urbain et met en évidence les 3 échelles d'interaction entre la forme urbaine et l'atmosphère.

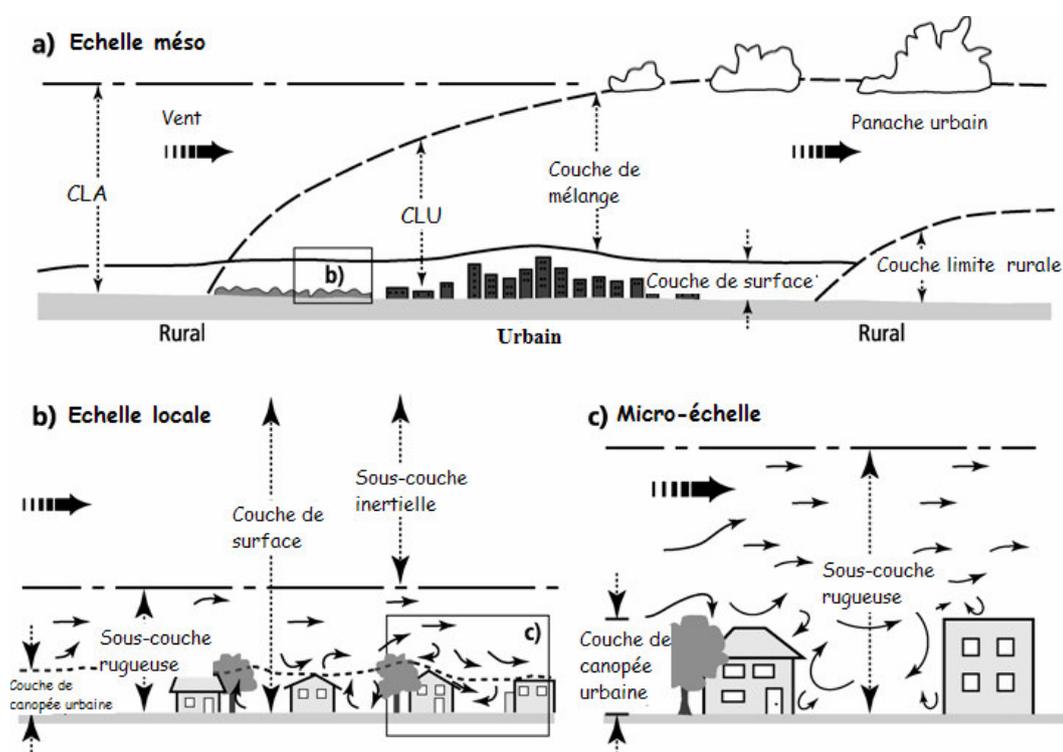


FIG. 2.1 – Échelles du climat urbain, d'après Leroyer (2006). La CLA correspond à la Couche Limite Atmosphérique, tandis que la CLU correspond à la Couche Limite Urbaine.

L'échelle de la métropole est l'échelle méso (Figure 2.1 a) où est observé le phénomène d'ICU avec une distance caractéristique minimale de l'ordre de la dizaine de kilomètres. L'échelle locale (Figure 2.1 b), de distance caractéristique de l'ordre du kilomètre, concerne les îlots urbains (quartier résidentiel, forêt). En deçà de l'échelle locale se trouvent les unités urbaines de l'échelle microclimatique (Figure 2.1 c). De taille caractéristique de 1 à 100 m, cette échelle inclut les canyons urbains, formés d'une rue encaissée entre deux bâtiments, des jardins, des cours, arbres et facettes (mur, sol, toit).

Des métriques et des descripteurs sont associés aux diverses échelles du climat et permettent de délimiter les phénomènes étudiés. À titre d'exemple, l'ICU ou les panaches thermiques urbains sont des phénomènes d'échelle méso, s'étendant sur des grandeurs de la taille de l'agglomération urbaine. À cette échelle correspondent la classification en zones urbaines, rurales et péri-urbaines qui permettent d'étudier l'intensité du phénomène d'Îlot de Chaleur Urbain (ICU).

L'échelle locale répond à la classification en zones climatiques locales (LCZ pour Local Climate Zone) (Stewart and Oke, 2012) reportées sur la Figure 2.2. Ces zones répondent au double principe d'homogénéité de composition urbaine (agencement des bâtiments, hauteur, matériaux) et d'homogénéité climatique (albédo des surfaces, évaporation liée aux végétaux, inertie thermique). Créée à l'origine afin de regrouper des ensembles morphologiques urbains en fonction de leur influence sur la variation intra-urbaine de la température de l'air (Stewart and Oke, 2012), cette classification constitue aujourd'hui une grille de lecture universelle permettant de caractériser les interactions entre la surface urbaine d'une Local Climate Zone (LCZ) et l'atmosphère à l'échelle locale (Ching et al., 2016).

Middel et al. (2021) proposent dans la continuité des LCZ de développer des zones de microclimat (MCZ pour Microclimate Zone) à l'échelle du piéton (1-10 m²) qui se concentreraient sur les caractéristiques morphologiques urbaines de l'environnement immédiat du piéton constitué de différentes surfaces (mur, sol, toit, ...). Plusieurs grandeurs permettent de caractériser la morphologie urbaine à l'échelle microclimatique, tel que le rapport de forme du canyon, défini comme le ratio de la Hauteur H du bâti sur la largeur W des voies $\frac{H}{W}$, la fraction de surface végétalisée ou asphaltée d'un îlot urbain, ou encore le facteur de vue du ciel SVF défini comme le facteur de forme entre un point d'une surface donnée et la voûte céleste (Johnson and Watson, 1984). La Figure 2.3 représente schématiquement le facteur de vue du ciel.

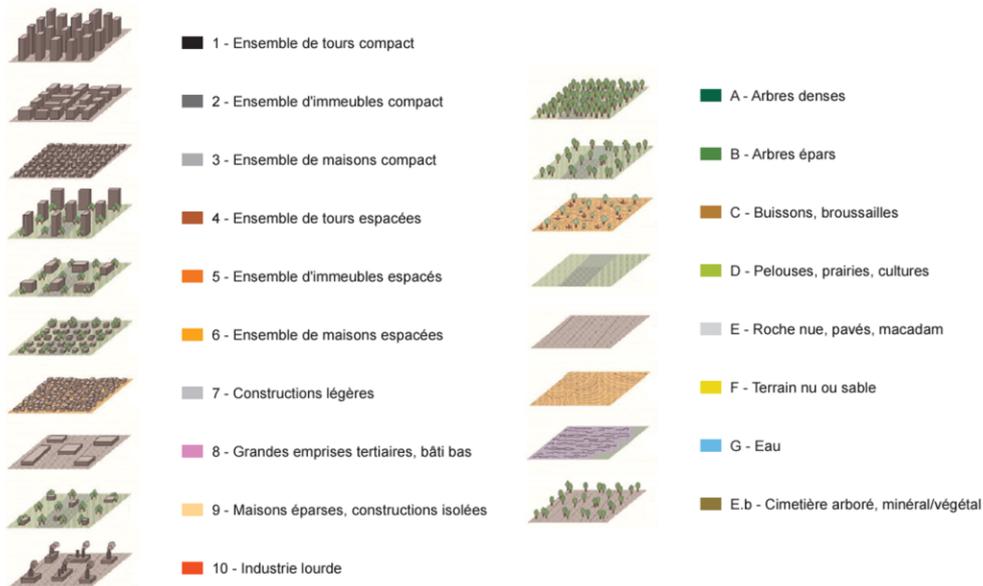


FIG. 2.2 – D'après Stewart and Oke (2012), classification en Zones Climatiques Locales (source Cordeau et al. (2015)).

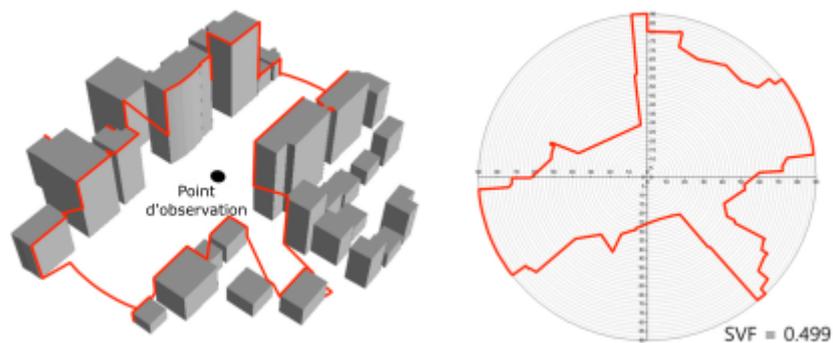


FIG. 2.3 – D'après Park et al. (2017), représentation conceptuelle du SVF pour un point d'observation dans un site urbain. À gauche, la ligne orange relie les bâtiments obstruant l'horizon du point d'observation. À droite, le graphe polaire illustre le SVF projeté sur un plan. Le cercle extérieur représente l'horizon pour une surface libre. L'horizon local relie quant à lui les bordures des obstructions. Il s'agit de la ligne orange.

2.1.2 ICU et vagues de chaleur

Le phénomène d'îlot de chaleur urbain est une conséquence de la modification du bilan thermique des surfaces urbaines en contraste avec celui des surfaces en milieu rural.

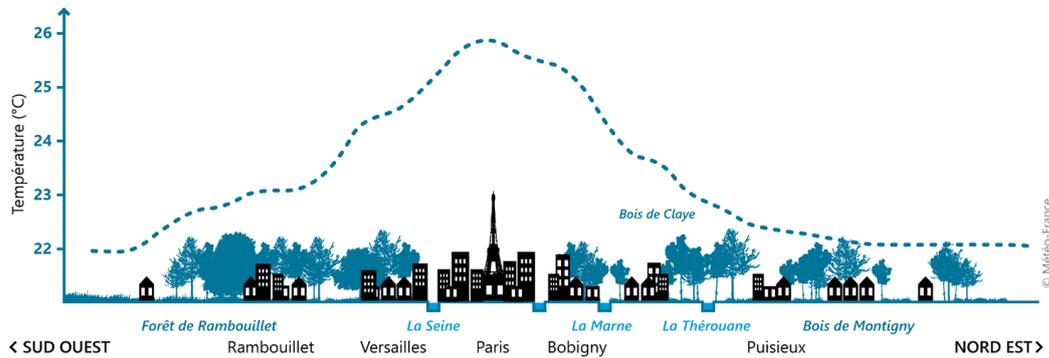


FIG. 2.4 – Profil de la température de l'air à 2 m simulée pour une nuit de canicule typique de l'été 2003. D'après Météo France et le CAUE.

Il se traduit par une élévation des températures de l'air en ville par rapport à la campagne comme illustré à la Figure 2.4 (Landsberg, 1981; Oke et al., 2017).

Le phénomène d'ICU est la résultante d'un ensemble de facteurs morphologiques, de propriétés radiatives et thermiques. La morphologie urbaine favorise le piégeage radiatif, tandis que les propriétés radiatives des matériaux modulent l'absorption du rayonnement solaire en journée et ainsi l'échauffement des surfaces urbaines et le refroidissement par rayonnement thermique à la tombée de la nuit, contribuant ainsi à l'échauffement nocturne de l'atmosphère (Taha, 1997). L'inertie thermique des surfaces urbaines favorise le stockage de la chaleur tandis que le manque de végétation réduit les flux de chaleur latents. Enfin, les rejets anthropiques urbains sont un terme source de chaleur au sein de la ville (Oke, 1982; Oke et al., 2017). L'intensité de l'îlot de chaleur urbain, définie comme l'écart de température de l'air entre milieu rural et urbain, varie en moyenne entre 1 et 3 °C, notamment pour la ville de Paris où l'ICU est de l'ordre de 3 °C (Grimmond et al., 2016; Cantat, 2004). Ces phénomènes sont toutefois spatio-temporellement dépendants des caractéristiques intrinsèques de la ville (population, taille), ainsi que de facteurs extérieurs tels que l'orographie, la saisonnalité ou les facteurs synoptiques (Manoli et al., 2019; Oke, 1982; Cantat, 2004). Enfin, l'îlot de chaleur urbain varie de manière horaire avec des maxima nocturnes (Paulina et al., 2015; Kłysik and Fortuniak, 1999).

L'intensité de l'îlot de chaleur urbain est décuplée par des conditions anticycloniques (faible vent et ciel clair), avec des surchauffes en milieu urbain pouvant aller jusqu'à 10 °C. C'est notamment le cas des épisodes de chaleur et canicules, où une synergie s'établit entre îlot de chaleur urbain et vagues de chaleur et concourt à augmenter les températures

intra-urbaines (Ramamurthy and Bou-Zeid, 2017; Founda and Santamouris, 2017). Cette augmentation de la chaleur à des retombées néfastes en termes de santé publique avec des incidences fréquentes de morbidités liées à la chaleur (Nazarian et al., 2022). La canicule de 2003 a en effet causé plus de 70 000 décès en Europe avec une surmortalité de l'ordre de 60 % en France et particulièrement importante dans les agglomérations pendant les deux premières décades d'août 2003 (Robine et al., 2008; Hémon and Jouglà, 2003; Cadot and Spira, 2006).

La question des synergies entre stress thermique, canicules et ICU est d'autant plus pressante que les climatologues prédisent une augmentation en fréquence et intensité des vagues de chaleur et canicules (Perkins-Kirkpatrick and Lewis, 2020; Bador et al., 2017). Les conséquences de ces vagues de chaleur seront exacerbées par les phénomènes d'îlot de chaleur urbain, avec des retombées sanitaires, énergétiques et économiques importantes (Tremeac et al., 2012; de Munck et al., 2013; McMichael and Lindgren, 2011). Des efforts de recherche sont aujourd'hui déployés afin d'accompagner les villes dans des stratégies de résilience et d'adaptation (Pinson et al., 2016; Eliasson, 2000). Différentes solutions de rafraîchissement et d'évaluation du confort thermique sont proposées sur la base de modélisation ou de travaux de terrain (Krayenhoff et al., 2021; Santamouris, 2020).

2.1.3 Bilans thermiques en ville

Dans le cadre d'études du climat urbain, il est nécessaire de s'intéresser au bilan thermique de surfaces urbaines et de volumes urbains.

La Figure 2.5 schématise le bilan énergétique d'une surface urbaine. H représente la densité de flux convectif échangée avec l'air, V est la densité de flux de conduction, lE est la densité de flux de chaleur latente dans le cas où la surface est humide ou végétalisée, avec l la chaleur latente de vaporisation de l'eau et E le taux d'évaporation surfacique. S et S_{up} sont respectivement les rayonnements de courte longueur d'onde (CLO) incidents et réfléchis, tandis que L et L_{up} sont respectivement les rayonnements de grande longueur d'onde (GLO) incidents et réfléchis. La radiosité désigne la somme du rayonnement réfléchi et émis par le sol, tandis que l'irradiance désigne le rayonnement incident. Courte Longueur d'Onde, $0,3 - 3\mu m$ (CLO) correspond au rayonnement solaire, qui comprend le rayonnement visible et proche infrarouge ($0,3-3 \mu m$) et Grande Longueur d'Onde, $3 - 100\mu m$ (GLO) couvre le moyen infrarouge et infrarouge lointain ($3-100 \mu m$). Le bilan thermique d'une surface

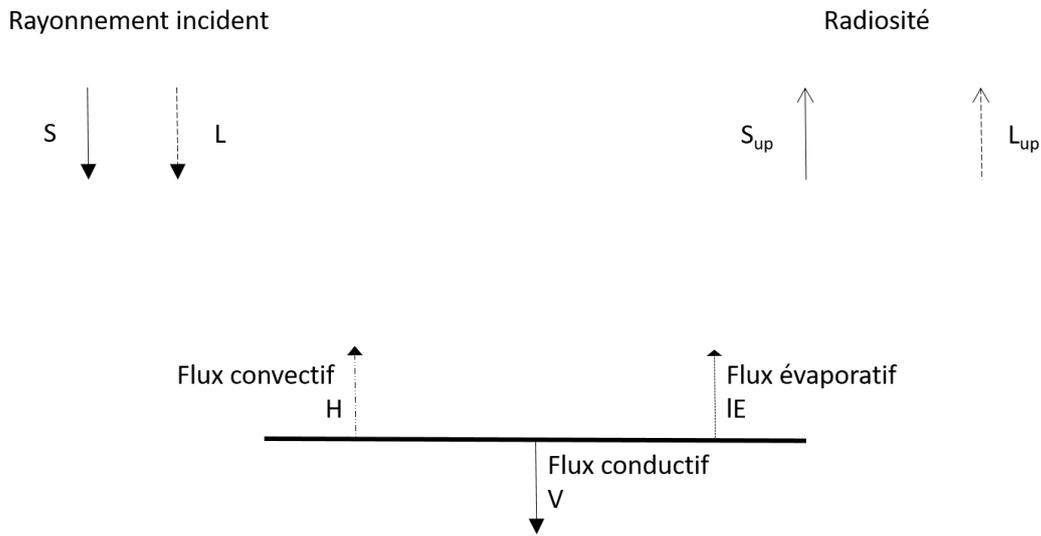


FIG. 2.5 – Bilan énergétique d’une surface.

urbaine peut être synthétisé par l’équation 2.1

$$S + L = S_{up} + L_{up} + H + V + lE \quad (2.1)$$

Le bilan radiatif de l’irradiance et de la radiosité peut être synthétisé par le terme de rayonnement net, défini comme suit :

$$R_n = S + L - (S_{up} + L_{up}) \quad (2.2)$$

Lors de journées estivales claires, le rayonnement net est positif en journée (on parle d’absorption radiative) avec le rayonnement S comme composante dominante. R_n est négatif à la tombée de la nuit (on parle de refroidissement radiatif), avec annulation des termes de courte longueur d’onde (Oke, 1988). Les radiosités aux courtes et grandes longueurs d’onde peuvent être exprimées selon les équations 2.3 et 2.4 avec α l’albédo d’une surface, ϵ son émissivité, σ la constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 * 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$) et T_s la température de surface. L’albédo d’une surface représente sa réflectivité solaire (CLO), tandis que l’émissivité quantifie la capacité d’une surface à émettre un rayonnement thermique proportionnel à sa température de surface.

$$S_{up} = \alpha S \quad (2.3)$$

$$L_{up} = (1 - \epsilon)L + \epsilon\sigma T_s^4 \quad (2.4)$$

Le terme convectif et le terme de conduction peuvent être respectivement exprimés d'après la formule de [Jürges \(1924\)](#) et la loi de Fourier selon 2.5 et 2.6 :

$$H = h(T_s - T_a) \quad (2.5)$$

$$V = -\lambda \left. \frac{\partial T_z}{\partial z} \right|_{z=0} \quad (2.6)$$

avec h le coefficient de convection, T_a la température de l'air, λ la conductivité thermique de la surface urbaine et z la profondeur. Concernant l'évaporation, les facteurs dominants sont le gradient de pression de vapeur d'eau qui dépend de l'humidité de l'air ainsi que de facteurs météorologiques tels que le rayonnement ou la vitesse du vent ([Huang et al., 2022](#)).

En partant du bilan d'une surface urbaine, nous pouvons considérer le bilan énergétique (en W/m^2) d'un volume urbain délimité par la canopée urbaine et une profondeur de sol telle que le flux conductif soit négligeable à l'échelle temporelle considérée, typiquement quelques décimètres sur 24h. Le volume est représenté à la Figure 2.6.

Le bilan énergétique du volume urbain s'écrit donc :

$$R_n + Q_F = H + \Delta Q + lE + Q_A \quad (2.7)$$

Q_F représente le rejet anthropique de chaleur dans l'atmosphère, Q_A le flux d'advection net de chaleur hors du volume et ΔQ le flux de chaleur stocké. À l'échelle considérée, les transferts thermiques par conduction sont considérés comme nuls. Pour un tissu urbain homogène, le terme Q_A est négligeable.

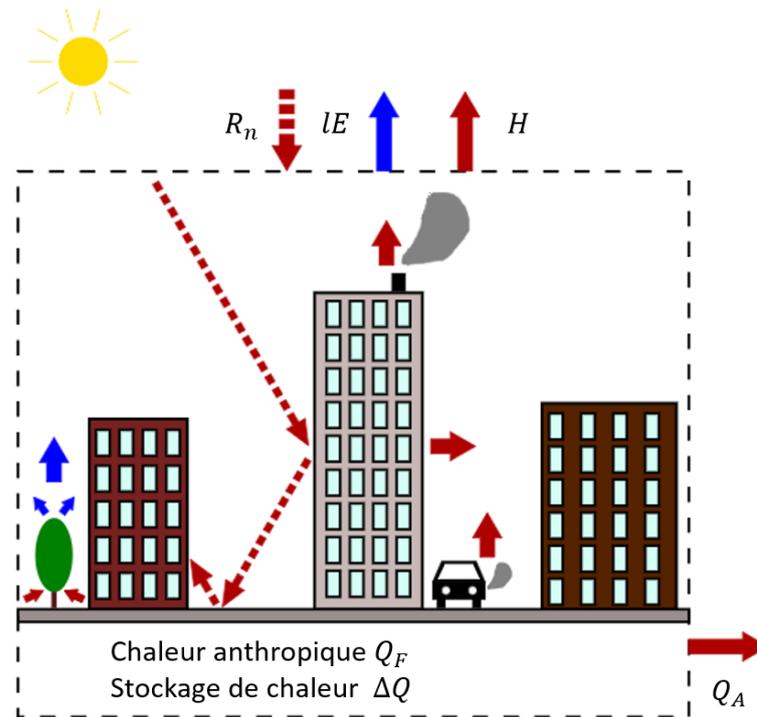


FIG. 2.6 – Bilan thermique d'un volume urbain, d'après [Hendel \(2020\)](#).

L'îlot de chaleur urbain est l'objet d'études depuis les années 50, notamment en ce qui concerne le lien entre ICU et confort thermique du piéton en milieu urbain ([Stewart, 2011](#)). [Martilli et al. \(2020\)](#) attirent l'attention sur le fait que ce phénomène est symptomatique de la chaleur en ville plutôt que cause de réchauffement. En effet, ce dernier est un phénomène relatif dépendant des caractéristiques urbaines et rurales à la fois et ne quantifie donc pas la chaleur en excès générée par l'existence même de la ville ([Santamouris, 2020](#)). Une hausse des températures en milieu rural pourrait en effet atténuer l'intensité de l'îlot de chaleur urbain sans pour autant atténuer la chaleur globale en ville, tandis que l'ICU contribue sous certaines conditions météorologiques à créer des circulations secondaires permettant la pénétration de masse d'air fraîches en ville ([Stewart, 2011](#); [Nazarian et al., 2022](#)). [Martilli et al. \(2020\)](#) préconisent ainsi de déployer des stratégies d'atténuation de la chaleur en ville, plutôt que d'atténuer le phénomène d'ICU. Dans cette optique, l'établissement du bilan thermique du volume urbain permet d'identifier des termes sources de chaleur tels que H , Q_F mais aussi les termes permettant de diminuer l'échauffement atmosphérique, telle que l'évapotranspiration au sein des parcs ou l'évaporation des étendues d'eau. La quantification

de cette chaleur se fait par le biais de l'étude du confort thermique des citoyens en milieu urbain (Coccolo et al., 2016).

2.2 Stress thermique en milieu urbain

Le stress thermique est la réponse physiologique de l'organisme à des variations météorologiques perturbant son homéostasie thermique. L'état de confort thermique est défini par une fourchette étroite des températures corporelles, une faible humidité de la peau et un effort physiologique de régulation de température minimal (ASHRAE, 2017). Tout départ de cette situation de neutralité est considéré comme un stress thermique, allant vers des extrêmes chauds ou froids et nécessitant un effort de thermorégulation (Mora and Bean, 2018). La notion de confort thermique en intérieur est aujourd'hui largement standardisée (ISO 7730, 2005; ASHRAE, 2017). Toutefois, l'évaluation du confort thermique en extérieur est dépendante du contexte géographique et culturel, ainsi que du microclimat à l'échelle du piéton (Nikolopoulou and Lykoudis, 2006; Kántor et al., 2012; Andreou, 2013). Chen and Ng (2012) déterminent 4 niveaux de complexité pour envisager le confort thermique : l'aspect physique, physiologique, psychologique et socio-comportemental. La prise en compte du paramètre psychologique et social nécessite la mise en place de nouveaux protocoles et formalismes de mesure (Johansson et al., 2014; Nazarian and Lee, 2021). Le stress thermique est quant à lui lié à l'étude des échanges thermiques entre l'organisme et son environnement, pour une activité physique et un habillement donné.

2.2.1 Bilan radiatif du piéton en milieu urbain

La Figure 2.7 illustre le bilan thermique d'un piéton en milieu urbain. Le corps humain est soumis à des transferts thermiques par conduction avec le sol, par convection avec l'air ambiant et à différents échanges radiatifs : rayonnement thermique des surfaces, rayonnement solaire incident ou réfléchi. La résultante de ces échanges radiatifs peut être synthétisée par la température moyenne radiante notée T_{mrt} , grandeur prédominante dans le bilan thermique humain et très influente sur le stress thermique (Kántor and Unger, 2011; Mayer and Hoppe, 1987).

La température moyenne radiante est définie de sorte que l'irradiance au sein d'un corps noir à la température moyenne radiante soit égale à l'irradiance observée au point de mesure

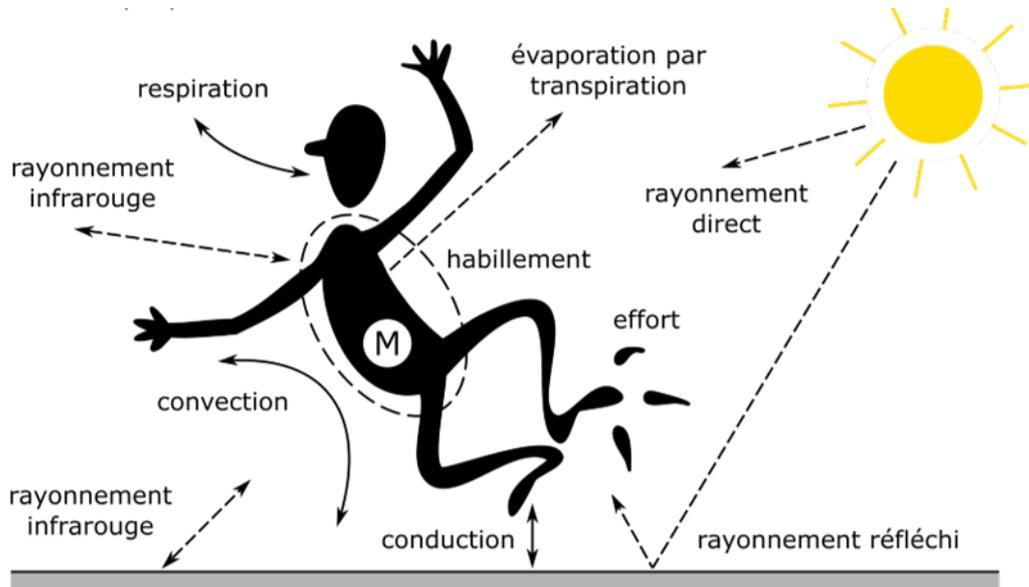


FIG. 2.7 – D’après [Parison \(2020\)](#), bilan thermique d’un être humain. M correspond à l’activité métabolique.

([ASHRAE, 2017](#)).

La méthode de référence d’estimation de la T_{mrt} est la mesure du rayonnement intégral, considérée par [Thorsson et al. \(2007\)](#) comme la méthode la plus précise, bien que difficile à mettre en œuvre. Cette méthode utilise au total trois radiomètres à quatre composantes disposés dans les 3 directions de l’espace ([Kántor and Unger, 2011](#)).

[Guo et al. \(2020\)](#) analysent une variété de méthodes de mesure et d’estimation de la température radiante et insistent sur les compromis entre facilité de calcul et sensibilité, fiabilité des mesures ou simulation, notamment à cause de la complexité de modélisation du milieu extérieur et de la géométrie humaine. Par sa définition, le calcul analytique de la température moyenne radiante nécessite de sommer le rayonnement thermique de toutes les surfaces entourant une personne pondéré par le facteur de forme entre ladite personne et ces surfaces. Expérimentalement, T_{mrt} peut être plus facilement estimée par différents instruments, le plus communément à l’aide d’un thermomètre à globe. Dans ce cas, la géométrie du corps humain est simplifiée et représentée par une sphère. À l’équilibre thermique du globe, on peut écrire :

$$\epsilon\sigma(T_{mrt} + 273,15)^4 = \epsilon\sigma(T_g + 273,15)^4 + h(T_g - T_a) \quad (2.8)$$

Dans l’équation 2.8, le membre de gauche correspond aux flux incidents (rayonnement

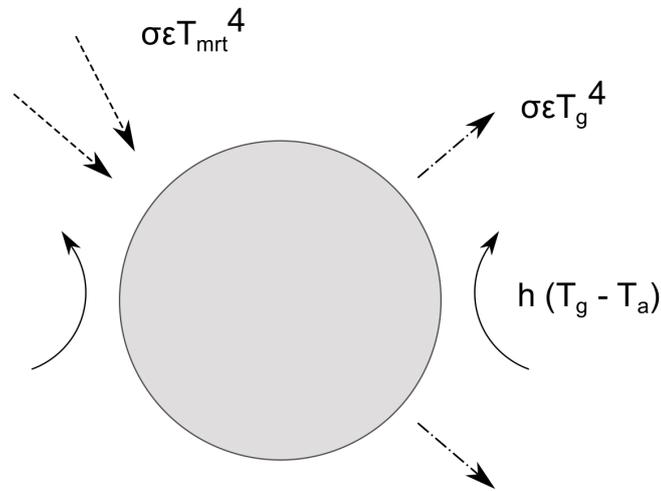


FIG. 2.8 – D’après [Parison \(2020\)](#), bilan thermique appliqué à un thermomètre à globe. Les flux de chaleurs gagnés et perdus par le globe sont isotropes. Les températures sont exprimées en Kelvins

ambient), tandis que le membre de droite représente les flux radiatifs et convectifs sortants, avec T_{mrt} en °C, T_g la température de globe (en °C), σ la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \text{ W.m}^2.\text{K}^{-4}$), ϵ l’émissivité du thermomètre à globe, T_a la température de l’air (en °C) et h le coefficient de convection qui dépend de la vitesse de vent et de la nature de l’écoulement autour du globe. Le bilan thermique du thermomètre à globe (équation 2.8) peut être schématisé à la Figure 2.8. [ASHRAE \(2001\)](#) établit l’expression empirique du calcul de T_{mrt} à l’aide du thermomètre à globe :

$$T_{mrt} = ((T_g + 273,15)^4 + \frac{1,1 \cdot 10^8 \cdot v^{0,6}}{\epsilon D^{0,4}} (T_g - T_a))^{0,25} - 273,15 \quad (2.9)$$

où D est le diamètre du globe, v la vitesse du vent. La connaissance des paramètres de l’équation 2.9 permet donc de calculer la température moyenne radiante. Cette formule est appliquée pour différents types de globes recensés par [Johansson et al. \(2014\)](#), mais l’Organisation Mondiale de Météorologie retient comme norme un globe creux en cuivre avec un revêtement noir mat d’émissivité $\epsilon = 0,95$, de diamètre $D = 150 \text{ mm}$ et d’épaisseur, $0,4 \text{ mm}$ équipé en son centre d’une thermistance Pt100 supposée à l’équilibre thermique avec le globe. Le globe noir a un temps de stabilisation typique de 20 minutes ([ISO 7726, 2001](#)). Il existe une variété de diamètres, matières et couleurs de thermomètres à globes

rapportés par Guo et al. (2020), Thorsson et al. (2007) et Kántor and Unger (2011). Les globes gris de petites tailles, (diamètres de 40 mm), atteignent leur régime thermique en moins de 5 minutes, mais la rapidité de leur temps de réponse se fait au détriment de la précision de leur mesure puisque leur sensibilité aux fluctuations du vent augmente (Thorsson et al., 2007). Guo et al. (2020) énoncent le compromis entre précision du thermomètre à globe ainsi que son temps de réponse, dans la mesure où ce dernier est inversement proportionnel au diamètre du globe.

Le développement de modèles numériques permet de s'affranchir des contraintes expérimentales, à l'instar du modèle RayMan proposé par Matzarakis and Rutz (2007) ou Solweig développé par Lindberg et al. (2008). T_{mrt} est simulée par des modèles nécessitant en entrée des paramètres microclimatiques (tels que température de l'air, humidité, nébulosité et turbidité atmosphérique), la localisation géographique et temporelle ainsi que les paramètres morphologiques urbains (facteur de vue du ciel, rapport de forme du canyon et hauteur des bâtiments). Si ces logiciels permettent de montrer l'anisotropie du rayonnement radiatif et ses variations spatiales en fonction de l'ombrage ou de l'exposition au soleil, Gál and Kántor (2020) relèvent des écarts entre T_{mrt} simulées et mesurées imputables à des biais d'estimation de la radiosité des surfaces environnantes au regard de la température de surface et de la réflexion du rayonnement aux courtes longueurs d'ondes.

2.2.2 Indicateurs de stress thermique

L'équilibre thermique de l'organisme avec son environnement dépend de multiples facteurs : activité métabolique, isolation par les vêtements, température de l'air, vitesse du vent, humidité relative et température radiante. En fonction des valeurs de ces facteurs, l'équilibre établi définit le confort thermique de l'organisme qu'il convient de quantifier. Potchter et al. (2018) recensent 165 indicateurs qui ont été développés dans l'optique de décrire les situations de confort thermique des citoyens en milieu extérieur, certains plus adaptés à des climats froids tels que l'indice de refroidissement éolien (Wind Chill Index) (Osczevski and Bluestein, 2005), d'autres à des climats chauds et humides tels que l'indice Humidex (Masterton and Richardson, 1979).

Quatre indicateurs bioclimatiques sont particulièrement utilisés aujourd'hui et présentent l'avantage de proposer une grille d'évaluation du confort thermique commune aux situations de stress thermique dues au froid et à la chaleur : le vote moyen prévisible, la température

équivalente physiologique, l'indice universel du climat thermique et l'ITS.

2.2.2.1 Le vote moyen prévisible

À l'origine développé pour le confort thermique en intérieur, le Vote Moyen Prévisible (Predicted Mean Vote - PMV) prédit, sur une échelle de 7 degrés allant de -3 (froid) à +3 (chaud), la réponse thermique moyenne d'une grande population (Fanger, 1972). Il s'agit donc d'un vote qualitatif, mais qui n'est pas comparable entre environnements climatiques différents.

2.2.2.2 Température équivalente physiologique

La Température Équivalente Physiologique (Physiological Equivalent Temperature - PET) a la dimension d'une température (°C) et permet de transposer le bilan thermique de l'organisme en milieu extérieur à un milieu intérieur (Höppe, 1999). Le calcul de PET se base sur le modèle d'équilibre énergétique de Munich pour les individus (MEMI), un modèle thermophysique de bilan thermique pour le corps humain (Höppe, 1993). Le modèle prend en compte la température de l'air, l'humidité, la vitesse du vent et la température moyenne radiante, ainsi que des paramètres thermophysiques tels que la résistance thermique des vêtements (estimée à $0,155 K \cdot m^2 \cdot W^{-1}$) et l'activité humaine (en W). L'échelle de température est ensuite divisée en 9 bandes de perception thermique (de "très froid" à "très chaud", respectivement inférieur à $-4^\circ C$ et supérieur à $41^\circ C$) correspondant chacune à un niveau de stress physiologique. L'indicateur a été modifié par Lin and Matzarakis (2008) afin de l'adapter aux conditions chaudes et humides. Ces deux indicateurs permettent d'évaluer le confort thermique en régime permanent (Chen and Ng, 2012) et nécessitent d'être raffinés afin de mieux rendre compte des réponses dynamiques de l'organisme aux stimuli environnementaux, comme dans le cas du passage d'un piéton dans une rue ensoleillée, proposé par Höppe (2002).

2.2.2.3 Indice universel du climat thermique

L'Indice Universel du Climat Thermique (UTCI), a été développé en 2009 en vertu d'une coopération internationale multidisciplinaire (thermophysologie humaine, modélisation

physiologique, météorologie et climatologie) dans le cadre d'une commission spéciale de la Société internationale de biométéorologie et de l'action européenne COST 730. L'indice prend en compte des variables physiques (température de l'air, température moyenne radiante, vitesse du vent, humidité) et permet de calculer une température équivalente en se basant sur des hypothèses sur le taux métabolique et l'habillement des personnes. La température équivalente UTCI est définie comme la température de l'air dans des conditions de référence qui provoquerait la même réponse thermophysologique que les conditions réelles (Błazejczyk et al., 2013).

Selon Błazejczyk et al. (2013), les hypothèses d'habillement et d'activité métabolique sont choisies de sorte à être représentatives de la majorité des personnes (une personne moyenne de 73,5 kg avec un taux de graisse corporelle de 14 %, marchant à 4 km/h, avec une activité métabolique de 135 W/m²). L'environnement de référence est défini de manière à être pertinent pour le large spectre de zones climatiques et est similaire à des conditions ambiantes en milieu intérieur : la vitesse de vent est fixée à 0,5 m/s (1,8 km/h) à 10 m de hauteur (environ 0,3 m/s (1 km/h) à hauteur de piéton) tandis que la température moyenne radiante est égale à la température de l'air. L'humidité relative est de 50 % ou bien la pression de vapeur d'eau est constante, fixée à 20 hPa au-dessus de 29 °C. Un modèle d'habillement basé sur les habitudes d'adaptation vestimentaire saisonnière des Européens est utilisé, ajusté selon la température de l'air et la vitesse du vent (Havenith et al., 2012).

Le calcul de l'UTCI est basé sur le modèle multinodal de Fiala et al. (2012) : le corps humain est modélisé par douze éléments sphériques et cylindriques constitués d'anneaux concentriques de tissus. Des parties individuelles du corps ou le corps entier peuvent être considérés. Le modèle tient compte de l'ensemble du bilan thermique humain et prédit les réactions thermorégulatrices, telles que la vasoconstriction et la vasodilatation, le frisson ou la transpiration (Błazejczyk et al., 2013). Le script de calcul rapide de l'UTCI développé par Bröde et al. (2012) est librement accessible en ligne et permet d'interpoler l'UTCI avec une fonction polynomiale d'ordre 6 de la température de l'air, de la vitesse du vent à 10 m, de l'humidité relative et de l'écart entre la température moyenne radiante et la température de l'air. Pour les mesures de vitesse du vent effectuées à une hauteur z différente de dix mètres, Bröde et al. (2012) fournissent une équation d'ajustement basée sur Oke and Cleugh (1987) :

$$v_{10m} = v_z \frac{\ln(10/0,01)}{\ln(z/0,01)} \quad (2.10)$$

où v_{10m} correspond à la vitesse de vent à 10 m et v_z la vitesse de vent mesurée à la hauteur z .

L'UTCI est divisé en 10 niveaux de stress thermique, pour les situations chaudes et froides. L'indice peut parcourir des valeurs au-delà de 46 °C et en deçà de -40 °C correspondant à des états de chaleur extrême et de froid extrême. La catégorie de neutralité thermique se situe entre 9 °C et 25 °C et permet d'adapter l'UTCI à des études de confort thermiques pour différentes zones climatiques (Blazejczyk et al., 2012).

2.2.2.4 Index de stress thermique

En complément des indices mentionnés plus haut, nous pouvons aussi citer l'index de stress thermique (Index of thermal stress - ITS) défini par Givoni (1963), qui figure parmi les premiers indicateurs de stress thermiques basés sur la réponse physiologique de l'organisme aux échanges thermiques avec son environnement (Havenith and Fiala, 2015). L'ITS quantifie le taux de transpiration nécessaire à l'organisme afin de maintenir un état d'équilibre thermique (Coccolo et al., 2016). L'indicateur est régi par l'équation qui suit (Erell et al., 2012) :

$$ITS = E * \left(\frac{1}{f}\right) \quad (2.11)$$

où E correspond au taux de rafraîchissement par sudation nécessaire pour atteindre l'équilibre thermique (en W) et f à l'efficacité de rafraîchissement par sudation (sans dimension), grandeur empirique liée à la vitesse de vent, l'humidité relative et la température de l'air. Cet indicateur est une caractérisation simplifiée directe des échanges entre le corps humain et son environnement, sans conversion en température équivalente, et montre une forte corrélation avec le confort thermique ressenti par les piétons (Pearlmutter et al., 2014).

L'établissement du bilan thermique d'un volume de canopée urbaine permet d'identifier les termes régissant les échanges thermiques entre l'atmosphère et les différentes surfaces urbaines. Ces termes influencent de manière directe ou indirecte le bilan thermique humain. À titre d'exemple, le terme convectif H affecte la température de l'air et ainsi les échanges convectifs du piéton, le terme de chaleur latente lE l'humidité relative qui affecte l'efficacité de la transpiration, la radiosité de chaque surface $S_{up} + L_{up}$ impacte le bilan radiatif du piéton. Le flux de chaleur par conduction joue quant à lui un rôle significatif dans la dynamique

de stockage de chaleur des matériaux qui sera libérée dans la nuit et affectera le terme convectif H nocturne. Ainsi, l'atténuation de la chaleur en ville passe par l'amélioration de l'environnement radiatif du piéton qui est étroitement lié aux bilans de surface et de volume urbains. L'amélioration du bilan thermique des surfaces a été l'objectif principal des premières stratégies de rafraîchissement qui visaient à atténuer l'ICU et par conséquent les températures de l'air (Akbari and Kolokotsa, 2016; Taha, 1997). Aujourd'hui, la lutte contre la chaleur en ville nécessite de s'intéresser au stress thermique ressenti par les riverains et en particulier d'intégrer l'impact des stratégies de rafraîchissement sur la température moyenne radiante (Martilli et al., 2020; Santamouris, 2020; Coccolo et al., 2016).

2.3 Stratégies de rafraîchissement urbain

Le bilan thermique en milieu urbain permet de dégager des leviers d'atténuation de la surchauffe urbaine. Nous pouvons les classer en solutions grises (relatives aux infrastructures urbaines), solutions basées sur la nature, ou encore solutions douces, liées aux usages et à la gestion urbaine (Leroy et al., 2021). Ces solutions sont mises en œuvre par l'entremise du développement de différentes techniques de rafraîchissement : modification des propriétés thermiques et radiatives des revêtements urbains, installation de mobilier urbain, végétalisation, efficacité et optimisation des procédés énergétiques, ...

Santamouris and Kolokotsa (2016) recensent 4 groupes de techniques de rafraîchissement. Le premier groupe vise à diminuer l'absorption du rayonnement solaire dans l'environnement urbain, en utilisant des matériaux dits frais. Le deuxième groupe vise à augmenter l'évapotranspiration en milieu urbain en adoptant notamment des stratégies de végétalisation. Le troisième groupe vise à dissiper la chaleur en excès du milieu urbain via des puits de chaleur à l'instar des puits canadiens. Le dernier ensemble de techniques consiste à diminuer les rejets de chaleur anthropiques dans l'atmosphère en limitant par exemple l'usage des climatiseurs.

Dans le cadre du projet OASIS, les travaux d'aménagement affichent trois objectifs opérationnels : la désimperméabilisation des revêtements de sol des cours d'école, l'installation de mobilier urbain co-conçu avec les élèves des cours OASIS et l'augmentation de la fraction végétalisée de la surface de la cour. Au vu des objectifs affichés, nous nous attarderons sur les deux premiers mécanismes, à savoir réduction des gains solaires et augmentation de l'évapotranspiration, qui restent les techniques les plus prometteuses en termes de rafraî-

chissement passif des espaces urbains extérieurs (Akbari and Kolokotsa, 2016; Taleghani et al., 2014b; Gaitani et al., 2011).

2.3.1 Solutions grises

Les solutions grises visent à optimiser les propriétés des infrastructures urbaines, notamment les revêtements urbains et le mobilier urbain. Pour les cours OASIS, nous pouvons retenir l'ajout de dispositifs d'ombrages (ombrières, voiles...) ainsi que la mise en œuvre de "matériaux frais" lors de la rénovation du revêtement de sol. Ces matériaux sont conçus de sorte à réduire leur température de surface par rapport à celle des matériaux de revêtement traditionnels afin de limiter l'échauffement atmosphérique par convection (Hendel, 2020). Les matériaux frais peuvent être implémentés en tant que revêtements de sol, façades ou toitures et ont été l'objet d'études numériques et expérimentales à l'échelle du laboratoire et du terrain (Takebayashi and Moriyama, 2012; Parison et al., 2020a; Hendel et al., 2018; Mohajerani et al., 2017). Nous nous limiterons aux revêtements frais minéraux par la suite.

2.3.1.1 Revêtements réfléchissants

Les matériaux réfléchissants ont une réflectivité supérieure à celle de leurs homologues standards, quantifiée par leur albédo. Cette propriété permet de réduire les gains solaires par absorption et de réduire ainsi leur température de surface. L'albédo d'une surface correspond à la proportion de rayonnement solaire réfléchi par celle-ci. Par conséquent, les efforts de recherche se concentrent sur l'augmentation de la réflectivité solaire des matériaux dans la bande de courte longueur d'onde. Parison (2020) relève que la diminution du piégeage radiatif se fait, outre l'augmentation d'albédo, par l'augmentation de l'émissivité qui permet d'amplifier le refroidissement radiatif et, en conséquence, de réduire les températures de surface. C'est en général le cas des matériaux utilisés en milieu urbain (asphalte, béton, granit) à l'exception des matériaux métalliques, à l'instar des toitures zinguées des bâtiments haussmanniens parisiens.

L'albédo de l'asphalte est compris entre 0,02 et 0,2 en fonction du vieillissement et de l'encrassement de la surface, tandis que l'albédo du béton varie entre 0,2 et 0,35 et diminue avec le temps contrairement à l'asphalte (Mohajerani et al., 2017; Santamouris, 2013). L'albédo des revêtements peut être augmenté par un choix de couleur de revêtement plus claire, ou

en utilisant des peintures réfléchissantes (Akbari and Kolokotsa, 2016). L'augmentation d'albédo entraîne une réduction des températures de surface de l'ordre de la dizaine de degrés lors de conditions estivales anticycloniques qui permet de limiter l'échauffement atmosphérique (Yang et al., 2015). Santamouris (2015) estime qu'une augmentation de 0,1 d'albédo à l'échelle de la ville permet d'abaisser la température moyenne ambiante de 0,3 K et la température maximale ambiante de 0,9 K.

L'expérimentation des toitures réfléchissantes s'est avérée efficace en termes de réduction de la température de l'air avec des observations allant entre 0,25 °C et 1,84 °C selon Mohegh et al. (2018). En simulant un scénario de surfaces réfléchissantes et émissives, Météo-France and Cstb (2012) constatent une réduction des températures de l'air à 2 m de l'ordre de 1 °C, de jour comme de nuit à Paris pendant la canicule de 2003.

En termes de stress thermique, Taleghani (2018a) souligne que les toitures réfléchissantes ont peu d'impact sur le confort des piétons. Errell et al. (2014) observent en outre que l'augmentation de l'albédo des revêtements de sol et des façades peut dégrader le confort de ces derniers. Le rayonnement solaire réfléchi par les matériaux réfléchissants peut de même être absorbé par les bâtiments environnants augmentant ainsi les températures d'intérieur (Yaghoobian and Kleissl, 2012).

2.3.1.2 Revêtements drainants

Les revêtements peuvent être traités et conçus de sorte à retenir les eaux pluviales et par la suite réduire les températures de surfaces par dissipation de chaleur latente due à l'évaporation. L'effet rafraîchissant de ces matériaux est directement proportionnel à la quantité d'eau évaporée, qui doit être proche de la surface (Nemirovsky et al., 2013; Broadbent et al., 2018). Les matériaux perméables présentent une structure poreuse propice à l'infiltration de l'eau, de valeur de 15 à 30 % (Qin, 2015). Humidifiés, les revêtements perméables présentent des réductions de températures de surface par évaporation allant jusqu'à 15 °C (Kubo et al., 2006; Qin et al., 2018). Ces matériaux présentent des performances thermiques intéressantes et réduisent le ruissellement d'eaux pluviales, mais nécessitent un entretien régulier pour éviter l'obstruction des pores.

Similaire au mécanisme de refroidissement par évaporation, l'arrosage urbain de surfaces perméables ou imperméables constitue une solution ponctuelle de rafraîchissement et permet

de réduire les températures de surfaces de l'ordre de 10 à 15 °C (Hendel, 2020). Parison (2020) observe des réductions de température de l'air de l'ordre de 1 °C et une amélioration globale du confort thermique des piétons avec une réduction de l'UTCI proche de 3 °C, malgré une augmentation locale de l'humidité relative. Les performances de rafraîchissement sont aussi dépendantes de la proportion de surface arrosée et de l'optimum de débit d'arrosage, lui-même lié au type de revêtement Parison et al. (2020b). D'autres types de matériaux sont aussi développés avec adjonction de matériaux à changement de phase (Royon et al., 2014), ou conçus de sorte à collecter de l'énergie solaire ou mécanique (Guo and Lu, 2017).

L'usage des matériaux frais permet de réduire les températures de l'air en minimisant les gains solaires d'une surface ou en maximisant le flux de chaleur latent par évapotranspiration. L'usage de matériaux perméables présente des co-bénéfices dans la mesure où ces derniers permettent une meilleure gestion des eaux pluviales (Mohajerani et al., 2017). Toutefois, les bénéfices des matériaux réfléchissants sont à nuancer au regard de l'amélioration du stress thermique, puisque ces derniers contribuent à l'augmentation de la température moyenne radiante par la réflexion du rayonnement solaire (Taleghani et al., 2014b). Qin (2015) souligne la nécessité d'approfondir les recherches concernant l'impact des matériaux sur le stress thermique des piétons ainsi qu'une meilleure compréhension du bilan thermique des surfaces, ainsi que l'effet du vieillissement des matériaux sur les performances thermiques. Au vu des intensités de l'échauffement prévu, Nazarian et al. (2022) relèvent l'importance du développement de techniques permettant de réduire les températures ambiantes maximales jusqu'à 5 °C. Parmi ces pistes figurent les matériaux photoniques, fluorescents, les peintures thermochromes, ainsi que l'approfondissement des solutions basées sur la nature.

2.3.2 Solutions basées sur la nature

Parmi les surfaces urbaines, les surfaces végétales sont particulièrement préconisées dans le cadre du rafraîchissement urbain (Norton et al., 2015). Le ratio de Bowen $\frac{H}{lE}$ représente le rapport pour une surface du transfert thermique par convection H sur le flux de chaleur latente lE (Nichols and Cuenca, 1993). Dans le cas des surfaces végétales, ce dernier est inférieur à 1 (Oke et al., 2017). Cela signifie que les flux incidents sont majoritairement dissipés par évapotranspiration plutôt que convection (Takebayashi and Moriyama, 2012). Cette diminution du flux de chaleur sensible est à l'origine d'une réduction des températures de l'air au sein des parcs allant de 0,5 à 10 °C durant la nuit et de 0,3 à 7 °C en journée

(Santamouris et al., 2017).

Les stratégies de végétalisation sont diverses : création de toitures végétalisées, plantation d'arbres, création de parcs et jardins. En fonction des solutions implémentées, l'impact microclimatique peut s'étendre de l'échelle du piéton à celle de la ville et permet d'améliorer le confort thermique à l'intérieur des bâtiments (Musy et al., 2012). Toutefois, les performances rafraîchissantes des solutions basées sur la nature sont étroitement liées à la disponibilité en eau (Musy et al., 2014).

2.3.2.1 Matériaux verts

Les matériaux "verts", à l'instar des pelouses et des façades végétalisées, permettent un rafraîchissement par évapotranspiration. Ces revêtements végétaux peuvent être mis en œuvre au sein des zones piétonnes et présentent des réductions de température de surface variant entre 20 et 25 °C, avec des valeurs maximales pour des pelouses arrosées (Takebayashi and Moriyama, 2012). La performance thermique de ces matériaux est toutefois totalement dépendante de la disponibilité en eau (Parison et al., 2020a).

Dans le cadre du projet EPICEA mené par Météo-France and Cstb (2012), différents scénarios d'adaptation du territoire parisien à des canicules comparables à celle de 2003 ont été testés, notamment un scénario de verdissement avec arrosage ou non de la végétation (Centre National de Recherches Météorologiques, 2012). Les simulations visant à évaluer l'implémentation de surfaces végétales basses montrent des réductions de température de l'air à 2 m de l'ordre de 1 °C avec des pics de réduction de 5 °C en présence d'irrigation, tandis que les réductions étaient négligeables en absence d'irrigation. La mise en œuvre de toitures végétalisées permet de diminuer efficacement la consommation énergétique des bâtiments, mais n'a pas d'effet sur les températures de l'air au niveau de la rue (de Munck et al., 2018).

Les effets microclimatiques de la végétation sont différenciés selon qu'il s'agit d'un arbre, d'une pelouse ou d'une pelouse sous un arbre avec le rafraîchissement maximal obtenu en combinant végétation basse et haute (de Munck et al., 2018; Santamouris et al., 2017; Robineau et al., 2022; Rahman et al., 2017).

2.3.2.2 Arbres

Les mécanismes à l'origine du rafraîchissement des arbres sont multifactoriels et étroitement liés au milieu urbain considéré (Shashua-Bar et al., 2010; Krayenhoff et al., 2021). En effet, l'arbre crée de l'ombrage en faisant notamment obstruction au rayonnement solaire (Shashua-Bar et al., 2009; Armson et al., 2012). Outre la réduction de rayonnement aux courtes longueurs d'onde, l'arbre se démarque par de faibles émissions thermiques, dans la mesure où la température de surface de ses feuilles est régulée par rapport à la température de l'air (Lindberg and Grimmond, 2011a; Kántor et al., 2018). Cela a pour conséquence de réduire fortement la température moyenne radiante et par la suite d'améliorer le confort thermique des passants ombragés avec des réductions d'UTCI allant jusqu'à 8 °C et de température de surface de revêtement de l'ordre de 18 °C (Coutts et al., 2016b; Mballo et al., 2021). Cet effet est toutefois variable selon l'essence de l'arbre, sa disposition et surtout en fonction de la disponibilité en eau du milieu où il se trouve (Gillner et al., 2015; Morakinyo et al., 2020; Morille and Musy, 2017). En cas de stress hydrique, l'évapotranspiration est ralentie, le feuillage n'est plus capable de se thermoréguler correctement et l'arbre devient source de chaleur par rayonnement, dégradant ainsi le confort thermique du piéton (Huang et al., 2022; Kjelgren and Montague, 1998; Gräf et al., 2021). La nuit, la géométrie et l'humidité du sol sont les facteurs dominants du mécanisme de rafraîchissement, avec des efficacités variables d'une étude à l'autre, notamment entre les performances rafraîchissantes d'un arbre en milieu imperméable ou dans un parc (Spronken-Smith and Oke, 1998; Rahman et al., 2017; Cohen et al., 2012). La quantification de l'effet rafraîchissant de l'arbre vis-à-vis du stress hydrique reste un sujet à approfondir aussi bien par des approches numériques qu'expérimentales. Les résultats varient considérablement en fonction de la région d'étude, des techniques de mesures de l'évapotranspiration et de l'essence étudiée et de l'environnement immédiat de l'arbre étudié (Shashua-Bar et al., 2011; Lin and Lin, 2010; Shashua-Bar and Hoffman, 2004; Mballo et al., 2021; Churkina et al., 2015; Rahman et al., 2020).

2.3.2.3 Parcs et jardins

Akbari and Kolokotsa (2016) désignent par îlot de fraîcheur l'effet des parcs et des jardins avec des écarts moyens de température de l'air de l'ordre de 1 °C en journée rapportés par Bowler et al. (2010) et des températures de surface de pelouse réduites de 24 °C par rapport à des matériaux de revêtements traditionnels (Armson et al., 2012). Ces îlots permettent

de rafraîchir l'air environnant dans un rayon pouvant atteindre la centaine de mètres en fonction de la taille du parc et de la configuration des bâtiments (Skoulika et al., 2014; Zhang et al., 2022; Yu and Hien, 2006). La réduction des températures de l'air est dépendante de la zone climatique considérée et des conditions synoptiques telles que la direction et les vitesses de vent, mais aussi des éventuelles périodes de sécheresse (Zhang et al., 2019; Spronken-Smith and Oke, 1999; Geng et al., 2022). De nombreuses études visent aujourd'hui à déterminer le lien entre taille du parc et les effets d'échelle, afin d'optimiser les stratégies de création de parcs (Aram et al., 2019; Bernard et al., 2018; Ernst et al., 2022). Les parcs et jardins permettent de gérer les eaux pluviales et présentent, outre la réduction du stress thermique des piétons, des services systémiques en terme d'amélioration de la qualité de l'air et de préservation de la biodiversité (Ferrini et al., 2020).

Au-delà des parcs et des jardins, les solutions basées sur la nature visent à réintégrer la végétation en milieu urbain en tirant le meilleur profit de l'espace disponible (Dorst et al., 2019). Marando et al. (2022) trouvent qu'une fraction de 16 % d'arbres est nécessaire pour réduire les températures estivales d'1 °C en moyenne et remarquent que presque 32 % des espaces urbains européens sont en deçà de cette fraction arborée.

Les techniques d'atténuation de la chaleur permettent aujourd'hui de réduire les températures ambiantes maximales de 2,5 °C à 3 °C. Les toitures, squares et façades végétalisées, permettent de résoudre les problèmes de la pression foncière dans les villes vis-à-vis de la création d'espaces verts urbains, mais posent aussi la question des méthodologies de mesure et d'évaluation de leur intégration dans le milieu urbain (Labib et al., 2020; Bouzouidja et al., 2021b; Ernst et al., 2022).

2.4 Évaluation du rafraîchissement

La performance des techniques décrites a été évaluée individuellement, généralement en laboratoire ou par simulation numérique. Cependant, les stratégies déployées sur le terrain combinent généralement plusieurs de ces techniques dans des contextes qui peuvent être assez différents de ceux des études réalisées. L'évaluation in situ des stratégies adoptées est donc un enjeu important pour les collectivités territoriales. La mise en place des stratégies de rafraîchissement doit donc s'accompagner d'un suivi qui permette d'évaluer les avantages et inconvénients des techniques implémentées au regard de l'atténuation de la chaleur en ville et du stress thermique des usagers de l'espace considéré afin d'optimiser leur implémentation

(Kaloustian et al., 2018; Bowler et al., 2010).

L'étude de l'impact microclimatique de techniques de rafraîchissement urbain est le sujet de nombreux travaux à différentes échelles du territoire. Ces travaux d'évaluation sont numériques (Saneinejad et al., 2014) ou expérimentaux (Kyriakodis and Santamouris, 2018), étayés par des campagnes de mesure fixes (Parison et al., 2020b) ou mobiles (Leconte et al., 2015b). Nous nous proposons ici de discuter certaines méthodologies d'évaluation des stratégies de rafraîchissement mises en œuvre par la communauté scientifique.

Nazarian et al. (2022) répertorient les métriques associées à la surchauffe urbaine et les méthodologies de mesure correspondantes (cf. Tableau 2.1).

TABLEAU 2.1 – D'après Nazarian et al. (2022), différentes échelles d'observation et méthodologies associées pour l'évaluation de la surchauffe urbaine

| Echelle | Grandeur | Méthodologie |
|---------|---|---|
| Ville | Température de surface | Réseau de stations météorologiques |
| | Température de l'air à 2m | Télédétection |
| | Variabilité des températures intra-urbaines | Mesures mobiles |
| | | Modélisation |
| Rue | Température de la canopée | Stations météorologiques fixes et mobiles |
| | Température moyenne radiante | Mesures du rayonnement |
| | Confort thermique | Modélisation |
| Piéton | Confort thermique | Capteurs individuels portatifs |
| | Température ressentie | Modélisation |

Historiquement, la quantification de la surchauffe urbaine se faisait par le biais des températures de l'air ou de surface mesurées au niveau de stations météorologiques ou par télédétection afin d'évaluer l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (Cantat, 2004; Muller et al., 2013; Voogt and Oke, 2003). Toutefois, la faible densité des réseaux de stations ne parvient pas à saisir les variabilités spatiales des températures inhérentes à chaque canyon urbain. Des mesures mobiles sont donc nécessaires afin d'obtenir une échelle spatiale plus raffinée (Smoliak et al., 2015; Coutts et al., 2016a). De même, l'évaluation du stress thermique va au-delà de la mesure de la température de l'air et vise notamment à saisir les variations de la température moyenne radiante telle que décrite à la section 2.2. Afin de pallier les difficultés de mise en place des méthodologies de mesures en conditions réelles, les

simulations permettent de modéliser à différentes échelles les paramètres microclimatiques (Masson, 2000; Nazarian et al., 2017).

L'évaluation de l'espace urbain avant et après application de la stratégie de rafraîchissement s'intéresse donc à la comparaison des paramètres microclimatiques et par conséquent du stress thermique des usagers avant et après intervention. Au regard de l'atténuation du stress thermique, les grandeurs d'intérêt sont la température de l'air, l'humidité, la vitesse de vent et la température moyenne radiante, cette dernière étant le facteur prédominant du stress thermique du piéton. Nous nous intéresserons aux méthodologies d'évaluation basées sur les mesures fixes, mobiles et les simulations numériques.

2.4.1 Simulations

Les modèles numériques de simulation couvrent une large variété de résolutions spatiales, allant de la centaine de kilomètres pour les modèles de circulation globales, à la centaine de mètres pour les modèles à l'échelle locale plus adaptés à la taille d'une agglomération urbaine (Michau et al., 2023; Villefranque et al., 2022; Jacob et al., 2020). Le projet OASIS vise à aménager des cours d'écoles de surfaces comprises entre 500 et 2800 m². Cet ordre de grandeur est petit comparé à la résolution des mailles de calcul des modèles à l'échelle locale, à l'instar du modèle TEB (Town Energy Balance) développé par Masson (2000), même si de récents développements permettent de raffiner la résolution spatiale de ce dernier (Bernard et al., 2022; Le Mentec et al., 2022).

Les simulations numériques ont par rapport aux évaluations de terrain l'avantage de ne pas dépendre des conditions météorologiques réelles et de faciliter le contrôle des paramètres étudiés ainsi que de pouvoir combiner différentes techniques et d'évaluer leur impact en prenant compte des projections climatiques futures (Saneinejad et al., 2014; Viguié et al., 2020). Toutefois, la modélisation s'appuie sur des hypothèses, abstractions et simplifications des interactions en milieu urbain et nécessite de confronter les résultats à des mesures de terrain (Krayenhoff et al., 2021). L'échelle microclimatique est simulée pour des domaines de l'ordre du km avec des mailles de 1 à 100 m. Différents modèles et méthodes ont été développés à l'instar d'Envi-MET, SOLENE-microclimat, ou Solweig de sorte à décrire et à étudier les échanges énergétiques à l'échelle du canyon urbain et du bâtiment, notamment l'impact des stratégies de rafraîchissement, telle que l'augmentation de la réflectivité des surfaces et des fractions végétalisées, sur la température moyenne radiante et le stress

thermique du piéton (Crank et al., 2018; Morille and Musy, 2017; Lindberg et al., 2008). L'évaluation de l'impact des matériaux est très répandue avec des résultats bien implémentés et calibrés : un incrément de 0,1 d'albédo des surfaces permet un rafraîchissement surfacique de 0,1 à 6 °C mais peut dégrader l'environnement radiatif du piéton (Krayenhoff et al., 2021; Erell et al., 2014; Schrijvers et al., 2016). L'évaluation des solutions basées sur la nature reste un enjeu critique, en ce qui concerne notamment la description des types de végétation, les couplages des modèles hydrologiques et atmosphériques ainsi que l'impact écosystémique des arbres en milieu urbain (Bernard et al., 2022; Bouzouidja et al., 2021b; Ernst et al., 2022). Krayenhoff et al. (2021) soulignent l'importance des métadonnées des simulations, notamment en ce qui concerne la taille du domaine simulé, les forçages météorologiques, la classe LCZ de l'îlot simulé, les propriétés des matériaux, le ratio de surface modifiée ou végétalisée afin d'améliorer l'interprétation et la comparabilité des résultats. Il insiste de même sur la nécessité de produire des données réelles afin de valider et de calibrer les simulations.

2.4.2 Mesures fixes

Il y a relativement moins d'études expérimentales visant à évaluer le rafraîchissement : Santamouris et al. (2017) recensent moins de 10 études expérimentales parmi 220 projets de grande envergure identifiés. Ces dernières sont toutefois essentielles pour confronter les résultats des simulations à la réalité. Les méthodologies d'évaluation de terrain consistent souvent à déployer un réseau de stations météorologiques afin d'assurer une continuité des observations dans le temps. Alternativement ou en complément, des mesures mobiles sont réalisées afin de saisir les variations spatiales d'ombrage, de températures de l'air et de température moyenne radiante. L'étude de l'impact des matériaux se fait par le biais de démonstrateurs et permet de comparer les performances thermiques de plusieurs revêtements (Takebayashi and Moriyama, 2012; Bouzouidja et al., 2021b). L'instrumentation de chaussées intégrées dans la ville permet quant à elle d'évaluer les performances thermiques et micro-climatiques des revêtements à l'usage ainsi que l'effet combiné de plusieurs techniques, à l'instar de Chanial et al. (2022b) qui étudient l'impact combiné de matériaux innovants et de l'arrosage urbain. La mise en place d'un réseau de mesure urbain permet de récolter un volume important de données temporellement résolues (données quotidiennes enregistrées à une minute ou une heure d'intervalles) sur une longue durée (Masson et al., 2008; Parison et al., 2020a). Muller et al. (2013) insistent de même sur la planification du déploiement du

réseau en collaboration avec les collectivités. Ceci permet d'assurer une maintenance et une pérennité du réseau qui est essentielle à la production de jeux de données fiables qui constitueront des jeux de données de base.

2.4.3 Mesures mobiles

D'autres méthodes d'évaluation du rafraîchissement utilisent des mesures mobiles réalisées sur des périodes d'études courtes et déterminées qui permettent de capturer à l'échelle du piéton les variations d'ombrage (Pioppi et al., 2020; Middel and Krayenhoff, 2019). Les mesures mobiles peuvent être motorisées, conduites à vélo ou portées par le piéton et se limitent pour la plupart à la mesure de la température de l'air, de l'humidité et de la vitesse de vent (Mohegh et al., 2018; Leconte et al., 2015b; Tsin et al., 2016). Les méthodologies de prises de mesures sont variées : Sun (2011) utilise la technique du "stop & go", en suivant un itinéraire prédéterminé avec des arrêts pour les mesures, tandis que Pigliautile and Pisello (2018) privilégient la mesure continue lors d'une balade mobile selon un itinéraire donné. Quel que soit le mode de mesures, une correction temporelle doit être appliquée afin d'ajuster les mesures par rapport à la vitesse du véhicule ou du piéton et afin de tenir compte de l'évolution des conditions climatiques au cours de la campagne de mesure (Seidel et al., 2016). Hüb et al. (2015) utilisent une correction incluant une moyenne centrée glissante et un modèle de retard de réponse afin de tenir compte de l'inertie du capteur de température de l'air, Leconte et al. (2015a) étudient l'impact de la vitesse du véhicule sur les vitesses de vent et les capteurs de température. Outre les températures de l'air, l'humidité relative et le vent, Middel and Krayenhoff (2019) étudient la variation de SVF au cours des balades mobiles ainsi que la température moyenne radiante, tandis que Taleghani (2018b) complète ses mesures avec des thermographies. Kousis et al. (2022) préconisent une standardisation des protocoles de mesure, notamment en ce qui concerne les hauteurs de mesures, la fréquence d'échantillonnage des capteurs et les durées de collecte de données. L'accent est mis sur la nécessité d'aller au-delà de la température de l'air et de l'humidité pour évaluer le confort du piéton.

L'évaluation de l'espace urbain avant et après application de la stratégie de rafraîchissement nécessite toutefois d'assurer une comparabilité des données enregistrées lors de deux périodes différentes à des années d'intervalles. Hendel et al. (2016) remarquent que la simple comparaison d'une situation avant et après application de la stratégie de rafraîchissement

induit des biais d'évaluation si les sites présentent des différences préexistantes liées à la configuration urbaine. [Parison et al. \(2020b\)](#) développent dans le cadre de l'approche de [Lowry \(1977\)](#) une méthodologie permettant de déterminer ces différences afin de mieux s'en affranchir. Les réseaux de mesures fixes denses et les mesures mobiles sont complémentaires dans le cadre d'une évaluation temporellement et spatialement résolue de l'environnement microclimatique du piéton. [Nazarian et al. \(2022\)](#) soulignent l'importance de l'évaluation expérimentale des projets de recherche de terrain pour la mise en œuvre des techniques de rafraîchissement développées. Leur test en conditions réelles permet d'appréhender leur impact spécifique et d'éventuelles pistes d'amélioration, mais cette approche nécessite de s'appuyer sur des protocoles définis et reproductibles.

La mise en place de méthodologie d'évaluation du rafraîchissement s'inscrit dans le cadre des services climatiques et répond à l'objectif de création de données et d'outils afin d'améliorer la compréhension du climat urbain en vue d'accompagner les collectivités locales dans l'élaboration des stratégies d'adaptation aux vagues de chaleur.

2.5 Services climatiques

Les services climatiques sont définis comme « l'ensemble des informations et des prestations qui permettent d'évaluer et de qualifier le climat passé, présent ou futur, d'apprécier la vulnérabilité des activités économiques, de l'environnement et de la société au changement climatique et de fournir des éléments pour entreprendre des mesures d'atténuation et d'adaptation » ([Allenvi, 2014](#); [Commission et al., 2015](#)) Les services climatiques ont vocation à accompagner les collectivités dans l'élaboration de stratégies de résilience face aux défis climatiques à venir. Ils recouvrent plusieurs actions telles que la production et l'agrégation de données à l'instar des observations météorologiques et des données socio-économiques, la mise en place de projets de recherche, modélisation et prévisions climatiques ou encore le transfert de connaissances de la communauté scientifique aux collectivités ([Bigot et al., 2017](#)). Nous nous intéressons particulièrement à la création des données climatiques urbaines ainsi qu'à l'élaboration d'outils d'aide à la décision destinés aux collectivités.

2.5.1 Données du climat urbain

Le climat urbain est propre à chaque ville considérée (Bigot et al., 2017). La production de données spécifiques au site étudié est donc nécessaire. Hebbert (2014) cite le Klimaatlas de Stuttgart, développé en 1992 pour la collectivité de Stuttgart, synthétisant sur une carte des mesures de pollution urbaine, des thermographies, des vitesses du vent récoltées par un réseau de stations météorologiques. Cet atlas climatique tel que désigné par Ulrich Reuter donnait aux décideurs un aperçu complet de la situation microclimatique de la ville et leur permettait d'établir des stratégies de protection environnementale adaptées.

La méthodologie du Klimaatlas a été reprise et transposée à d'autres villes sur d'autres thématiques du climat urbain, en particulier l'îlot de chaleur urbain et le confort thermique des piétons (Chen and Ng, 2012).

TABLEAU 2.2 – Stratégies et actions pour l'amélioration du climat urbain, d'après Ren et al. (2011). L'objectif est d'atténuer l'effet d'îlot de chaleur urbain, d'améliorer la ventilation urbaine, la qualité de l'air et le confort thermique.

| Paramètre | Stratégie et plan d'action | Echelle d'intervention opérationnelle | Echelle de l'impact climatique |
|-------------|---|---|--------------------------------|
| Albedo | rafraîchissement des façades et des revêtements de sol rafraîchissement des toitures revêtements perméables | matériau intervention de surface | méso, micro |
| Végétation | végétalisation parcs et espaces verts trames bleues et vertes | matériau intervention de surface aménagement urbain | méso, micro |
| Ombrage | orientation des rues ratio H/W avenues plantées d'arbres ombrières | architecture des bâtiments aménagement urbain | méso, micro |
| Ventilation | emprises bâties ratio H/W orientation des rues | planification urbaine architecture des bâtiments aménagement urbain | méso, micro |

La mise en exergue de ces informations au sein d'une carte climatique permet de spatia- liser l'information et élaborer des solutions adaptées à chaque espace.

Le Tableau 2.5.1 répertorie les leviers d'action d'ordre physique au sein du milieu urbain considéré. Il est intéressant de noter que les interventions peuvent avoir des effets à l'échelle locale ou globale du milieu urbain, à court, moyen et long terme. À titre d'exemple, l'amélioration de la ventilation urbaine nécessite une réflexion bien en amont de la construction, en considérant un canyon urbain, tandis que la modification d'albédo des surfaces peut advenir bien après la construction de l'agglomération, sur des zones très réduites, de l'ordre

du mètre carré. Ces échelles temporelles et spatiales doivent être prises en compte lors de la construction d'une carte climatique car elles permettent de tenir compte des contraintes opérationnelles dans le cadre de mise en place des stratégies de rafraîchissement.

Différentes initiatives basées sur les systèmes d'information géographique (SIG) ont depuis été développées, en tentant d'agréger aux données géographiques et morphologiques des données météorologiques de sorte à pouvoir créer des cartes analytiques multi-échelles. À titre d'exemple, le projet WUDAPT développé par [Ching et al. \(2016\)](#) vise à établir une base de donnée universelle des zones climatiques locales. [Touati et al. \(2020\)](#) développent un module géomatique permettant de générer des cartes prédictives de températures de l'air, tandis que [Lindberg et al. \(2018\)](#) proposent le module UMEP pour l'étude du confort thermique. Ces projets offrent des résolutions spatiales de l'ordre de la centaine de mètres pouvant être raffinées jusqu'au mètre. Les données SIG constituent aujourd'hui un niveau de données supplémentaire qui permet de raffiner les modèles microclimatiques et d'améliorer leur prédiction ([Pigeon et al., 2008](#); [Bechtel et al., 2019](#); [Demuzere et al., 2022](#)). La construction de ces jeux de donnée fait aujourd'hui partie des enjeux clés de la recherche action multidisciplinaire dans le cadre de l'adaptation au changement climatique ([Muller et al., 2013](#); [Pioppi et al., 2020](#); [Masson et al., 2020](#); [Brasseur and Gallardo, 2016](#)).

2.5.2 Outils pour l'aide à la décision

À l'échelle de la ville, le microclimat urbain a des répercussions sur le confort thermique, la santé physique et mentale des riverains et piétons, la pollution et la consommation d'énergie des bâtiments ([Lin and Lin, 2010](#); [Santamouris, 2020](#); [Li et al., 2019](#); [Nazarian and Lee, 2021](#)). Ces effets sont modulés par des facteurs additionnels tels que l'âge, le revenu ou la condition physique des populations concernées ([Reid et al., 2009](#); [Morabito et al., 2015](#); [Nazarian and Lee, 2021](#); [Macintyre et al., 2018](#)). L'agrégation de ces données aux cartes climatiques permet de construire des indicateurs de vulnérabilités des populations et de mieux cartographier les risques urbains ([Pinson et al., 2016](#); [Krstic et al., 2017](#); [Ho et al., 2018](#)). Ces indicateurs permettent d'optimiser les interventions opérationnelles, à l'instar de la cartographie d'arrosage urbain développée par [Hendel et al. \(2020\)](#) pour la Ville de Paris et d'ancrer les stratégies de rafraîchissement urbain dans des stratégies d'adaptation plus globales aux aléas climatiques à venir ([Viguié et al., 2020](#); [Bierwagen et al., 2010](#)). La mise à disposition de l'information climatique pour les collectivités et les décideurs est un enjeu

important des services climatiques (Eliasson, 2000; WMO, 2019; Lefebvre et al., 2022).

L'émergence des services climatiques est intrinsèquement multidisciplinaire et nécessite, outre la construction de bases de données pertinentes, un effort de la part des acteurs de la recherche afin de diffuser des données complexes et de traduire des principes climatiques abstraits en recommandations spatiales concrètes (Dumas et al., 2021). Ces outils mobilisent plusieurs types de données, tels que les morphologies urbaines, les données climatiques, démographiques, socio-économiques, qui ne sont pas toujours facilement disponibles faute de moyens ou de recherche (Baklanov et al., 2018; Hidalgo et al., 2019). La conception d'outils faciles à appréhender et nécessitant peu de moyens est donc essentielle pour accompagner les collectivités (Mills, 2014; Grimmond et al., 2020).

Le chapitre 2 a permis d'aborder les stratégies de rafraîchissement aujourd'hui mises en œuvre afin d'améliorer le confort thermique des piétons en milieu urbain. L'étude et l'observation du climat urbain permettent de situer les interventions opérationnelles aux échelles pertinentes. Sur la base de l'examen critique des travaux visant à lutter contre l'îlot de chaleur urbain, [Stewart \(2011\)](#) souligne la nécessité des métadonnées d'observation du climat. [Martilli et al. \(2020\)](#) relèvent l'importance du traitement du stress thermique urbain et de l'îlot de chaleur urbain comme deux phénomènes séparés. [Taleghani \(2018a\)](#) dégage deux pistes répandues du rafraîchissement du piéton en milieu urbain : l'implémentation de surfaces réfléchissantes et le développement de solutions basées sur la nature. [Nazarian et al. \(2022\)](#) insistent sur le développement des méthodologies d'évaluation des stratégies de rafraîchissement urbain à l'aide de protocoles standardisés pour assurer une comparabilité des mesures entre elles et une mise à disposition des données afin d'orienter l'action des politiques publiques. En particulier, plusieurs pistes de recherches sont identifiées, concernant les aspects suivants :

- dans le cadre de la mise en œuvre de matériaux rafraîchissants, la réduction de l'échauffement atmosphérique est contrebalancée par la dégradation de l'environnement radiatif du piéton. Quel compromis adopter envers les revêtements réfléchissants au vu de leurs avantages et inconvénients ?
- l'évaluation de l'impact d'une stratégie de rafraîchissement a été largement étudiée par le biais d'études numériques. L'évaluation en conditions réelles de la mise en œuvre de stratégies de rafraîchissement est un enjeu clé et nécessite l'établissement d'un protocole de mesure reproductible, tenant compte des variations synoptiques et locales du climat et offrant une résolution spatiale à l'échelle du piéton. [Hendel et al. \(2016\)](#) et [Parison et al. \(2020b\)](#) proposent une méthodologie d'évaluation du confort thermique du piéton basée sur les mesures fixes, mais les protocoles d'évaluation basés sur les mesures mobiles adaptées aux échelles piétonnes restent peu développés. Comment assurer la comparabilité et reproductibilité de mesures mobiles d'une journée, voire d'une année à l'autre ?
- l'émergence des services climatiques nécessite de créer des outils accessibles aux collectivités synthétisant les données climatiques sous formes de métriques adaptées aux échelles d'intervention opérationnelles. Quelles informations physiques et géographiques mobiliser pour l'élaboration d'un outil de diagnostic du stress thermique à l'échelle du piéton ?

Les chapitres suivants permettront d'apporter des éléments de réponse à ces points de réflexion et de mettre en place une méthodologie d'évaluation des impacts thermiques et microclimatiques des travaux de rafraîchissement au sein des cours OASIS. Nous commencerons par évaluer les solutions de revêtements à l'échelle du laboratoire au chapitre 3.

Chapitre 3

Evaluation thermo-climatique des matériaux de revêtement des cours OASIS

| | | |
|-------|---|----|
| 3.1 | Matériel et méthodes | 42 |
| 3.1.1 | Bilan thermique de la couche de surface d'un revêtement . | 42 |
| 3.1.2 | Instrumentation en laboratoire | 45 |
| 3.1.3 | Mesure d'albédo | 50 |
| 3.2 | Résultats | 52 |
| 3.2.1 | Températures de surface | 52 |
| 3.2.2 | Températures en profondeur | 54 |
| 3.2.3 | Flux de chaleur | 56 |
| 3.2.4 | Impacts microclimatiques | 58 |
| 3.3 | Conclusion | 62 |

Les travaux de transformation des cours d'école OASIS menés par la Ville de Paris visent à réduire l'intensité de l'ICU et à améliorer le confort thermique des usagers. Pour cela, le programme fait principalement appel à des solutions fondées sur la nature, en remplaçant notamment le revêtement asphalte existant par des revêtements plus réfléchissants et plus perméables et en augmentant la fraction végétalisée des cours. Nous présentons dans ce chapitre une évaluation en laboratoire du comportement thermo-climatique des revêtements alternatifs mis en place au sein des cours OASIS.

3.1 Matériel et méthodes

Dans le cadre du projet OASIS, le revêtement d'origine dans les cours pilotes est majoritairement composé d'une structure de trottoir asphalte à savoir une couche de surface de 2 cm d'asphalte posés sur une fondation de 10 cm de béton. Il présente un albédo compris entre 0,11 et 0,13 d'après des mesures effectuées sur site selon la norme [ASTM E1918-16 \(2016\)](#). En solution de remplacement, des revêtements végétalisés, perméables et/ou réfléchissants ont été envisagés de sorte à répondre aux objectifs d'atténuation de l'ICU et d'amélioration du stress thermique des piétons. Pour quantifier la contribution des revêtements à ces objectifs, il convient de s'intéresser à leur bilan thermique.

3.1.1 Bilan thermique de la couche de surface d'un revêtement

Considérons une épaisseur dz et une surface unitaire S d'une couche de surface d'un revêtement. La Figure 3.1 présente les différentes interactions des flux de chaleur intervenant sur cette couche. L'étude du bilan thermique permet de dégager les leviers d'action au vu des deux objectifs énoncés plus haut. Par la suite, nous nous intéresserons exclusivement aux densités de flux thermique (exprimées en W/m^2), parfois appelées flux de chaleur dans la suite du texte par abus de langage.

S et L correspondent respectivement à l'irradiance de courte ($0,3 - 3 \mu m$) et grande ($3 - 100 \mu m$) longueur d'onde, S_{up} et L_{up} aux radiosités de courte et grande longueur d'onde. H est le flux de chaleur sensible vers l'atmosphère, ΔQ est le flux emmagasiné par la couche de surface, G le flux de chaleur sortant de l'épaisseur dz , lE le flux de chaleur latente dû à l'évapo(transpi)ration d'eau présente dans la couche ou en surface, ou transpirée par les végétaux (cas du gazon par exemple).

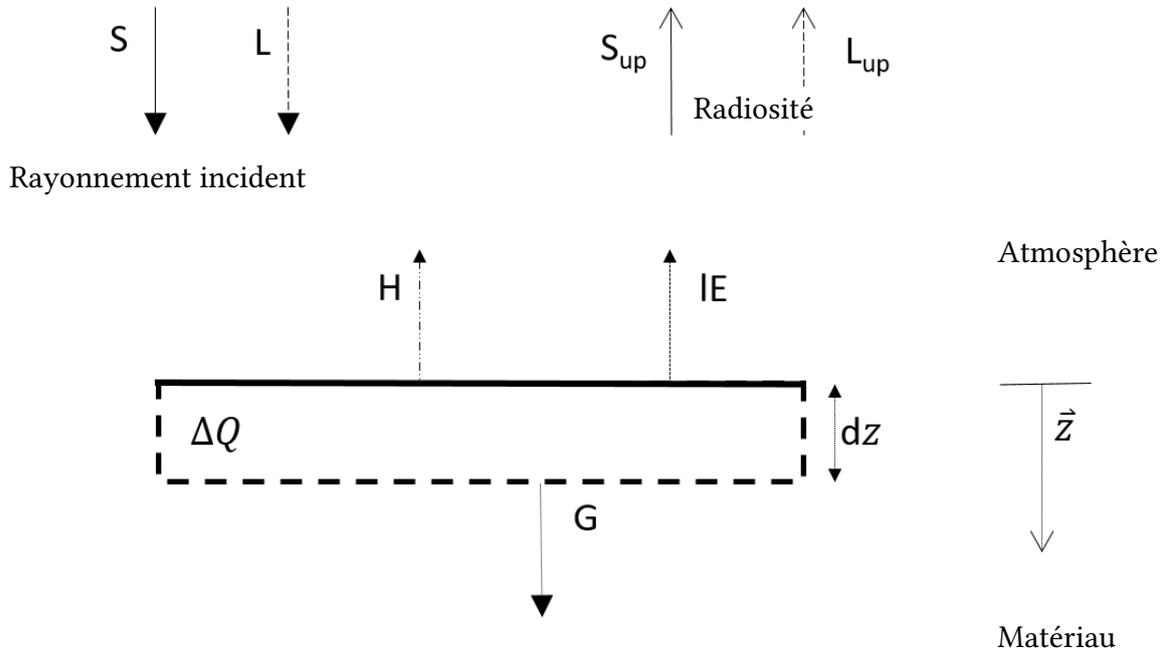


FIG. 3.1 – Bilan thermique de la couche de surface d'un matériau d'épaisseur dz .

Dans le cas général, le bilan énergétique de la surface (en W/m^2) s'écrit comme suit :

$$R_n = H + lE + G + \Delta Q \quad (3.1)$$

En considérant la surface du revêtement seule (sans épaisseur) et en notant V le flux de chaleur conductif absorbé à la surface du revêtement, on a : $\Delta Q = V - G$.

Le rayonnement net R_n est exprimé par :

$$R_n = (S + L) - (S_{up} + L_{up}) \quad (3.2)$$

La radiosité $J = S_{up} + L_{up}$ peut être déterminée à partir de l'albédo α de la surface, son

émissivité ϵ et sa température de surface T_s :

$$R_n = (1 - \alpha)S + \epsilon(L - \sigma T_s^4) \quad (3.3)$$

On peut par ailleurs expliciter le terme convectif H comme le terme de convection d'une surface plane (Jürges, 1924) :

$$H = h(T_s - T_a) \quad (3.4)$$

avec h le coefficient d'échange convectif.

On obtient alors :

$$(1 - \alpha)S + \epsilon(L - \sigma T_s^4) = H + G + lE + \Delta Q \quad (3.5)$$

Dans le cas d'un matériau sec et/ou non végétalisé, le flux de chaleur latente lE est nul.

Réduire l'intensité de l'ICU revient alors à réduire le terme H , responsable de l'échauffement de l'air par le revêtement. Celui-ci dépend directement de la température de surface T_s qui dépend elle-même de la chaleur emmagasinée ΔQ et de la conduction en profondeur G . Ce terme peut être explicité de la manière suivante :

$$\Delta Q + G = \rho c \frac{\partial T_s}{\partial t} dz - \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} \quad (3.6)$$

avec ρ et C respectivement la densité et la capacité calorifique massique de la couche de revêtement considérée, et λ sa conductivité thermique. On a alors :

$$(1 - \alpha)S + \epsilon(L - \sigma T_s^4) = h(T_s - T_a) + lE + \rho c \frac{\partial T_s}{\partial t} dz - \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} \quad (3.7)$$

Ainsi, pour diminuer le terme H on peut favoriser des matériaux réfléchissants ou bien présentant de l'évapo(transpi)ration, par exemple par arrosage, par désimperméabilisation ou par incorporation de végétation. On peut également déphaser les pics de températures de surface dans la journée en jouant sur la conductivité et la capacité calorifique du revêtement, c'est-à-dire son effusivité thermique du revêtement.

L'effusivité caractérise la variation de température d'un matériau lorsqu'on lui transmet de la chaleur en surface, par exemple lorsqu'il est mis en contact d'air chaud ou lorsqu'il est ensoleillé, ou à l'inverse avec de l'air frais ou lorsqu'il devient ombragé. La température de

surface d'un matériau fortement effusif variera peu comparativement à celle d'un matériau faiblement effusif pour une même quantité de chaleur échangée en surface avec l'environnement. Cela présente un avantage pour limiter les températures de surface diurnes, mais a tendance à faire perdurer les températures élevées tard dans la nuit.

Pour limiter le stress thermique des usagers, il faut réduire l'échauffement atmosphérique, mais aussi la radiosité J du matériau. En journée, la radiosité est composée de S_{up} qui est proportionnelle à l'albédo, et L_{up} liée à la température de surface T_s . Un albédo élevé permet une réduction de la température de surface, mais cela est contrebalancé par une augmentation de la radiosité qui contribue à augmenter la température moyenne radiante du piéton (Taleghani et al., 2014a). Cette augmentation peut compenser les gains de stress thermique réalisés grâce à un air moins chaud. Il convient donc de surveiller H et J pour des sites fréquentés en journée.

3.1.2 Instrumentation en laboratoire

Pour la caractérisation du comportement des revêtements OASIS, nous utilisons un dispositif expérimental développé par Hendel et al. (2018) et exploité par Parison et al. (2020a) pour étudier le comportement thermique d'échantillons de revêtement. La Figure 3.2 présente un schéma détaillé du dispositif expérimental.

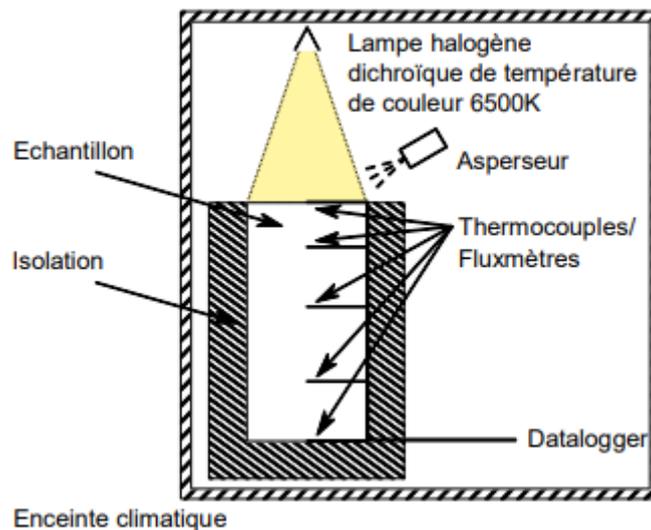


FIG. 3.2 – Dispositif expérimental (d'après Hendel et al. (2018)).

Les échantillons de revêtement cylindriques sont placés dans une enceinte climatique et soumis à des cycles de 24 h découpés en phases diurne de 8h avec ensoleillement et nocturne de 16h sans ensoleillement, reproduisant les conditions de température de l'air et d'humidité typiques d'une canicule parisienne. Les conditions imposées sont reportées dans le Tableau 3.1.

TABLEAU 3.1 – Caractéristiques des phases diurnes et nocturnes en enceinte climatique.

| | Durée (h) | Température (°C) | Humidité relative (%) |
|------|-----------|------------------|-----------------------|
| Jour | 8 | 35 | 35 |
| Nuit | 16 | 25 | 70 |

La température de l'air et l'humidité relative sont contrôlées à l'intérieur de l'enceinte climatique et une lampe halogène dichroïque à sept ampoules d'une température de couleur de 6500K reproduit l'irradiance solaire. La Figure 3.3 illustre la composition spectrale du rayonnement de la lampe halogène.

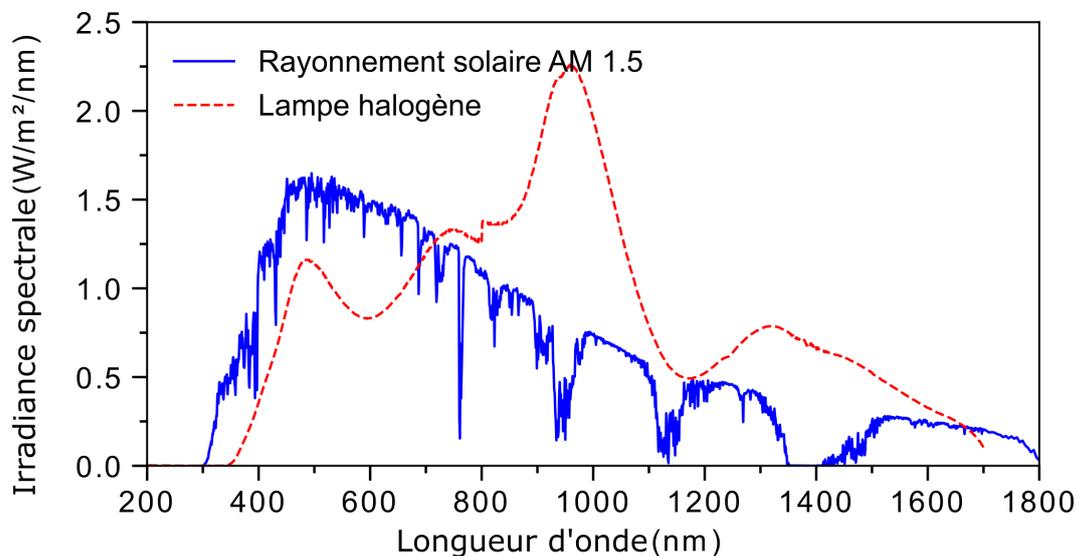


FIG. 3.3 – Irradiance spectrale du rayonnement solaire global horizontal AM 1.5 et de la lampe halogène dans la bande spectrale 200-1700 nm (d'après [Hendel et al. \(2018\)](#)).

Si les deux spectres sont différents, l'irradiance mesurée à la surface des échantillons de jour comme de nuit est du même ordre de grandeur que celle mesurée pour une ville de latitude moyenne lors de conditions estivales claires et peu venteuses ([Oke et al., 2017](#)).

TABLEAU 3.2 – Bilan radiatif typique d’une ville de moyenne latitude d’une population d’un million d’habitants sous un ciel clair en été avec des vents faibles (d’après Oke (1988) et Oke (1997))

| | S | L | S_{up} | L_{up} |
|--------------------------|-----|-----|----------|----------|
| Jour (W/m ²) | 760 | 365 | 106 | 503 |
| Nuit (W/m ²) | 0 | 335 | 0 | 415 |

Celles-ci sont reportées dans le Tableau 3.2. La circulation de l’air à l’intérieur de la chambre est auto-régulée et considérée comme identique entre les essais. Avant chaque cycle, les échantillons sont thermalisés à une température de 25 °C et une humidité relative de 70 %.

L’intensité du rayonnement incident $S + L$ et la proportion de rayonnement de courte (CLO) et de grande longueur d’onde (GLO) $\frac{CLO}{GLO}$ ont été caractérisées par Parison et al. (2020a). La proportion $\frac{CLO}{GLO}$ (respectivement 70/30 %) est mesurée à l’aide d’un pyrgeomètre Hukseflux IR-02 pour la bande GLO et à l’aide d’un pyranomètre de 2^{ème} classe LSI Lastem pour la bande CLO.

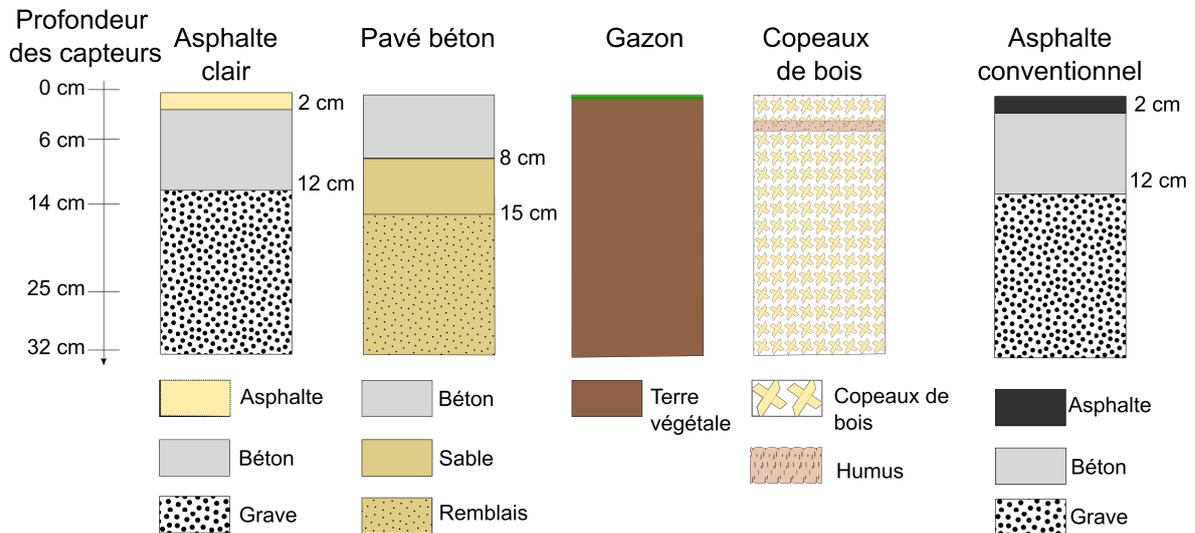


FIG. 3.4 – Structures de revêtement étudiées en laboratoire dans le cadre du projet FEDER UIA OASIS. A droite, l’asphalte conventionnel présent dans les cours avant travaux.

La Figure 3.4 présente la composition des revêtements employés dans les cours OASIS et étudiés en laboratoire, y compris l’asphalte présent initialement. Il s’agit d’un asphalte

conventionnel sur dalle de béton et grave. Chaque éprouvette cylindrique mesure 32 cm de hauteur pour un diamètre de 16 cm et est isolée latéralement et en sous-face par une couche de mousse polyuréthane de 5 cm d'épaisseur. L'isolation sur les faces latérales permet de considérer que le transfert de chaleur est unidirectionnel.

Les échantillons sont instrumentés de façon à observer simultanément la température et les flux de chaleur à différentes profondeurs sauf pour la terre végétale où seule la température est mesurée. Les profondeurs des thermocouples et capteurs de flux sont indiquées sur la Figure 3.4. Les capteurs en profondeur sont des capteurs de flux thermique standards avec thermocouple intégré de type T de surface cuivrée. En surface, les échantillons sont équipés d'un double capteur composé d'un capteur de flux radiatif φ_{rad} et d'un capteur de flux thermique global φ_g illustré sur la Figure 3.5. Un thermocouple est placé quelques centimètres au-dessus de la surface de l'échantillon afin de mesurer la température de l'air. La fréquence d'acquisition des signaux est de 0,1 Hz.

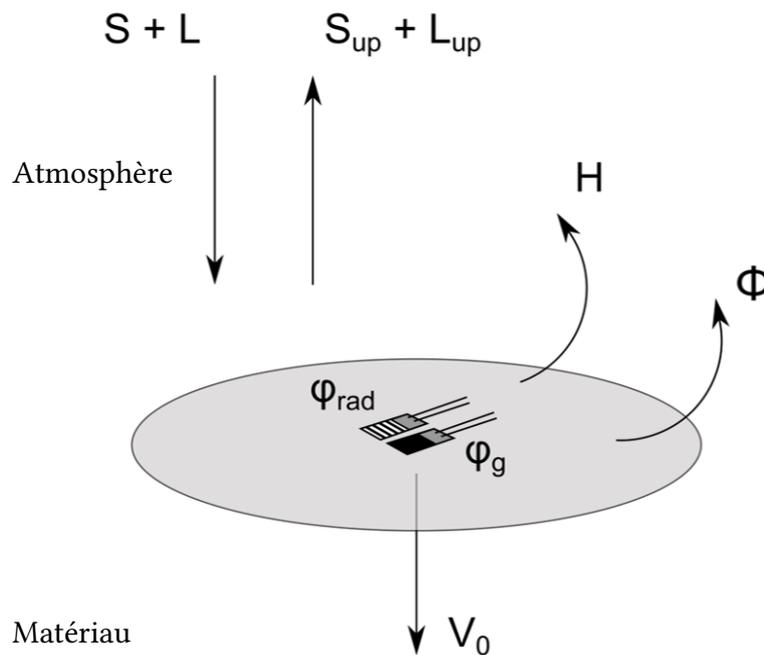


FIG. 3.5 – Schéma représentant le bilan thermique de surface d'un revêtement (d'après [Parison et al. \(2020a\)](#)).

Les capteurs sont manufacturés par Captec Entreprise SARL, leurs propriétés sont récapitulées au Tableau 3.3.

TABLEAU 3.3 – Propriétés des capteurs utilisés pour l'instrumentation des échantillons. Le capteur en surface est composé du capteur de flux global et du capteur de flux radiatif collés et calibrés sur une plaque en cuivre de 0,3 mm d'épaisseur.

| Grandeur | Surface | Dimension (en mm) | Incertitude |
|----------------|----------------|-------------------|-------------|
| Flux global | noire | 10x10 | 5% |
| Flux radiatif | noir/aluminium | 10x10 | 3% |
| Flux thermique | cuivrée | 10x10 | 3% |
| Température | cuivrée | 10x10 | 0,5 °C |

Le capteur de flux radiatif φ_{rad} et le capteur de flux global φ_g ont une émissivité $\epsilon = 0,95$ et un albédo $\alpha = 0,05$ (Parison et al., 2020a). Ils permettent d'estimer la densité de flux global et la densité de flux radiatif d'après les équations 3.8 et 3.9 (Hendel et al., 2018) :

$$\varphi_g = R_n^{\epsilon=0,95,\alpha=0,05} - H \quad (3.8)$$

$$\varphi_{rad} = R_n^{\epsilon=0,95,\alpha=0,05} \quad (3.9)$$

où $R_n^{\epsilon=0,95,\alpha=0,05}$ correspond au rayonnement net mesuré par le capteur radiatif d'albédo $\alpha = 0,05$ et d'émissivité $\epsilon = 0,95$. Ces deux capteurs permettent de déterminer le rayonnement incident et le flux convectif à la surface du matériau selon :

$$S + L = \frac{\varphi_{rad}}{\epsilon} + \sigma T_s^4 \quad (3.10)$$

$$H = \varphi_{rad} - \varphi_g \quad (3.11)$$

avec σ la constante de Stefan-Boltzmann et T_s la température de surface mesurée par le capteur.

A partir de la caractérisation des propriétés radiatives de chaque échantillon ainsi que la mesure du rayonnement incident et de la température de surface, il est possible de déterminer la radiosité J des échantillons étudiés :

$$J = S_{up} + L_{up} = \alpha S + \epsilon \sigma T_s^4 + (1 - \epsilon)L \quad (3.12)$$

Suite au remplacement d'une ampoule, le gazon est soumis à une irradiance $S + L$ plus importante que les autres échantillons, de l'ordre de 1400 W/m² contre 1100 W/m² pour les

autres matériaux (se référer au Tableau 3.4). Pour autant, les dynamiques d'évolution des températures et des flux de chaleur sont conservées.

Nous nous intéressons aux contributions nocturnes et diurnes des matériaux à l'échauffement atmosphérique et à l'environnement radiatif, respectivement estimés en calculant le flux de chaleur sensible H et la radiosité J cumulés lors des phases jour et nuit de l'expérimentation. Ces termes du bilan thermique sont normalisés par le rayonnement incident cumulé.

TABLEAU 3.4 – Rayonnement de courte et grande longueur d'onde reçu par les échantillons dans l'enceinte climatique.

| Echantillon | S (W/m ²) | L (W/m ²) |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Asphalte conventionnel | 782 | 454 |
| Asphalte clair | 658 | 467 |
| Copeaux bois | 651 | 460 |
| Pavé béton | 795 | 451 |
| Gazon | 930 | 450 |

Le terme convectif normalisé est défini par l'équation 3.13.

$$H_{\text{normalisé}} = \begin{cases} \frac{\int_{\text{jour}} H}{\int_{\text{cycle}} S+L} \\ \frac{\int_{\text{nuit}} H}{\int_{\text{cycle}} S+L} \end{cases} \quad (3.13)$$

La radiosité cumulée normalisée est définie par l'équation 3.14 :

$$J_{\text{normalisée}} = \begin{cases} \frac{\int_{\text{jour}} S_{up}+L_{up}}{\int_{\text{cycle}} S+L} \\ \frac{\int_{\text{nuit}} L_{up}}{\int_{\text{cycle}} S+L} \end{cases} \quad (3.14)$$

3.1.3 Mesure d'albédo

À l'été 2019 et 2020, l'albédo des revêtements des 10 cours d'écoles suivies dans le cadre du projet FEDER UIA OASIS a été caractérisé selon la norme [ASTM E1918-16 \(2016\)](#). Les mesures ont été réalisées entre 11h et 16h, sous une incidence solaire inférieure à 45° par

TABLEAU 3.5 – Albédos calculés pour les matériaux testés en enceinte. Les valeurs d'émissivité sont tirées de la littérature (Parison et al., 2020a; Pitarma and Crisóstomo, 2019; Lemonsu et al., 2012) Les valeur d'albédo retenues pour le spectre solaire et le spectre halogène sont tirés des travaux de Lemonsu et al. (2012).

| Matériau | Albédo Halogène | Albédo AM 1.5 | Albédo ASTM E1918-16 | Emissivité |
|------------------------|-----------------|---------------|----------------------|------------|
| Asphalte conventionnel | 0,06 | 0,06 | 0,14 | 0,98 |
| Asphalte clair | 0,40 | 0,33 | 0,34 | 0,98 |
| Copeaux bois | 0,58 | 0,50 | 0,25 | 0,9 |
| Pavé béton | 0,25 | 0,21 | 0,23 | 0,98 |
| Gazon | 0,25 | 0,25 | 0,17 | 0,95 |

rapport à la direction normale de la surface étudiée, par ciel totalement dégagé. En parallèle, des mesures d'albédo ont été effectuées en laboratoire au spectrophotomètre UV-Vis-NIR Cary 5000 avec sphère intégrante de 15 cm sur une bande spectrale de 250 à 2500 nm selon les préconisations de la norme [ASTM E903-12 \(2004\)](#). L'albédo est obtenu en pondérant les valeurs de réflectance hémisphérique spectrale mesurée à chaque longueur d'onde parcourue en fonction de l'irradiance spectrale solaire AM 1.5. La réflectance spectrale est pondérée en utilisant le spectre d'irradiance des lampes halogène pour déterminer l'albédo effectif des échantillons dans les conditions expérimentales ([Hendel et al., 2018](#)). Les albédos effectifs calculés respectivement avec le spectre de la lampe halogène et le spectre du soleil sont désignés par Halogène et AM 1.5.

Le Tableau 3.5 reporte les valeurs d'albédo obtenues en laboratoire et *in situ* selon [ASTM E1918-16 \(2016\)](#). Les matériaux ont dans l'ensemble des albédos supérieurs à celui de l'asphalte conventionnel. Les valeurs d'albédo mesurées sur le terrain sont du même ordre de grandeur que celles obtenues par [Bouzouidja et al. \(2021b\)](#). L'albédo des copeaux de bois mesuré au spectrophotomètre est nettement supérieur à la valeur moyenne des copeaux observée *in situ*. Cette différence pourrait être expliquée par une épaisseur de copeaux en laboratoire insuffisante pour être opaque et/ou insuffisamment compactée. Le niveau d'humidité des copeaux sur le terrain pourrait être invoqué, mais l'hypothèse d'un écart dû à la présence d'eau au sein des copeaux peut être écartée, car les mesures de terrain ont été réalisées en été par temps chaud, sur des copeaux de surface sèche. Enfin, contrairement à ceux mis en œuvre dans les cours d'écoles, les copeaux testés en laboratoire n'ont pas été soumis aux conditions extérieures. Ils n'ont donc pas subi de vieillissement ou de salissure qui peuvent altérer leur albédo.

Le Tableau 3.5 reporte de même les valeurs d'émissivité retenues pour chaque échantillon de matériau. L'émissivité de l'asphalte conventionnel et du béton a été caractérisée par [Parison et al. \(2020a\)](#). La valeur d'émissivité de l'asphalte clair a été estimée égale à celle de l'asphalte conventionnel. Les valeurs d'émissivité du gazon et des copeaux de bois sont tirées de la littérature ([Lemonsu et al., 2012](#); [Pitarma and Crisóstomo, 2019](#)).

3.2 Résultats

3.2.1 Températures de surface

La Figure 3.6 représente les températures de surface observées en laboratoire pour les matériaux étudiés. Les matériaux s'échauffent progressivement au cours de la phase jour pour atteindre leur température maximale au bout de 8h, passant de 25°C à des valeurs comprises entre 40°C et 57°C. La phase nocturne commence alors avec extinction de la lampe halogène et réduction de la température de consigne à 25°C. Les températures de surface décroissent d'abord soudainement, puis plus ou moins lentement selon la chaleur emmagasinée par les échantillons vers une asymptote de 25°C.

Nous pouvons classer les différents matériaux en fonction de leur température de surface maximale, avec des matériaux chauds, comme l'asphalte conventionnel qui atteint une température de surface de 57°C, suivi de près par les copeaux de bois et l'asphalte clair dont la température maximale frôle les 55°C en fin de phase diurne. Les pavés béton atteignent la même température de surface que les copeaux de bois en fin de phase diurne, ayant un albédo de terrain comparable, mais avec un temps caractéristique beaucoup plus long et sans stabilisation en fin de cycle jour. Cela témoigne de sa forte effusivité qui lui permet d'amortir l'apport de chaleur subi en phase diurne et compense son albédo nettement plus faible (0,25 vs. 0,58).

L'asphalte clair est moyennement chaud en journée avec une température maximale de 47°C, tandis qu'il se stabilise en fin de phase nocturne à une température plus élevée que celle des pavés en béton. Cela tient d'une part à son albédo élevé et à la forte inertie de sa fondation béton d'autre part.

Le gazon étudié a été saturé en eau avant le début de l'expérimentation, et présente la température de surface la moins élevée avec un maximum de l'ordre de 40°C malgré une

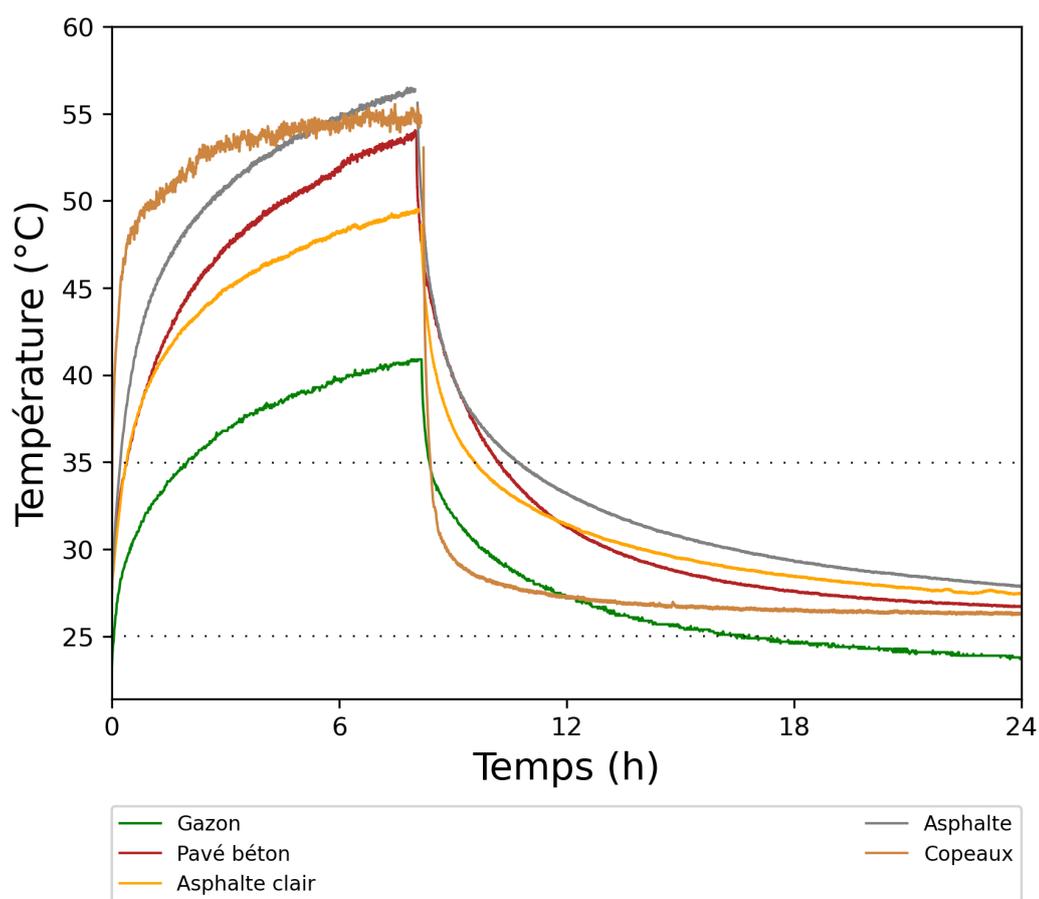


FIG. 3.6 – Températures de surface mesurées lors d'un cycle de 24h. Les températures de consignes diurne (35°C) et nocturne (25°C) sont matérialisées par les lignes en pointillés.

irradiance plus importante que pour les autres échantillons. Cela s'explique d'une part par l'évapotranspiration de l'herbe et du sol ainsi que la forte inertie de la terre végétale gorgée d'eau.

Si les dynamiques d'échauffement des matériaux sont caractéristiques d'une réponse indicielle du premier ordre, le temps caractéristique des copeaux de bois est significativement plus court par rapport aux autres matériaux avec une température de surface qui se stabilise après 5h d'expérimentation autour de la valeur de 55°C. Il en est de même pour l'asphalte clair dans une moindre mesure (température maximale atteinte au bout de 6h).

En phase nocturne, la température de surface de tous les matériaux diminue jusqu'à tendre vers la température initiale du début d'expérimentation. Toutefois, la vitesse de refroidissement des copeaux de bois est nettement plus élevée que celle des autres matériaux avec une chute de la température de surface quasi instantanée à l'extinction de la lampe. Cela confirme sa faible accumulation de chaleur en journée. À l'inverse, on observe une inertie thermique plus élevée pour les matériaux minéraux et le gazon, qui restituent lentement la chaleur accumulée au cours de la journée.

3.2.2 Températures en profondeur

A 6 cm de profondeur (Figure 3.7), les températures de la structure de copeaux de bois et de la pelouse sont plus fraîches que celles des matériaux minéraux. En journée, leurs températures sont de l'ordre de 35°C au maximum et chutent vers 25°C en phase nuit, alors que les pavés béton, l'asphalte conventionnel et l'asphalte clair atteignent respectivement 50°C, 45°C et 40°C en phase jour avant de retomber à des températures comprises entre 30°C et 27°C en phase nuit. La porosité du gazon et des copeaux de bois peut expliquer ce résultat en partie, notamment en raison d'une plus faible conductivité thermique. Il est intéressant de noter que le pavé béton a une température à -6 cm plus élevée que celle de l'asphalte conventionnel. Ce résultat est imputable à la structure du pavé béton qui offre une meilleure conductivité que celle de l'asphalte.

La Figure 3.8 reporte les températures mesurées à 14 et 25 cm de profondeur. Les températures maximales au sein des copeaux de bois sont de l'ordre de 34°C à 14 et 25 cm et corroborent la faible conductivité thermique de ce matériau.

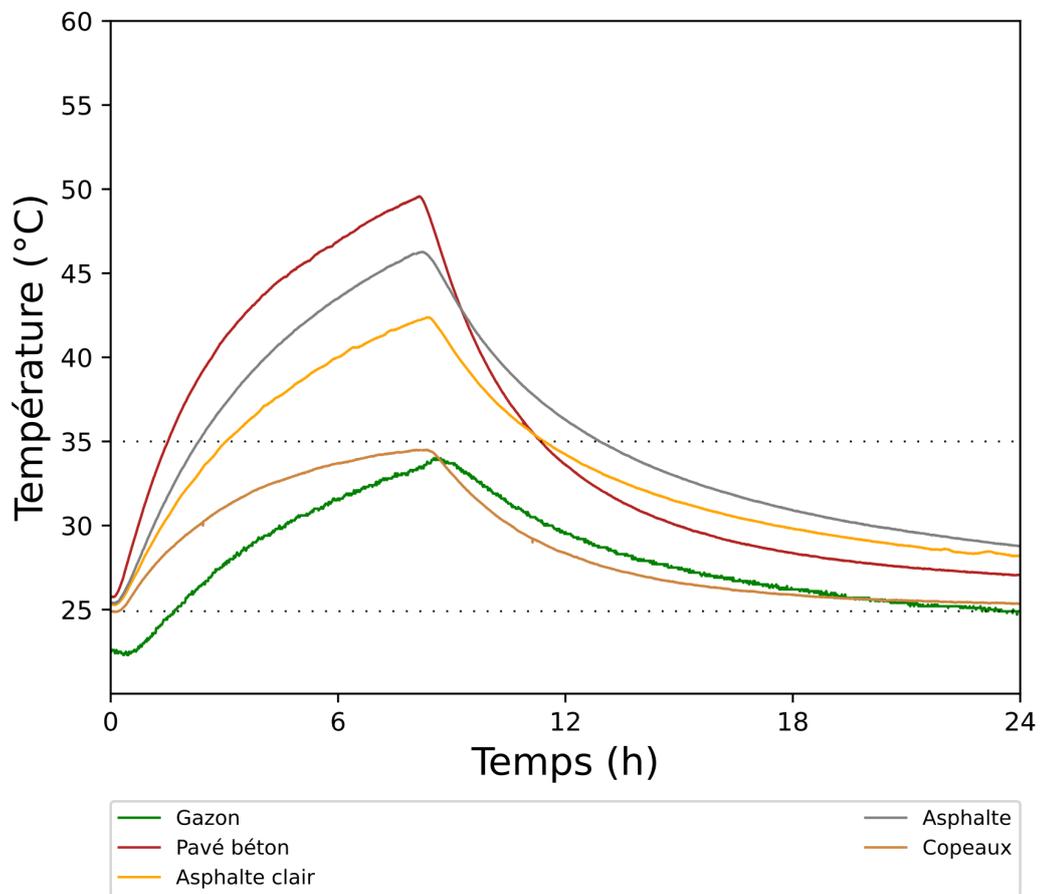


FIG. 3.7 – Températures mesurées à 6 cm de profondeur.

La distribution de température au sein de l'échantillon de copeaux de bois et l'absence presque totale de déphasage entre -6 cm et -25 cm pourrait nous amener à remettre en question l'efficacité de l'épaisseur isolante latérale de l'échantillon. Si l'hypothèse du flux unidirectionnel est respectée, la résistance thermique élevée des copeaux pourrait favoriser des fuites thermiques latérales par la faible épaisseur d'isolant.

La courbe d'évolution de la température au sein de l'échantillon de gazon est aussi très atténuée à 14 et 25 cm de profondeur. La structure des éprouvettes explique les allures des courbes de température au sein des échantillons minéraux, avec une dynamique d'évolution et des valeurs de température similaires pour le pavé béton et l'asphalte clair. L'allure des températures au sein de l'asphalte conventionnel est similaire à celle des deux autres échantillons minéraux, mais sa température maximale est de l'ordre de 39°C contre 36°C environ pour le pavé et l'asphalte clair. L'ordre des températures entre l'échantillon d'asphalte

et le pavé s'est à nouveau inversé, en raison de la sous-couche de sable poreux entre le pavé béton et le remblai de plus faible conductivité thermique que la sous-couche de béton. Les courbes de température des matériaux minéraux ont la même allure à 25 cm avec des écarts de l'ordre de 1,5°C en fin de phase nocturne.

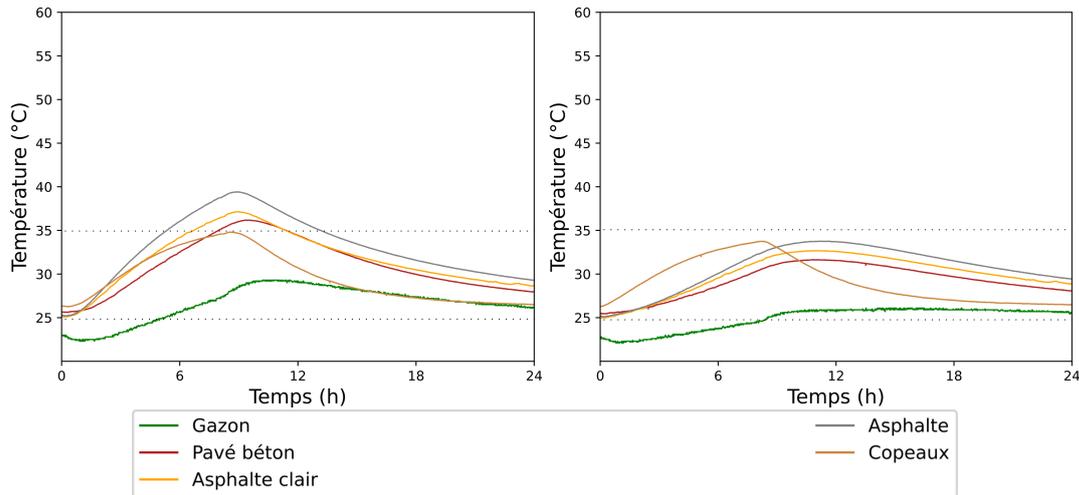


FIG. 3.8 – Températures mesurées à 14 cm (gauche) et 25 cm (droite) de profondeur.

3.2.3 Flux de chaleur

Les flux de chaleur mesurés à 6 et 14 cm de profondeur sont reportés sur la Figure 3.9, hormis pour l'échantillon de gazon. Les flux ont des allures similaires, avec un cycle de charge et de décharge correspondant aux phases diurne et nocturne de l'expérimentation.

Pour les revêtements minéraux, les flux de chaleur sont plus importants à une profondeur de 6 cm pour le pavé béton que pour l'asphalte, suivant ainsi les différences de températures, elles-mêmes liées aux différences d'albédo et de propriétés thermiques. En journée, le flux moyen est de l'ordre de 80 W/m² pour le pavé de béton contre 65 et 55 W/m² pour l'asphalte conventionnel et l'asphalte clair, respectivement.

Le flux au sein de l'échantillon pavé béton est sensiblement plus faible à 14 cm qu'à 6 cm, avec une valeur maximale de 20 W/m². Cela est attribué à la sous-couche de sable et de grave poreuse en dessous du pavé qui est traversée à cette profondeur, plus isolante. À l'inverse, la fondation en béton des deux asphaltes atteint un régime stationnaire permettant aux flux à 6 et 14 cm de s'égaliser.

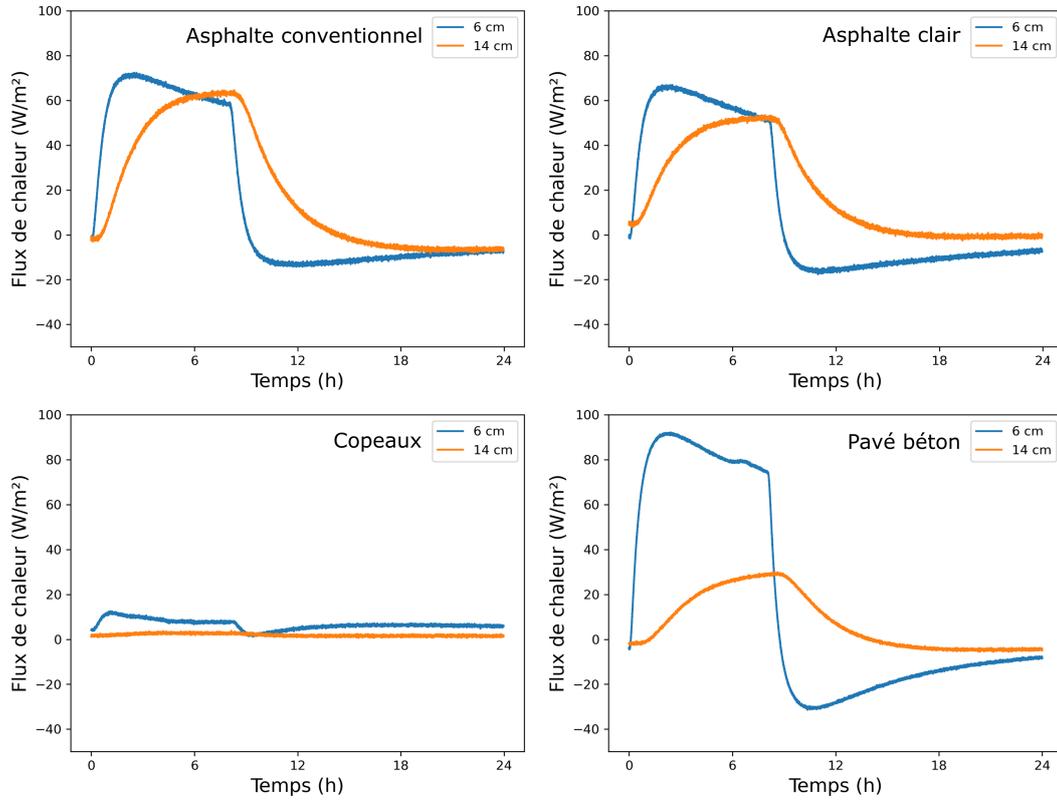


FIG. 3.9 – Flux de chaleur mesurés à 6 cm et 14 cm de profondeur au sein des différents échantillons sur un cycle de 24h en enceinte climatique.

C'est de nouveau la faible conductivité des copeaux qui explique a priori les faibles flux de chaleur au sein de l'éprouvette de copeaux de bois. Le flux à 6 cm y est de l'ordre de 10 W/m^2 et quasi nul à 14 cm.

L'observation des flux de chaleur vient étayer les conclusions tirées de la distribution des températures observée au sein des copeaux de bois. Notamment, la faible conductivité des copeaux de bois explique la différence marquée entre la température de surface et la température à 6 cm de profondeur. L'échantillon de copeaux de bois a été soumis sec au cycle de mesure. Au vu de la porosité du milieu, une modification de son humidité au préalable pourrait se répercuter sur les températures.

Ces résultats sont à nuancer au regard de la mise en œuvre du matériau *in situ*. En effet, les copeaux de bois forment un paillage qui se tasse rapidement et devient de plus en plus compact avec l'usage. Ce compactage et vieillissement accélérés contribuent à une augmentation de la conductivité thermique, mais aussi à une réduction de l'albédo de surface,

les copeaux étant patinés et encrassés. Outre la variation de la porosité sur le terrain, le matériau présente une couche de compostage dense et humide de 1 à 2 cm d'épaisseur qui se forme à l'usage entre 6 et 7 cm de profondeur sous la surface.

3.2.4 Impacts microclimatiques

L'observation des températures et flux de chaleur au sein des matériaux permet de déterminer les termes du bilan thermique établi à l'équation 3.1.1, notamment la radiosité et la convection. La comparaison des échanges convectifs et de la radiosité permet notamment de discriminer le choix de revêtement à implémenter selon le critère de rafraîchissement adopté : atténuation de l'ICU ou réduction du stress thermique ressenti par les usagers. La Figure 3.10 reporte les valeurs de l'échauffement atmosphérique observé sur un cycle d'expérimentation pour les différents matériaux, normalisé par l'irradiance.

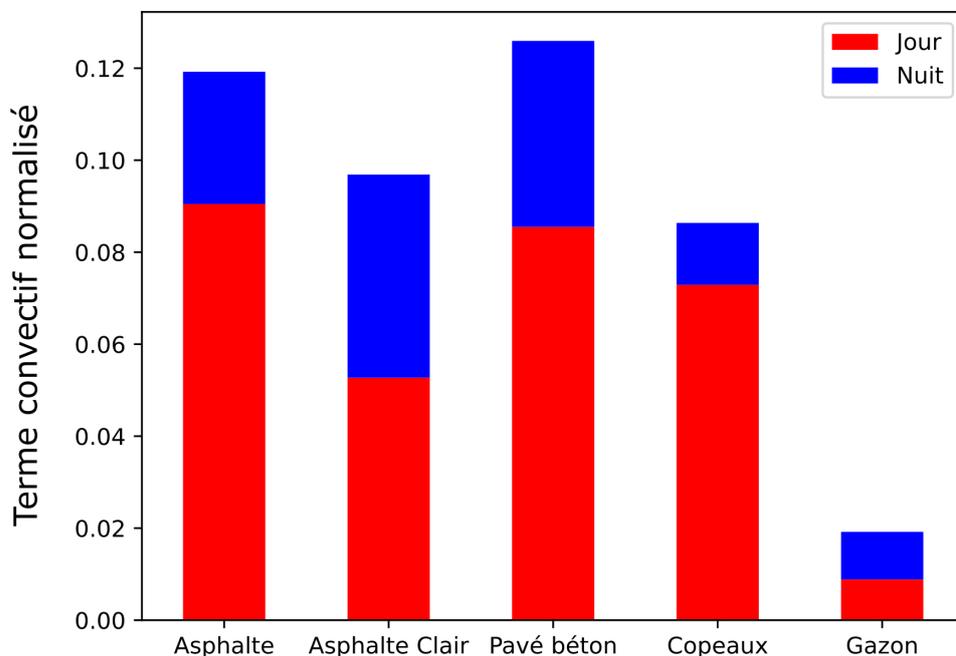


FIG. 3.10 – Comparaison des termes convectifs cumulés nocturne et diurne pour chaque matériau, normalisés par l'irradiance.

Le terme convectif H est calculé selon l'équation 3.1.2. La contribution à l'échauffement correspond au terme H cumulé sur la durée de l'expérimentation, normalisé par l'irradiance $S + L$ cumulée. Sur 24h, ce sont le pavé béton et l'asphalte conventionnel qui contribuent le plus à l'échauffement atmosphérique avec environ 12% de leur irradiance. Les copeaux de bois et l'asphalte clair ont une contribution intermédiaire avec respectivement 9 % et 10%, tandis que le gazon a la contribution la plus faible avec une restitution convective de moins de 2% de son irradiance, répartie à parts égales entre contribution diurne et nocturne. Cette faible valeur est due à l'évapotranspiration du gazon qui évacue une part importante de la chaleur absorbée.

En journée, asphalte conventionnel et pavé béton ont des contributions convectives très similaires de l'ordre de 9% de leur irradiance, suivis de près par les copeaux (7%) puis l'asphalte clair (5%). La nuit, la contribution des copeaux de bois est aussi faible que celle du gazon, ce qui s'explique par son faible stockage de chaleur, comme observé à la Figure 3.9. Asphalte clair et pavé béton ont la contribution convective nocturne la plus élevée, qui tient à la quantité importante de chaleur accumulée en journée, conformément à ce qu'illustrent les flux de chaleur observés à la Figure 3.9.

La convection nocturne supérieure de l'asphalte clair par rapport à l'asphalte conventionnel est surprenante au premier abord compte tenu de son albédo plus élevé. Cela pourrait tenir à une différence des propriétés thermiques du liant clair ou un meilleur contact thermique entre la couche d'asphalte clair et sa fondation béton se traduisant par une effusivité plus élevée pour cet échantillon.

La Figure 3.11 reporte les valeurs de la radiosité J cumulée sur un cycle d'expérimentation et normalisée par le rayonnement incident $S + L$. Les contributions sont différenciées selon la phase diurne ou nocturne et entre radiosité de courte S_{up} ou grande longueur d'onde L_{up} .

Tout d'abord, on constate que les radiosités cumulées normalisées des différents échantillons sont sensiblement supérieures à leur convection cumulée normalisée, comprises entre 0,72 et 0,94 pour les premières, à comparer à des valeurs inférieures à 0,13 pour les deuxièmes.

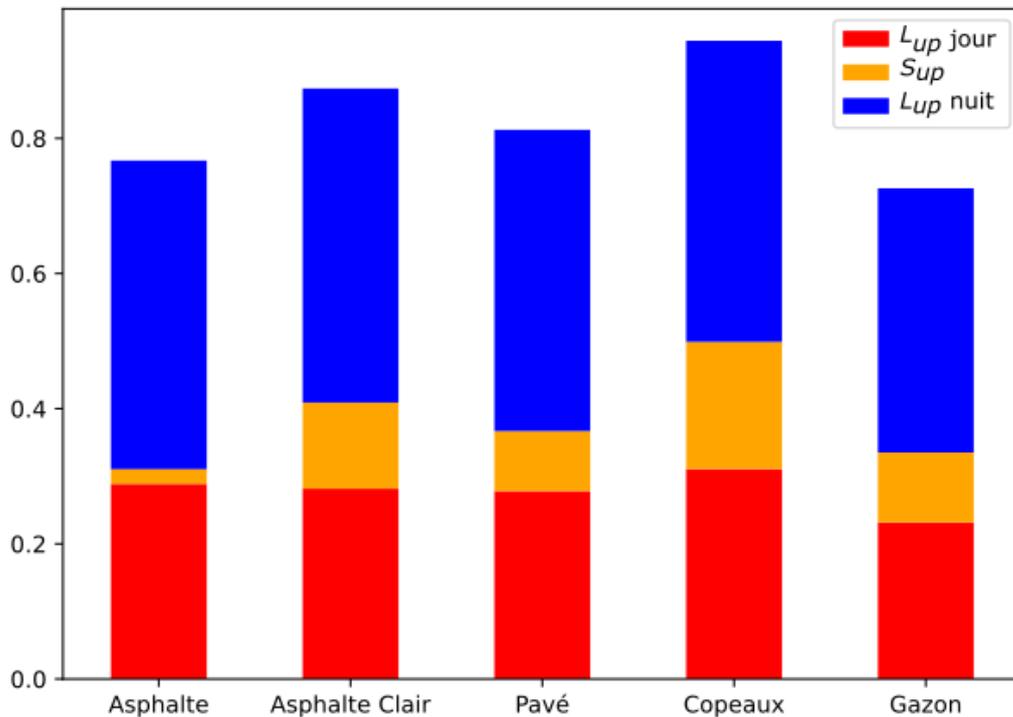


FIG. 3.11 – Radiosité cumulée diurne et nocturne des matériaux aux courtes et grandes longueurs d'onde, normalisée par l'irradiance.

En journée, la radiosité normalisée des différents échantillons est comprise entre 30% pour l'asphalte conventionnel et 50% pour les copeaux de bois, l'essentiel de ces différences étant causées par les différences d'albédo qui impactent S_{up} , variant de 2 à 18%. La contribution relative à S_{up} de l'échantillon de copeaux de bois est nettement plus élevée que celle des autres matériaux. Cela est dû à son albédo élevé mesuré au spectrophotomètre. Les mesures d'albédo de terrain pour les copeaux de bois donnent un albédo de l'ordre de 0,25, ce qui donnerait une radiosité divisée par deux aux courtes longueurs d'onde. Les copeaux auraient alors une radiosité diurne de 8%.

Pour sa part, la radiosité de grande longueur d'onde L_{up} est comprise entre 23 à 31% le jour et entre 39 et 46% la nuit sur l'ensemble des échantillons. Cette faible variation tient aux faibles différences de températures de surface exprimées en Kelvin et élevées à la puissance 4 entre les échantillons considérés. Le gazon présente de jour comme de nuit la radiosité la plus faible de l'ensemble des revêtements étudiés.

Ces indicateurs donnent des informations globales sur la performance microclimatique des revêtements étudiés. Du point de vue de l'ICU, le gazon, suivi des copeaux de bois et de l'asphalte clair contribuent le moins à échauffer l'atmosphère sur 24h, tandis qu'asphalte conventionnel et pavé béton y contribuent le plus. Le gazon offre également la radiosité la plus faible, nuit et jour, et constitue ainsi le meilleur choix de revêtement du point de vue microclimatique. Cependant, son utilisation est limitée dans les cours parisiennes en raison de l'intensité de leur fréquentation, tandis que sa performance requiert d'assouvir ses besoins en eau. En effet, un gazon en situation de stress hydrique perd sa capacité à évapotranspirer et présente alors des performances thermiques proches d'une structure copeaux, avec des températures de surfaces très élevées (58°C) et des températures significativement plus faibles en profondeur (Parison et al., 2020a).

Le comportement des autres structures n'est pas aussi convergent du point de vue de l'ICU (échauffement atmosphérique) et du stress thermique (radiosité), de jour comme de nuit.

De ce point de vue, les revêtements classiques (asphalte conventionnel et pavé béton) provoquent un échauffement atmosphérique élevé, de jour comme de nuit, mais présentent une radiosité relativement faible, comparable à celle du gazon. Le gazon présente d'ailleurs la radiosité diurne la plus faible de l'ensemble des échantillons étudiés.

Les autres revêtements (asphalte clair et copeaux de bois) présentent des performances plutôt inverses (échauffement atmosphérique faible et radiosité élevée) et avec un contraste important entre leur comportement diurne et nocturne. Ainsi, si l'asphalte clair offre une faible contribution convective diurne, elle est importante la nuit. De plus, on constate que le bénéfice de l'asphalte clair en termes d'échauffement de l'air est obtenu en échange d'une radiosité plus importante. Il en est de même pour les copeaux de bois qui cumulent en plein soleil température de surface élevée et forte radiosité, même si ces termes sont réduits la nuit. Cette radiosité forte a un impact négatif sur le stress thermique, en particulier en période diurne lorsque le revêtement réfléchissant est ensoleillé.

Les effets compensatoires entre limitation de l'échauffement de l'air et augmentation de la radiosité sont à surveiller avec beaucoup d'attention avant de généraliser l'usage de revêtements présentant des performances divergentes selon ces deux indicateurs. La détermination de l'impact final sur le stress thermique d'un piéton de ces tendances opposées nécessite une simulation avec mise en contexte plus précise du piéton et du revêtement, notamment en

termes de position du piéton, caractéristiques et morphologie du site, matériaux de façade, présence d'ombrage, etc.

Au niveau opérationnel, l'usage de l'asphalte clair est aussi à nuancer, dans la mesure où l'abaissement de sa température de surface est corrélé à son albédo et donc à son entretien soutenu, car son vieillissement et son encrassement réduisent l'albédo de la surface, et ainsi les bénéfices en termes de température de surface (Erell et al., 2014; Bretz and Akbari, 1997). Les copeaux semblent offrir une alternative plus pratique de ce point de vue, mais présentent aussi des contraintes d'entretien. Les fabricants préconisent en effet de ne pas les placer à l'ombre pour limiter leur dégradation biologique et de rajouter périodiquement de nouveaux copeaux pour pallier le tassement du volume existant. Les placer à l'ombre pour limiter leurs impacts diurnes n'est donc pas compatible avec cette recommandation.

3.3 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre l'étude du comportement thermique de revêtements soumis à des conditions de température et d'humidité typiques d'une vague de chaleur parisienne. Cinq échantillons ont été testés : asphalte conventionnel, asphalte clair, pavé béton, copeaux de bois et gazon saturé en eau. Les échantillons ont été instrumentés avec des capteurs de température et de flux de chaleur en surface et en profondeur. Des mesures d'albédo au spectrophotomètre et sur le terrain ont permis de caractériser leurs propriétés de surface.

Le matériau le plus frais est incontestablement le gazon saturé en eau, et ce grâce à la dissipation de chaleur latente par évapotranspiration. Les copeaux de bois présentent un temps caractéristique d'échauffement et de refroidissement très court par rapport aux autres matériaux. S'ils atteignent très rapidement la température de surface la plus élevée en journée (55 °C), ils se refroidissent en revanche le plus rapidement et présentent un faible stock de chaleur. L'asphalte clair atteint des températures de surface moins élevées que l'asphalte conventionnel et présente des flux de chaleur diurnes plus faibles. En revanche, de par son albédo élevé, l'asphalte clair présente une radiosité importante en journée. Enfin, le pavé béton contribue fortement en phase diurne et nocturne à l'échauffement de l'atmosphère, d'une part en présentant des températures de surface élevées en journée, et d'autre part une inertie thermique contribuant à stocker de la chaleur, comme en témoigne ses températures élevées en profondeur.

L'étude du comportement thermique des matériaux de revêtement en laboratoire permet d'affiner la stratégie de rafraîchissement en fonction du levier à actionner. Si l'objectif vise à améliorer le confort thermique des usagers en journée, cela passe par la réduction de la température de surface des matériaux, mais aussi de leur radiativité. L'étude menée en laboratoire montre que la végétalisation des surfaces est la stratégie la plus efficace en termes de réduction de stress thermique, mais la résistance mécanique de ces surfaces n'est pas forcément compatible avec les contraintes d'usage des cours d'écoles parisiennes. Les surfaces à albédo élevé risquent quant à elles, par leur radiativité importante, d'augmenter la température moyenne radiante et de créer une gêne optique pour les usagers même si la température de surface reste basse, ce qui est notamment le cas de l'asphalte clair. Les problématiques de vieillissement et d'encrassement des revêtements réfléchissants posent également question d'un point de vue opérationnel. Les pavés bétons ont des performances moindres que l'asphalte conventionnel et présentent un effet de stock important.

A l'inverse, si l'atténuation de l'effet d'îlot de chaleur urbain est prioritaire, les matériaux à faible inertie et/ou albédo élevé, minimisant le stockage de la chaleur au cours de la journée, sont plus indiqués. Il s'agit notamment des copeaux de bois, et dans une moindre mesure de l'asphalte clair. Cependant, leur efficacité suppose d'une part que l'albédo est stable dans le temps, et d'autre part que le rayonnement incident peut être réfléchi vers la voûte céleste sans être absorbé par un obstacle tel qu'un bâtiment, arbre ou préau qui piégerait la chaleur réfléchie, autrement dit que leur facteur de vue du ciel est important.

Les matériaux minéraux ont été étudiés sous protocole sec, toutefois les températures de surface peuvent être abaissées par humidification préalable ou arrosage grâce à l'évaporation d'eau (Parison et al., 2020a). La disponibilité en eau est aussi un facteur important pour l'étude des échantillons végétalisés ou perméables. La prise en compte de l'aspect sec, humide ou saturé en eau est essentiel à la compréhension des performances rafraîchissantes de ces échantillons.

L'étude de matériaux irrigués et mouillés permettrait de compléter l'analyse des comportements thermiques des matériaux afin d'optimiser leur mise en œuvre au sein de futures cours OASIS et d'éclairer les collectivités sur les techniques les plus adaptées aux cours d'écoles en tenant compte des contraintes d'usages. L'étude de l'impact de l'eau sur les matériaux de revêtement OASIS permettrait par exemple de tenir compte de l'effet rafraî-

chissant de l'eau retenue suite à un orage estival ou de l'intérêt d'ajouter des points d'eau ou autre mobilier urbain adaptés aux activités récréatives des enfants et à la gestion des eaux urbaines. C'est notamment le cas de l'école maternelle Emériaud où une rivière pédagogique alimentée par les eaux pluviales a été installée. Au-delà des revêtements OASIS, l'étude des matériaux frais s'étendrait ainsi aux matériaux poreux et granulaires, notamment en ce qui concerne leurs comportements hydrologiques et leur capacité d'évapotranspiration et de rétention d'humidité.

Notre étude ne tient pas compte des éventuels effets cumulatifs qui pourraient être mis en évidence en soumettant les échantillons à des cycles successifs en laboratoire. L'étude des matériaux en conditions réelles permettra de nuancer les résultats observés en laboratoire au regard de la disponibilité en eau et de l'ensoleillement de la zone instrumentée. L'étude des données agrégées sur plusieurs jours permettront de même d'observer et de comparer les dynamiques de stockage lors d'une canicule en condition réelle avec les observations en enceinte contrôlée.

Ayant présenté les résultats des essais en laboratoire sur les matériaux, dont l'impact microclimatique pour le piéton reste à clarifier, nous entamons désormais la présentation et l'analyse des mesures microclimatiques fixes réalisées dans les cours, qui contribueront à les quantifier et analyser.

Chapitre 4

Evaluation microclimatique continue dans le temps par mesures fixes

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.1 | Matériel et méthodes | 66 |
| 4.1.1 | Réseau OASIS | 66 |
| 4.1.2 | Analyse statistique | 72 |
| 4.2 | Cas d'étude : L'école maternelle Tandou | 78 |
| 4.2.1 | Profil interstation moyen | 80 |
| 4.2.2 | Impacts microclimatiques $I_{x_1,OASIS}$ | 82 |
| 4.2.3 | Prétraitement des masques solaires | 89 |
| 4.2.4 | Résultats | 94 |
| 4.3 | Résultats généraux et discussion | 99 |
| 4.3.1 | Impact microclimatique des travaux OASIS au sein des cours pilotes | 99 |
| 4.3.2 | Augmentation du nombre d'observations par extension de la période de mesure | 102 |
| 4.4 | Conclusion | 105 |

Ce chapitre présente l'analyse des données obtenues par le réseau de stations météorologiques fixes utilisé pour l'évaluation microclimatique des cours pilotes OASIS tout au long du projet. Nous présenterons la méthodologie d'analyse des données, ainsi que l'instrumentation du réseau de stations OASIS et les sites d'expérimentation. Nous proposons une méthodologie de pré-traitement des données pour tenir compte de l'évolution des masques solaires tout au long de la période d'observation. Un cas d'étude nous permet de mettre en œuvre la méthodologie et de discuter des résultats obtenus, avant de conclure sur la pertinence et les limites de la méthodologie appliquée.

4.1 Matériel et méthodes

4.1.1 Réseau OASIS

Le programme OASIS de la Ville de Paris vise à transformer les cours d'écoles parisiennes en îlots de fraîcheur avec ouverture au public en dehors du temps scolaire et périscolaire. Les sites OASIS ont fait l'objet d'une sélection préliminaire sur la base de critères physiques et opérationnels (végétalisation, nécessité de rénover la cour, accessibilité depuis la rue) dans ce cadre (Karam et al., 2019). Dix établissements ont été retenus comme sites pilotes et bénéficient d'un suivi microclimatique assuré par une paire de stations météorologiques, l'une dans la cour pilote et une autre dans l'espace public à proximité, servant de témoin. L'emplacement de ces stations est indiqué sur la Figure 4.1. Le parc de stations a été installé à l'été 2019 pour la durée du projet (2019-2022). Les paramètres microclimatiques synthétisés dans le Tableau 4.2 sont enregistrés en continu depuis juillet 2019 avec un pas de temps de 1 minute, à l'exception des périodes de travaux de réaménagement durant lesquelles les stations dans les cours d'écoles ont été déposées, récapitulées au tableau 4.1. Les instruments sont fixés sur un mât de voirie et protégés par des cages cylindriques blanches de diamètre 1 m (voir Figure 4.3).

Les stations témoin et d'étude, respectivement placées sur l'espace public et dans la cour d'école étudiée, mesurent à hauteur de piéton (1,5 m) la température de l'air T_a , l'humidité relative RH et la température de globe noir T_g utilisée pour calculer la température moyenne radiante T_{mrt} selon la norme ISO 7726 (2001). À 4 mètres de hauteur sont mesurés la vitesse du vent v , la température de l'air et le rayonnement net R_n (dans la bande spectrale 0,3 - 50 μm) (se référer à la Figure 4.2).

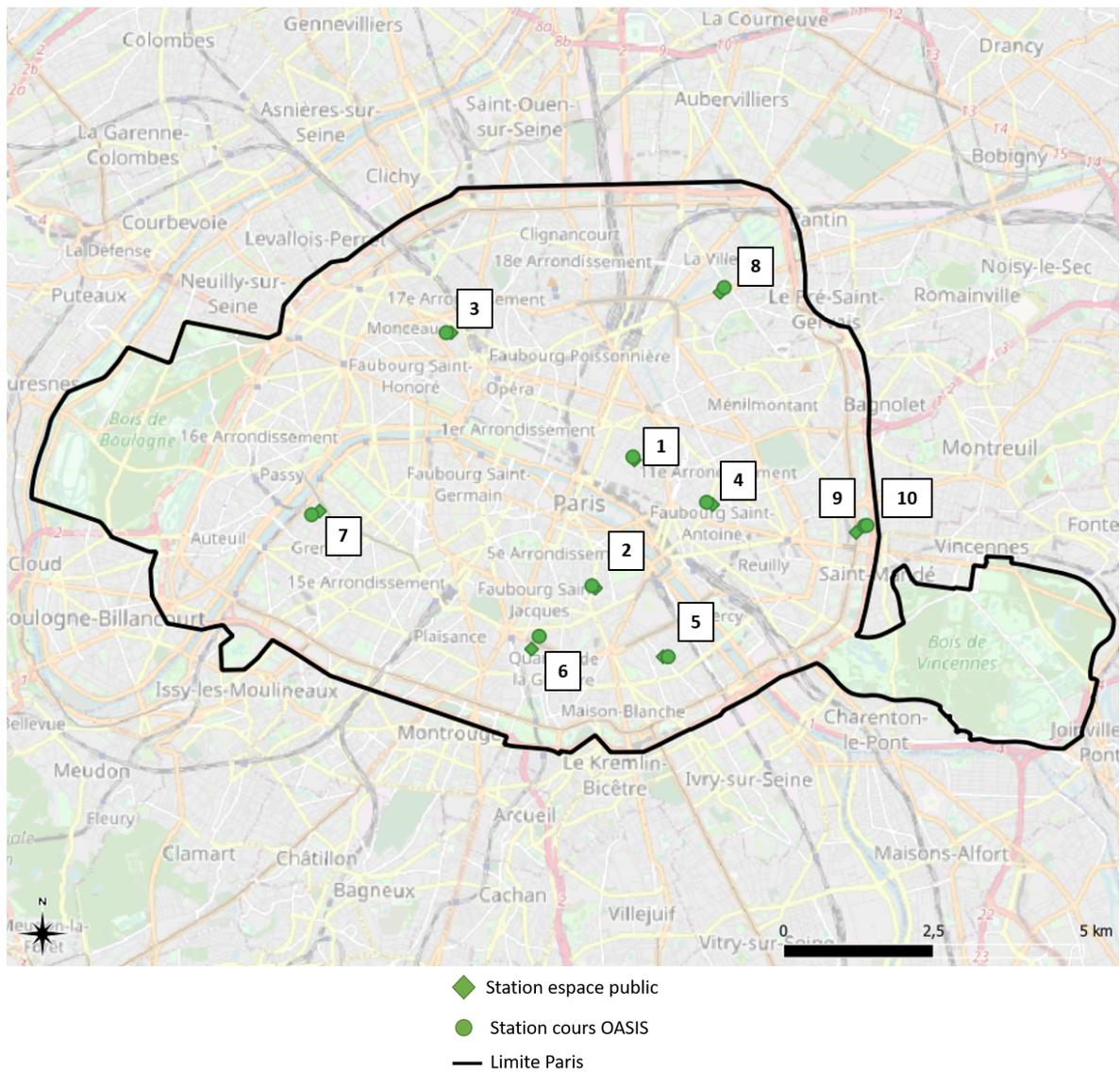


FIG. 4.1 – Plan des stations météorologiques OASIS.

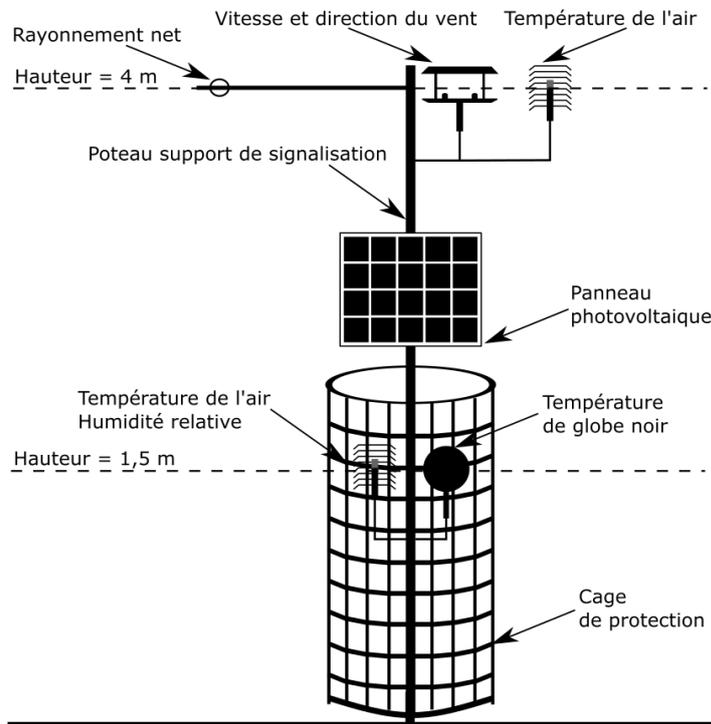


FIG. 4.2 – Schéma d’une station météo fixe.

TABLEAU 4.2 – Paramètres mesurés et instrumentation des stations fixes. Les instruments sont fabriqués par LSI Lastem

| Paramètre | Instrument | Hauteur (m) | Incertitude | Modèle |
|---------------------------------|--|-------------|-------------|----------|
| Température de l’air T_a | Pt 100 1/3 DIN-B sous abri | 1,5 / 4 | 0,1 °C | DMA033 |
| Humidité relative RH | Hygromètre capacitif ROTRONIC IN-1 sous abri | 1,5 | 1,5 % | DMA672.1 |
| Température de globe noir T_g | Pt 100 norme IEC751 (ISO 77726) | 1,5 | 0,15 °C | DMA131 |
| Vitesse du vent v | Anémomètre à ultrasons 2 axes | 4 | 2% | DWA831 |
| Rayonnement net R_n | Thermopile | 4 | 5% daily | DPA240 |

Les paramètres et leurs instruments sont répertoriés dans le Tableau 4.2. Les données enregistrées à la minute sont lissées par une moyenne glissante sur 10 minutes. Elles sont représentées de 6h du matin à 6h du matin à J+1.

Afin d’évaluer les impacts microclimatique et thermique des travaux de réaménagement des cours, une paire de stations est nécessaire pour chaque cour. La station dite d’étude est installée au sein de la cour d’école, et une station témoin est installée à proximité dans l’espace public (dans un rayon maximal de 300 mètres) de sorte à ne pas être perturbée par les travaux de réaménagement de la cour.

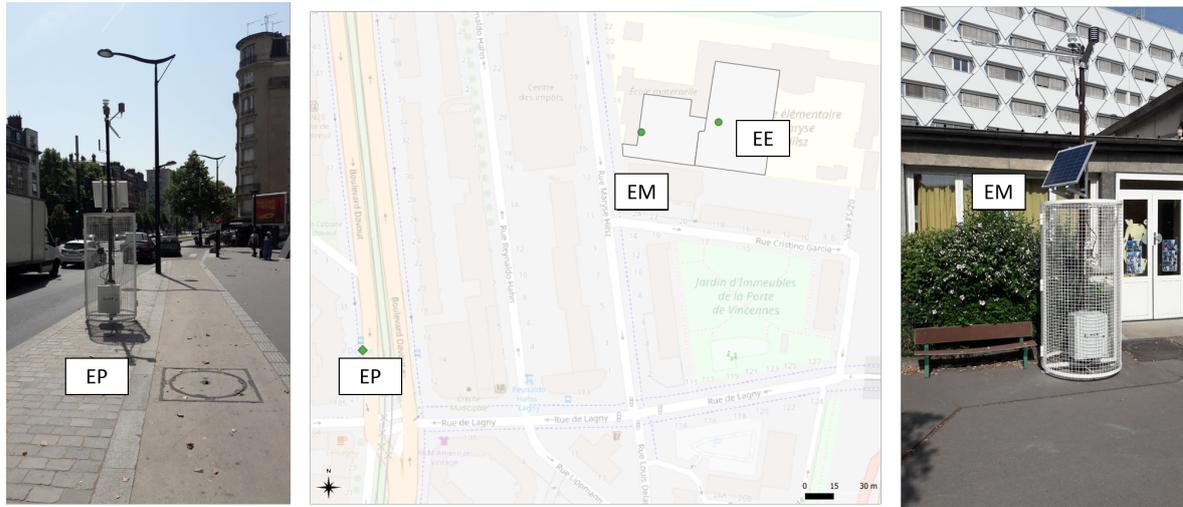


FIG. 4.3 – Vue cartographique de l'emplacement des stations témoin et d'étude sur le site de l'école Maryse Hilsz, photo des stations correspondantes installées. Le sigle EM correspond à l'école maternelle et EE à l'école élémentaire.

Afin de réduire au maximum les différences d'ensoleillement entre le site témoin et le site d'étude, les instruments ont une orientation et une exposition la plus semblable possible. Le Tableau 4.3 synthétise les principales métadonnées décrivant les alentours des stations météo, incluant leur position, le facteur vue du ciel ("Sky View Factor", noté SVF), l'orientation du site, le ratio d'aspect ("canyon aspect ratio", noté H/W), pour les rues uniquement) et la classification climatique locale ("Local Climate Zone", LCZ (Stewart and Oke, 2012)).

Le facteur de vue du ciel est calculé avec le logiciel SAGA - GIS d'après les préconisations de Dirksen et al. (2019). Le ratio d'aspect H/W est calculé sur QGIS en divisant la hauteur moyenne des bâtiments de l'îlot urbain bâti à proximité de la station par la largeur de la voie publique. Le ratio d'aspect de 12 stations n'a pas pu être calculé car la station se trouve à une intersection de voies ou sur une place. La carte des zones climatiques locales européennes établie par Demuzere et al. (2019) permet de déterminer la LCZ propre à chaque site avec une résolution de 100 m (Demuzere et al., 2022). La plupart des sites sont de classe 2 (ensemble d'immeubles compacts de hauteur moyenne), caractéristique de la métropole parisienne. À noter que deux sites sont classés en LCZ de type 5 (ensemble d'immeubles espacés), respectivement situés sur une place arborée dans le 13^{ème} arrondissement et dans le 20^{ème} arrondissement sur la Ceinture Verte à proximité du Boulevard Périphérique, à moins de 2 km au Nord-Ouest du bois de Vincennes.

En raison de contraintes opérationnelles, certaines stations météorologiques (Pierre Alviset, Jeanne D'Arc, Jean Dolent, Emériaux, M. Hilsz EE) ont dû être déplacées lors des travaux de réaménagement des cours d'école. Le déplacement a été fait de sorte à limiter les modifications de l'orientation des capteurs, notamment les radiomètres nets et thermomètres à globe noir, qui influent sur le bilan radiatif de la station. Les orientations des instruments sont choisies dans la mesure du possible identiques entre la station témoin et la station d'étude.

Indicateurs microclimatiques

Les paramètres microclimatiques mesurés par les stations météo fixes sont les variables de calcul de l'Indice Universel de Climat Thermique UTCI, indicateur que nous utilisons pour quantifier le stress thermique ressenti par les usagers de la cour (Błażejczyk et al., 2010).

La température moyenne radiante T_{mrt} traduit l'intensité du rayonnement thermique auquel est soumis un usager par les différentes sources qui l'entourent, c'est-à-dire le Soleil, la voûte céleste ainsi que les surfaces horizontales ou verticales à proximité/en ligne de vue. T_{mrt} dépend également de la température de l'air et de la vitesse de vent.

Afin de différencier les contributions des différents paramètres microclimatiques au stress thermique, nous nous intéressons ici à des grandeurs microclimatiques indépendantes correspondant aux variables de calcul de l'UTCI : la température de l'air, la vitesse de vent, l'humidité absolue et la charge radiante que nous explicitons ci-après. Il n'est pas prévu que les rénovations impactent le vent de manière significative, nous ne nous pencherons pas sur l'évolution de la vitesse de vent avant et après travaux.

Nous définissons la charge radiante, notée $\Delta T_{mrt,a}$ (en °C), comme l'écart entre la température moyenne radiante et la température de l'air :

$$\Delta T_{mrt,a} = T_{mrt} - T_a \quad (4.1)$$

La charge radiante exprime la résultante du bilan radiatif entre l'utilisateur et les surfaces environnantes (Bröde et al., 2012). Elle est essentiellement dominée par le passage à l'ombre ou au soleil, avec un écart $T_{mrt} - T_a$ de l'ordre de 10 °C entre un point situé au soleil ou à l'ombre. L'augmentation de l'albédo permet peut contribuer à augmenter $\Delta T_{mrt,a}$ en

accroissant le rayonnement réfléchi, mais reste toutefois marginale par rapport au passage du soleil à l'ombre et inversement. Nous pouvons donc corrélérer une variation significative de la charge radiante au passage à l'ombre ou au soleil d'une station fixe (Lindberg and Grimmond, 2011a; Lindberg et al., 2016).

L'humidité relative RH est définie comme le rapport de la pression de vapeur d'eau contenue dans un volume d'air p_v sur la pression de vapeur saturante de l'air p_s pour une température de l'air donnée :

$$RH = \frac{p_v}{p_s(T_a)} \quad (4.2)$$

avec

$$p_s = 6,11 \exp \frac{17,62 T_a}{T_a + 243,12} \quad (4.3)$$

où T_a est exprimée en °C (WMO, 2019). L'humidité absolue AH (en g/m^3) correspond à la masse de vapeur d'eau contenue dans un volume d'air sec pour une température de l'air donnée. D'après la loi des gaz parfaits, la masse de la vapeur d'eau m_v contenue dans $1 m^3$ d'air sec est donnée par l'équation 4.1.1 :

$$m_v = \frac{p_v M_v}{T_a R} \quad (4.4)$$

avec $R = 8,314 J.K^{-1}.mol^{-1}$ la constante universelle des gaz parfaits et $M_{eau} = 18,02 g.mol^{-1}$ la masse molaire de l'eau. D'après l'équation 4.2, nous pouvons écrire :

$$p_v = p_s \cdot RH \quad (4.5)$$

et en injectant l'équation 4.5 dans l'équation 4.1.1 on obtient l'expression de l'humidité absolue suivante :

$$AbsH = RH \frac{M_{eau} \cdot p_s}{(273,15 + T_a) R} \quad (4.6)$$

La température de l'air, l'humidité absolue, la charge radiante et l'UTCI sont les grandeurs que nous utilisons pour décrire l'état microclimatique de la cour d'école et sont comparées avant et après travaux.

4.1.2 Analyse statistique

La méthodologie que nous utilisons dans le cadre de l'évaluation des impacts microclimatiques est proposée par [Parison et al. \(2020b\)](#). Nous la décrivons brièvement ci-dessous. Cette méthodologie est construite sur le modèle BACI : Before-After-Control-Impact ([Stewart-Oaten et al., 1986](#)). Largement utilisée dans l'étude des écosystèmes et des systèmes biologiques, elle permet de tenir compte des différences préexistantes entre site d'expérimentation et site témoin qui peuvent induire des biais d'observation ([Hendel et al., 2016](#); [Smith, 2012](#); [Hurlbert, 1984](#); [Underwood, 1992](#)). Les paramètres microclimatiques sont observés sur un site témoin x_0 et un site d'étude x_1 , à une période t , avant et après intervention (se référer à la Figure 4.4). Dans le cadre de l'étude de l'impact microclimatique des transformations des cours d'écoles pilotes du projet FEDER UIA OASIS, on indiquera la période t avant travaux par l'indice *ref* et la période après travaux par l'indice *OASIS*. Le site témoin n'ayant pas été modifié par les travaux, son état reste le même (état *ref*) au cours du temps.

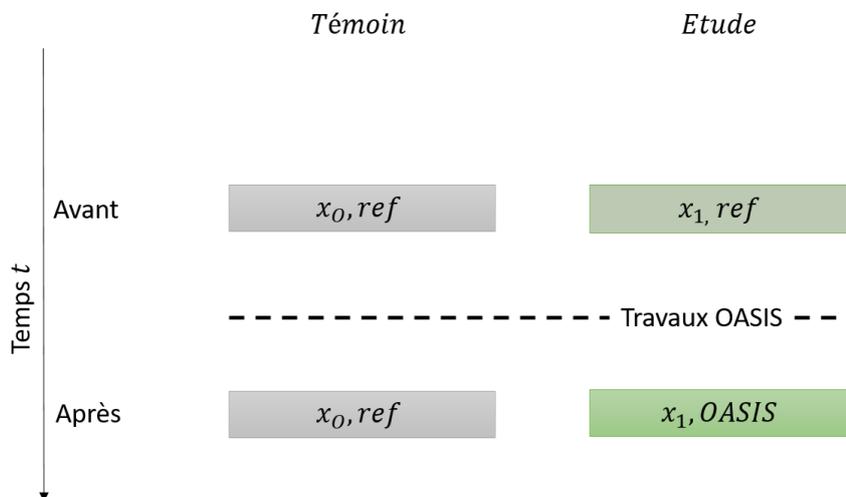


FIG. 4.4 – Méthodologie BACI : site témoin et site d'étude, avant et après travaux de réaménagement. La ligne en pointillés représente la réalisation des travaux de transformation des cours.

Notons $M_{x,t}$ le paramètre microclimatique d'intérêt mesuré pour une localisation x et une période t . La différence des observations appariées de $M_{x_0,t}$ et $M_{x_1,t}$ avant travaux ou après travaux permettent de dégager un profil interstation de référence (4.7) ou post-travaux (4.8), respectivement :

$$\Delta M_{ref} = M_{x_1,ref} - M_{x_0,ref} \quad (4.7)$$

$$\Delta M_{OASIS} = M_{x_1,OASIS} - M_{x_0,ref} \quad (4.8)$$

L'appariement des observations est illustré sur la Figure 4.5.

Pour chaque jour d'observation i pendant la période t , le profil interstation est établi en calculant à chaque pas de mesure l'écart entre la grandeur microclimatique mesurée à la station d'étude et celle mesurée à la station témoin au même instant. Le profil interstation avant travaux du paramètre M pour une journée d'observation i s'écrit :

$$\Delta M_{ref,i} = M_{x_1,ref,i} - M_{x_0,ref,i} \quad (4.9)$$

L'échantillonnage du jeu de données pour une journée d'observation i est un ensemble de 1440 mesures avec une période de 1 minute. Le nombre d'observations avant et après travaux est respectivement noté N_{ref} et N_{OASIS} . Le profil interstation moyen avant travaux du paramètre microclimatique M défini à l'équation 4.7 est ainsi la moyenne des profils interstations obtenus sur l'ensemble des jours d'observation avant travaux :

$$\Delta M_{ref} = \sum_i^{N_{ref}} \frac{1}{N_{ref}} \Delta M_{ref,i} \quad (4.10)$$

Il en est de même pour ΔM_{OASIS} .

Un profil interstation est établi pour chacune des grandeurs suivantes : température de l'air T_a , humidité absolue AH , charge radiante $\Delta T_{mrt,a}$, rayonnement net R_n ainsi que l'UTCI.

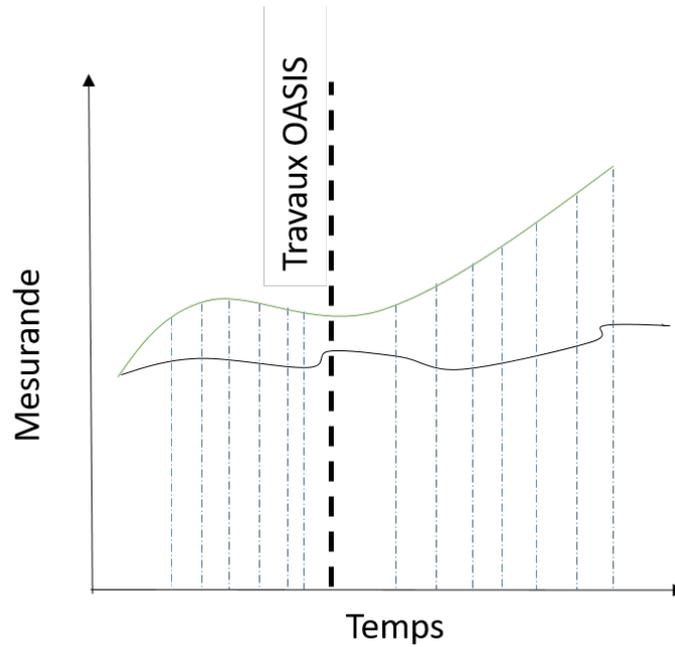


FIG. 4.5 – Exemple d'évolution d'une grandeur sur le site témoin (noir) et le site d'étude (vert) les paires d'échantillons de mesure sont reliées par les traits bleus verticaux (d'après [Smith \(2012\)](#)).

La comparaison des profils interstation avant et après travaux permet de détecter un impact (équation 4.11) dont la significativité statistique est estimée par un modèle dit "à effets fixes" :

$$\Delta M_{OASIS} - \Delta M_{ref} = I_{x_1, OASIS} \quad (4.11)$$

Cette différence entre les profils interstation avant et après travaux est aussi appelée "BACI-contrast" ([McDonald et al., 2000](#)). L'impact des travaux OASIS au sein de la cour $I_{x_1, OASIS}$ est jugé significatif si on peut écarter l'hypothèse nulle H_0 dans le test d'hypothèse suivant :

$$\begin{cases} H_0 : I_{x_1, OASIS} = 0 \\ H_1 : I_{x_1, OASIS} = 1 \end{cases}$$

On retient pour le test d'hypothèse un risque d'erreur de première espèce de 5%. Le test statistique est effectué pour chacune des paires de points de mesure, minute par minute.

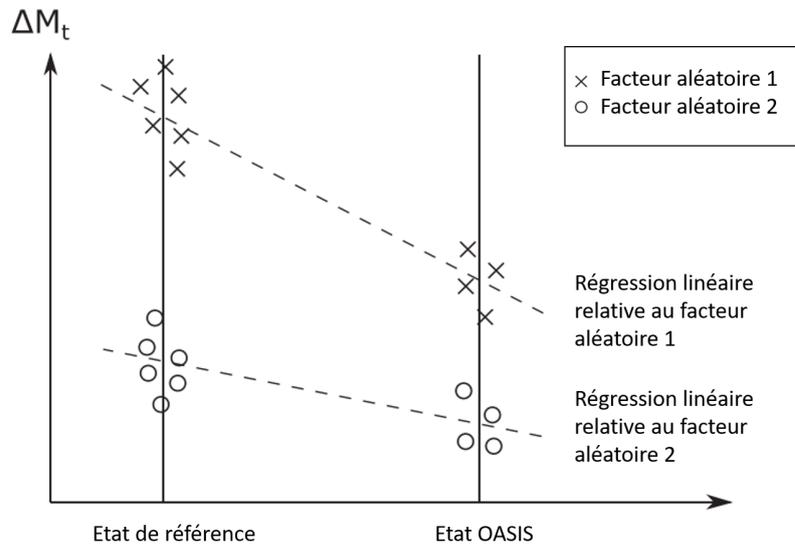


FIG. 4.6 – Représentation conceptuelle du modèle linéaire mixte appliqué aux observations avant et après travaux d’après [Parison et al. \(2020b\)](#). Pour chaque facteur aléatoire, ΔM_t évolue selon un modèle à effets fixes spécifique.

L’équation 4.12 illustre le modèle à effets fixes. La différence interstation à une période d’observation t (ΔM_t) est donnée comme une combinaison linéaire de la différence interstation avant travaux (ΔM_{ref}), t la fonction indicatrice relative aux travaux OASIS ($t = 0$ avant travaux, $t = 1$ après travaux) et ϵ_t le terme d’erreur (équation 4.12). La pente de la régression linéaire représente l’impact $I_{x_1, OASIS}$ que l’on cherche à estimer.

$$\Delta M_t = \Delta M_{ref} + I_{x_1, OASIS} \cdot t + \epsilon_t \quad (4.12)$$

[Parison et al. \(2020b\)](#) étendent le modèle à effets fixes au modèle linéaire mixte qui permet d’isoler l’impact d’effets aléatoires non contrôlés (ombrages, proximité avec un parc, un plan d’eau, ...) dont le concept est illustré à la Figure 4.6. Ce modèle nécessite toutefois un nombre d’observations relativement élevé ($N \in [10, 30]$) pour chaque état des effets aléatoires inclus dans l’analyse.

La maximisation du contraste BACI nécessite une stratification des données d’observation. Les critères météorologiques recherchés sont les critères de journées radiatives, (classe de stabilité de Pasquill A ou A-B ([Pasquill, 1961](#))), avec une très faible couverture nuageuse (< 3 octas) et des vents faibles de vitesse inférieure à 3 m/s. Ces conditions sont propices à

l'établissement du phénomène d'îlot de chaleur urbain et permettent de mettre en exergue les effets urbains locaux (Lowry, 1977; Cantat, 2004).

Le Tableau 4.4 récapitule le nombre de journées radiatives relevé sur chaque site, sur la base des valeurs de rayonnement net et des vitesses de vent. La période d'observation estivale s'étend du 1^{er} juin au 15 septembre pour les années 2019, 2020, 2021 et 2022. Le parc des stations a été installé courant juillet 2019.

TABLEAU 4.4 – Nombre de jours d'observation par site d'étude.

| Ecole | Avant travaux | Après travaux |
|-------------|---------------|---------------|
| QUATRE FILS | 30 | 12 |
| P.ALVISET | 4 | 20 |
| O.GREARD | 8 | 25 |
| KELLER | 20 | 31 |
| J.D'ARC | 5 | 20 |
| J.DOLENT | 10 | 20 |
| EMERIAU | 8 | 17 |
| TANDOU | 7 | 19 |
| M.HILSZ EM | 9 | 19 |
| M.HILSZ EE | 11 | 15 |

L'objectif de ce chapitre est de mettre en œuvre une méthodologie d'évaluation de l'impact des travaux de réaménagement sur les paramètres microclimatiques et le stress thermique des usagers. Après avoir présenté le réseau de station météo déployé pour assurer un suivi microclimatique des sites continu dans le temps, nous illustrons la méthodologie d'analyse par un cas d'étude.

EVALUATION MICROCLIMATIQUE CONTINUE DANS LE TEMPS PAR MESURES FIXES

TABLEAU 4.1 – Date d’installation de la paire de station OASIS et des périodes de travaux au sein des cours OASIS durant lesquelles les stations ont été déposées.

| ECOLE | Station installée | Station déposée | Station réinstallée |
|-------------|-------------------|-----------------|---------------------|
| QUATRE FILS | 23/07/2019 | 05/07/2021 | 01/09/2021 |
| P. ALVISET | 23/07/2019 | 17/06/2020 | 22/04/2021 |
| O. GREARD | 23/07/2019 | 11/06/2020 | 02/09/2020 |
| KELLER | 24/07/2019 | - | - |
| J. D’ARC | 24/07/2019 | 17/06/2020 | 31/08/2020 |
| J. DOLENT | 24/07/2019 | 07/07/2020 | 31/08/2020 |
| EMERIAU | 24/07/2019 | 26/06/2020 | 03/09/2020 |
| TANDOU | 23/07/2019 | 18/06/2020 | 09/09/2020 |
| M. HILSZ EE | 24/07/2019 | 24/06/2020 | 26/02/2021 |
| M. HILSZ EM | 24/07/2019 | 24/06/2020 | 14/09/2020 |

TABLEAU 4.3 – Caractéristiques du réseau de stations d’observation. Le sigle C correspond à la station située dans la cour, et EP l’espace public. Le numéro du site correspond à l’emplacement indiqué sur la Figure 4.1

| Site | Ecole | Station | Latitude | Longitude | SVF | Orientation | H/W | LCZ |
|------|-------------|---------|-----------|-----------|------|-------------|-----|-----|
| 1 | QUATRE FILS | C | 48,860489 | 2,360451 | 0,09 | - | - | 2 |
| | | EP | 48,860056 | 2,36087 | 0,53 | NO - SE | 0,5 | 2 |
| 2 | P. ALVISET | C | 48,841062 | 2,351394 | 0,49 | - | - | 2 |
| | | EP | 48,840739 | 2,352176 | 0,51 | O - E | 1 | 2 |
| 3 | O.GREARD | C | 48,879032 | 2,317794 | 0,27 | - | - | 2 |
| | | EP | 48,87902 | 2,318952 | 0,33 | NO - SE | 2 | 2 |
| 4 | KELLER | C | 48,853797 | 2,377283 | 0,15 | - | - | 2 |
| | | EP | 48,853421 | 2,378615 | 0,47 | O - E | 1,1 | 2 |
| 5 | J.D’ARC | C | 48,830417 | 2,36875 | 0,56 | - | - | 5 |
| | | EP | 48,830429 | 2,367741 | 0,65 | NO - SE | - | 5 |
| 6 | J.DOLENT | C | 48,833371 | 2,339482 | 0,72 | - | - | 2 |
| | | EP | 48,831472 | 2,337774 | 0,64 | SO - NE | - | 2 |
| 7 | EMERIAU | C | 48,851351 | 2,287697 | 0,76 | - | - | 2 |
| | | EP | 48,851872 | 2,28964 | 0,60 | NO - SE | 1,2 | 2 |
| 8 | TANDOU | C | 48,886151 | 2,380841 | 0,76 | - | - | 2 |
| | | EP | 48,886151 | 2,380841 | 0,57 | SO - NE | 0,5 | 2 |
| 9 | M.HILSZ EE | C | 48,850446 | 2,413694 | 0,67 | - | - | 5 |
| 10 | M.HILSZ EM | C | 48,850409 | 2,413109 | 0,55 | - | - | 5 |
| | | EP | 48,849421 | 2,411186 | 0,65 | N - S | 0,4 | 2 |

4.2 Cas d'étude : L'école maternelle Tandou

Nous nous intéressons au site de l'école maternelle Tandou située dans le 19^{ème} arrondissement, au Nord-Est de Paris (site numéro 8 sur la Figure 4.1). La cour est majoritairement asphaltée (valeur moyenne d'albédo $\alpha = 0.13$). La superficie de la cour avant travaux est de 960 m^2 : 749 m^2 de revêtement asphalté, 95 m^2 de sol amortissant et 116 m^2 de pleine terre. Les travaux de réaménagement comprennent l'extension de la cour sur un terrain sportif de 650 m^2 juxtaposé au Sud de la cour. Ils prévoient également d'augmenter la fraction végétalisée de la cour et de remplacer le revêtement sportif par des copeaux de bois.

La paire de station a été installée le 23/07/2019. L'emplacement des deux stations est reporté sur la Figure 4.7. Le nombre de jours d'observation par mois retenu pour la paire de stations du site Tandou est récapitulé dans le Tableau 4.5. Deux dates supplémentaires ont été rajoutées correspondant aux journées du 30 et 31 mai 2021 qui répondaient aux critères d'ensoleillement et de vitesse de vent.

TABLEAU 4.5 – Nombre de jours radiatifs retenus sur le site Tandou

| | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
|-----------|------|------|------|------|
| Juin | - | 2 | 3 | - |
| Juillet | 1 | - | 0 | 9 |
| Août | 4 | - | 1 | 10 |
| Septembre | 0 | 2 | 2 | 0 |

La sonde d'humidité de la station témoin ayant été endommagée sur la période du 02/07/2022 au 19/07/2022, ces jours ne sont pas pris en compte pour le calcul de l'humidité absolue et de l'UTCI.

De même, à partir de juillet 2022, l'anémomètre de la station témoin ayant été endommagé, les valeurs de vitesse de vent utilisées pour les calculs de température moyenne radiante et d'UTCI sont celles de la station d'étude, dont le profil de vitesse de vent est similaire à celui de la station témoin.

Ces deux profils sont illustrés sur la Figure 4.8. Le profil moyen est l'ensemble des mesures de vitesse de vent enregistrées sur le nombre de journées de référence. L'enveloppe représente l'écart-type des valeurs mesurées sur les N_{ref} jours de référence.

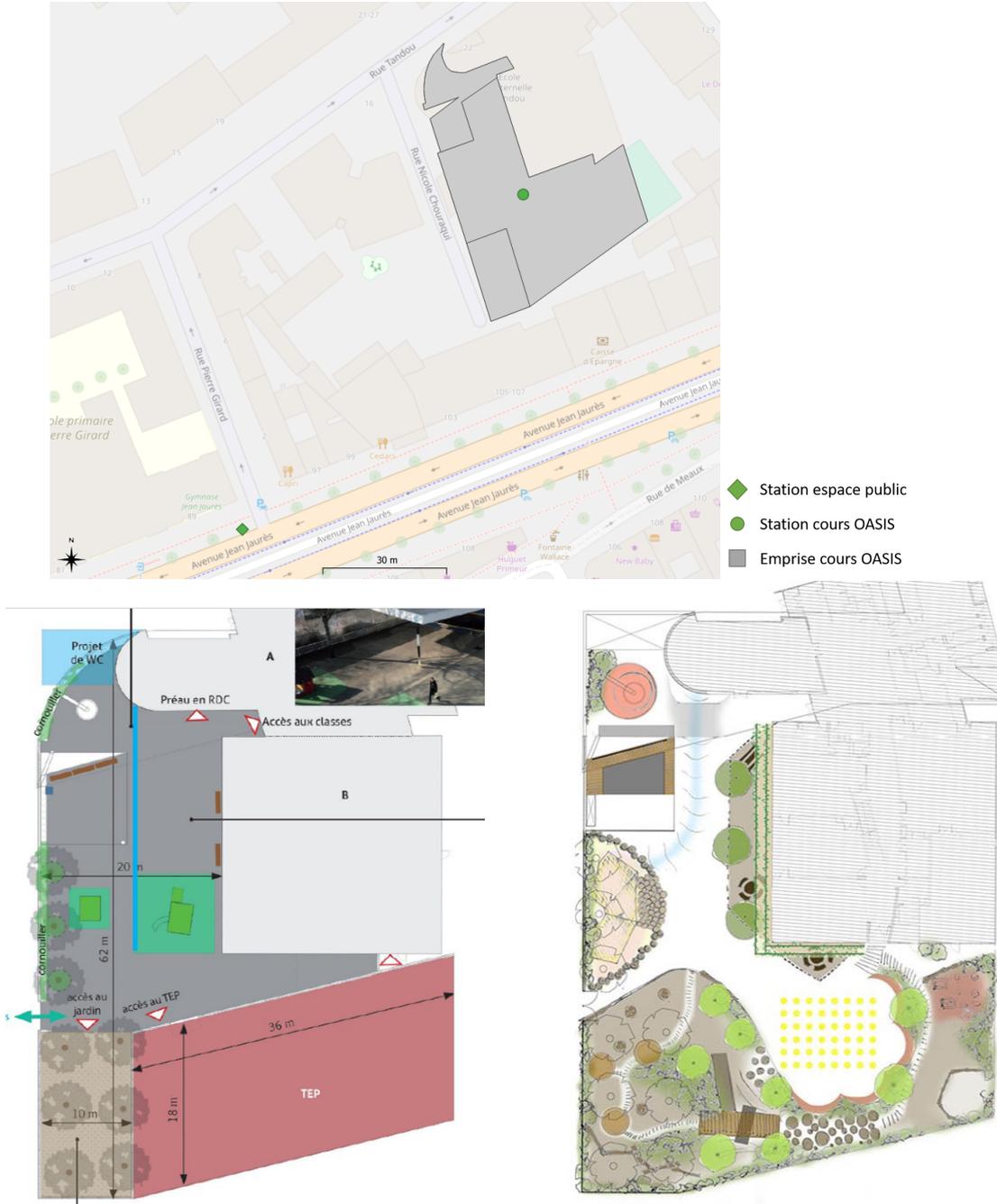


FIG. 4.7 – Plan du site Tandou (haut) et plans d'aménagement de l'école avant (bas gauche) et après (bas droite) travaux (CAUE de Paris, 2019).

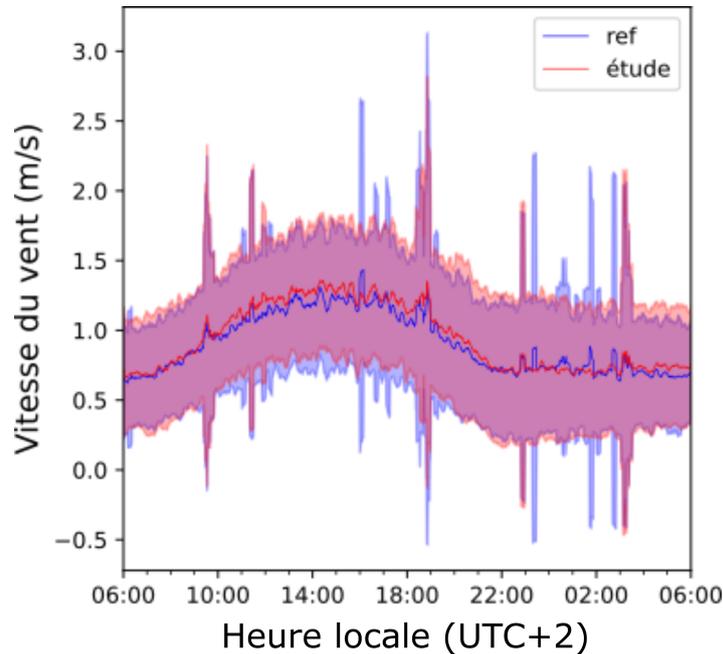


FIG. 4.8 – Profils moyens de la vitesse du vent mesurée à la station d'étude et la station témoin à l'été 2021 après travaux. L'heure est indiquée en temps local.

Les valeurs de vitesse de vent fluctuent entre 0 et 2 m/s et satisfont donc le critère de journées radiatives. La valeur moyenne des vitesses de vent croît à partir de 0,7 m/s dès 6h J jusqu'à atteindre un maximum de l'ordre de 1,2 m/s à 14h. Ensuite, elle décroît et se stabilise autour de 0,7 m/s à partir de 22h, et ce, jusqu'à 6h J+1 du matin.

4.2.1 Profil interstation moyen

La Figure 4.9 montre les profils interstation moyens établis avant travaux. L'enveloppe représente l'écart type calculé sur le jeu de données considéré.

Température de l'air

L'écart de température (Figure 4.9 (a)) entre la cour Tandou et l'espace public varie entre -0,5 °C et +1,25 °C entre 6h et 17h. Le matin avant 8h puis de 19h à 6h J+1, T_a oscille autour de -0,5 °C. Les températures plus faibles en dehors des périodes d'ensoleillement témoignent du rafraîchissement radiatif important que connaît la cour Tandou, très dégagée, par rapport à l'espace public.

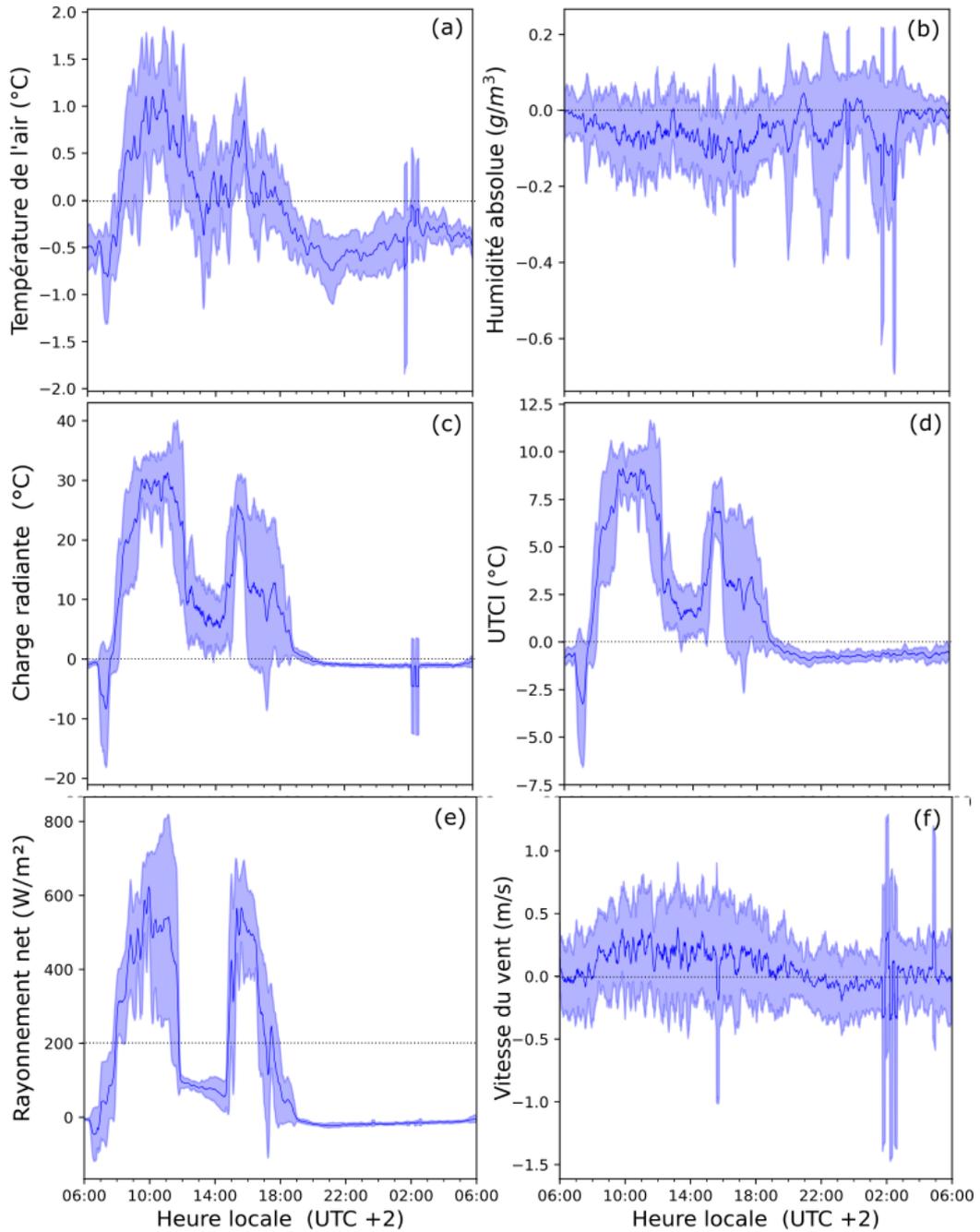


FIG. 4.9 – Profil interstation moyen établi sur la base des journées de référence 2019 sur le site Tandou pour la température de l'air (a), l'humidité absolue (b), la charge radiante (c), l'UTCI (d), le rayonnement net (e) et la vitesse du vent (f). L'heure est indiquée en temps local (UTC + 2).

Humidité absolue

L'écart moyen d'humidité absolue varie entre 0 et $-0,2 \text{ g/m}^3$ tout au long de la journée, avec des fluctuations plus marquées autour de cette moyenne entre 18h et 2h J+1 (Figure 4.9 (b)). Ces variations indiquent l'absence de différence notable d'humidité absolue entre la cour et l'espace public.

Charge radiante

L'écart de charge radiante $\Delta T_{mrt,a}$ (Figure 4.9 (c)) entre la cour Tandou et l'espace public est de l'ordre de $+30 \text{ }^\circ\text{C}$ entre 8h et 12h, retombe à $+10 \text{ }^\circ\text{C}$ entre 12h et 14h puis entre 16h et 19h avec un pic à $+25 \text{ }^\circ\text{C}$ entre 15h et 16h. Ces variations sont liées à la situation de la station témoin qui est significativement plus ombragée entre 8h et midi et entre 15h et 16h.

UTCI

Les différences d'Universal Thermal Climate Index (UTCI) résultent des différences soulignées pour les autres paramètres météorologiques, en particulier les différences d'ensoleillement (Figure 4.9 (d)). Les variations les plus importantes coïncident avec celles observées pour ΔT_{mrt} , c'est-à-dire entre 8h-12h et 15h-18h lorsque la station témoin est ombragée, mais pas celle de la cour, avec des écarts d'UTCI de l'ordre de la dizaine de degrés.

Rayonnement net

La différence de rayonnement net mesuré à 4 m de hauteur vient étayer les courbes $\Delta T_{mrt,a}$ et UTCI (Figure 4.9 (e)). La station témoin est ombragée sur les créneaux 6h-12h et 15h-18h tandis que la station d'étude ne l'est pas. Ce masque est dû à l'emplacement de la station témoin au sein d'un canyon urbain, contrairement à la station d'étude située en plein soleil dans un endroit dégagé au sein de la cour de l'école maternelle. De légères différences avec $\Delta T_{mrt,a}$ sont visibles et sont attribuables à la différence de hauteur de ces deux capteurs.

Vitesse du vent

Les différences de vitesse de vent sont inférieures à $0,5 \text{ m/s}$ et indiquent une absence de différence notable (Figure 4.9 (f)). Cette observation corrobore le choix des journées d'observations qui répondent à des critères de vitesses de vent très faibles.

4.2.2 Impacts microclimatiques $I_{x_1,OASIS}$

La Figure 4.10 reporte les résultats obtenus par l'application de la méthodologie d'analyse statistique décrite à la section 4.1. Les effets moyens correspondent à l'ensemble des impacts

microclimatiques $I_{x_1, OASIS}$ (voir l'équation 4.11) calculés à chaque pas de temps.

Les points bleus représentent les effets moyens, l'enveloppe bleue transparente représente l'intervalle de confiance à 95% des effets moyens. Les événements en dehors de cet intervalle sont considérés comme statistiquement significatifs, c'est-à-dire que le test statistique permet de rejeter l'hypothèse H_0 présentée en section 4.1.

L'effet moyen des travaux sur la température de l'air (Figure 4.10 (a)) est marqué en début de matinée avec une réduction de l'ordre de 2°C. L'humidité absolue (figure 4.10 (b)) n'est pas modifiée de manière significative (valeur moyenne de l'écart autour de 0.01 g/m³). Nous constatons une réduction de l'ordre de 20°C de la charge radiante entre 7h et 11h du matin, ainsi que 15h et 16h (Figure 4.10 (c)) qui se répercute sur l'UTCI avec une réduction maximale du stress thermique au sein de la cour de 10°C à 8h, et de l'ordre de 5°C entre 7h et 11h ainsi que 15h et 16h (Figure 4.10 (d)). À l'inverse, la charge radiante augmente de 20°C entre 18h et 19h, entraînant une augmentation de 5°C sur l'UTCI.

La chute de 20°C de la charge radiante (qui se répercute sur l'UTCI) ne peut être expliquée que par de la création d'ombrage, les modifications ne pouvant générer de telles fluctuations (Lindberg et al., 2016). Or il n'y a pas eu de création d'ombrage. Il s'agit en réalité de la détection automatique de faux impacts qui sont attribuables à la modification de l'ensoleillement de la paire de stations que nous détaillons ci-après.

En effet, la méthodologie proposée par Parison et al. (2020b) repose sur l'hypothèse que les différences préexistantes entre stations d'étude et témoin sont constantes tout au long de la période d'évaluation, en particulier pour les différences d'ensoleillement des stations. Si cette hypothèse est facilement validée lorsque stations témoin et d'étude sont situées dans une même rue, avec la même orientation et des masques solaires similaires, cela n'est aussi facile à vérifier entre un point donné dans une cour d'école et l'espace public alentours, d'autant que le choix de la position de l'une et de l'autre est contraint. En effet, les stations météo ne peuvent pas être posées à n'importe quel endroit sur la voie publique ou au milieu des cours d'école pour des questions de sécurité et de praticité. Les masques solaires ne sont donc pas forcément les mêmes entre les deux stations, ce qui entraîne des variations dans la différence interstation d'ensoleillement au cours de la période estivale. Les masques solaires d'une station météo sont constitués de l'ensemble des éléments morphologiques (arbres, bâtiments, relief, montagnes, ...) qui peuvent faire de l'ombre pendant la journée au niveau de la station.

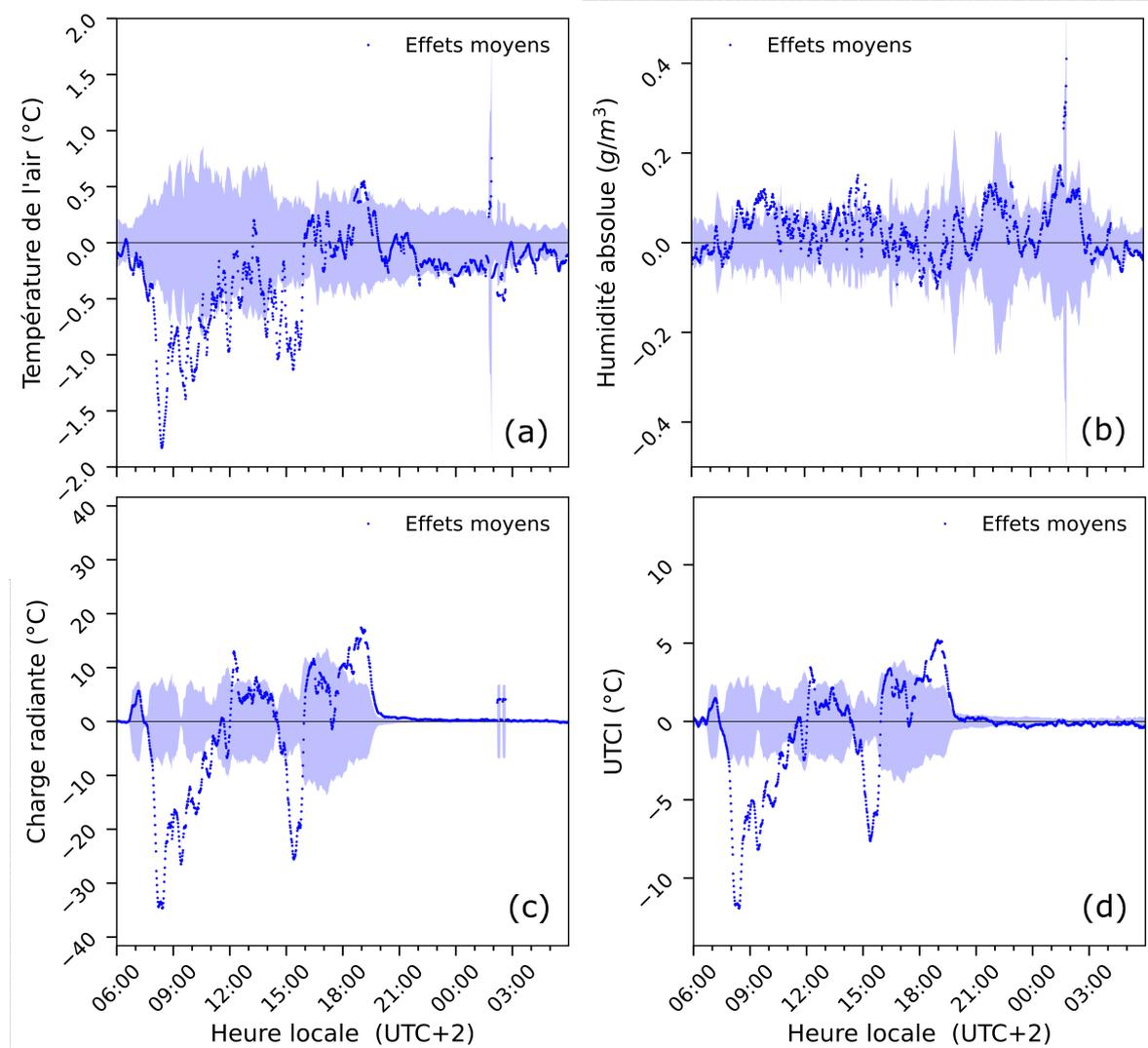


FIG. 4.10 – Impact microclimatique des travaux OASIS sur la température de l'air (a), l'humidité absolue (b), la charge radiante (c), et l'UTCI (d). Les points bleus représentent les effets moyens, l'enveloppe bleue transparente représente l'intervalle de confiance à 95% des effets moyens. Les événements en dehors de cet intervalle sont considérés comme statistiquement significatifs.

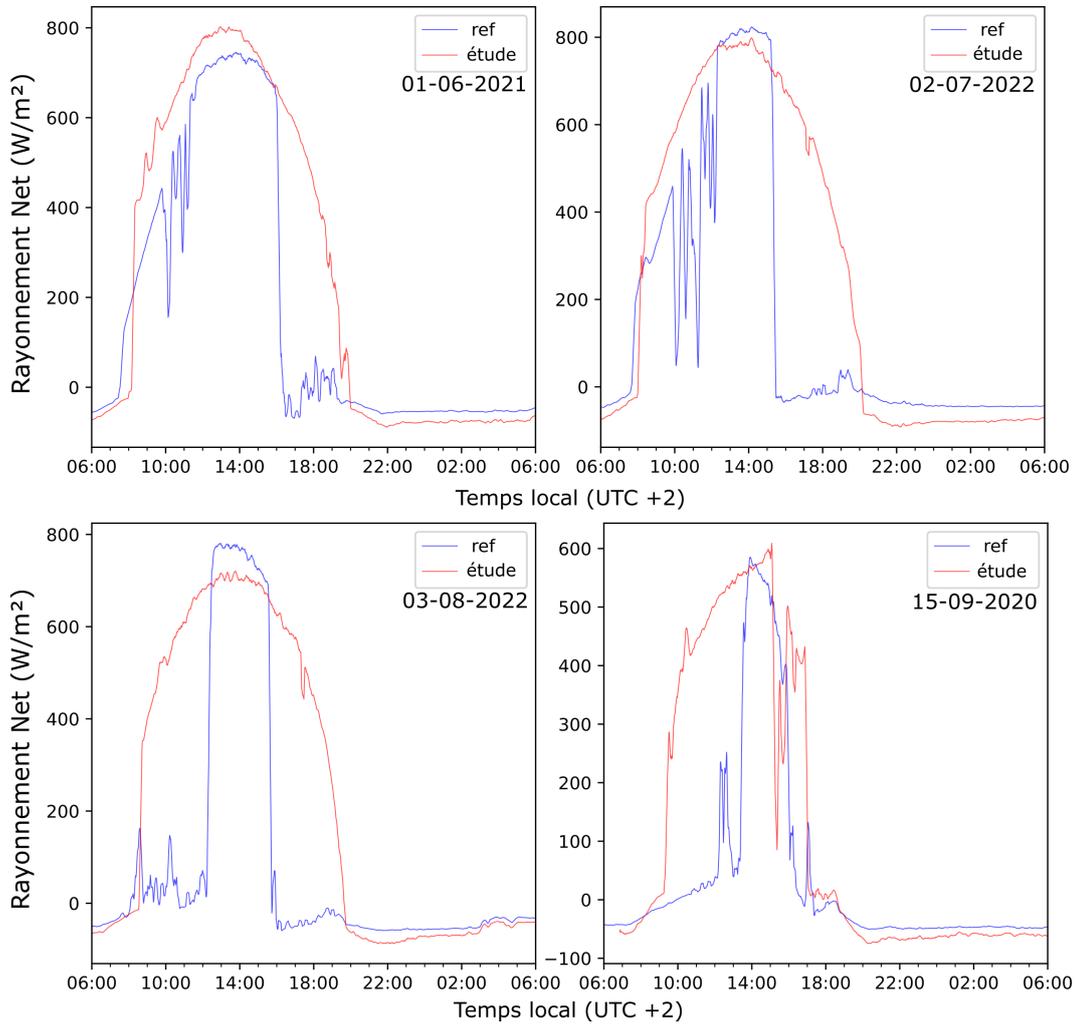


FIG. 4.11 – Rayonnement net enregistré à Tandou par les stations météo témoin et d'étude sur différentes journées radiatives de l'été, attribuables uniquement aux variations d'ombrage.

En fonction du mois de l'année et de la course du soleil, les ombres n'ont pas la même portée. Si les capteurs à hauteur d'homme, en particulier le globe noir, passent à l'ombre en fin d'été alors qu'ils ne l'étaient pas en début d'été pour une seule des deux stations utilisées pour l'analyse d'un site, la modification de l'ombrage risque de se répercuter au niveau du profil interstation de la charge radiante et par la suite de l'UTCI. Cela risque de provoquer la détection de faux impacts via la méthode BACI si la caractérisation avant ou après travaux ne couvre pas uniformément toutes les périodes de l'été, en particulier/par exemple lorsqu'un déséquilibre des jours au cours de la période de caractérisation (estivale) existe entre périodes avant ou après intervention. Ce type de variations d'ensoleillement

nécessite un pré-traitement spécifique pour éviter la détection de ces faux impacts lors de la mise en œuvre de la méthode BACI.

La Figure 4.11 représente le rayonnement net à 4 m enregistré par la station témoin et la station d'étude du site Tandou pour différentes journées radiatives pendant la période d'observation. La station météo étant installée au milieu de la cour dans une zone dégagée, elle bénéficie d'une exposition plein soleil durant les mois de juin, juillet et août. Le rayonnement net suit des courbes en cloche caractéristiques d'une journée radiative. Le rayonnement net est tronqué au mois de septembre à partir de l'après-midi en raison de l'ombrage des arbres obstruant le soleil tel qu'illustré par le diagramme solaire de la Figure 4.12.

La station témoin a été installée au sein de l'avenue Jean Jaurès à proximité, dans un canyon urbain fortement arboré et est donc soumise à des ombres qui se déplacent durant l'été différemment que pour la station d'étude. La station est notamment à l'ombre de l'arbre visible sur la droite au premier plan à partir de 16h et par la cime des arbres situés au Sud-Est de l'autre côté de l'avenue entre 10h et 12h en juin, tandis que fin juillet-début août, la station est à l'ombre toute la journée à l'exception de la période entre 12h et 16h. En septembre, l'ensoleillement des deux stations météo est modifié avec une réduction de la période d'ensoleillement dans l'après-midi due au zénith plus bas du soleil. En fonction de la période d'observation, les courbes de rayonnement net sont modifiées, ce qui induit des fluctuations dans le profil interstation moyen, tel qu'illustré par la Figure 4.13.

Le profil moyen avant travaux a été établi sur la base de 7 jours radiatifs retenus en 2019 et au début de l'été 2020 (se référer au Tableau 4.5). La plupart de ces journées se situent après le 25 juillet. La Figure 4.13 B illustre particulièrement l'importance du nombre de jours d'observation : durant l'année 2021, les journées radiatives retenues pour l'étude se concentrent sur la période de juin et juillet, soit en dehors de la période de caractérisation avant travaux. Les masques solaires se déplacent et modifient le profil interstation moyen. En augmentant la durée de la période de caractérisation après travaux grâce à l'été 2022, le profil interstation est rétabli sur la Figure 4.13 C. Cela tient notamment aux observations de 2022 qui ont majoritairement eu lieu durant les mois de juillet et d'août, comme en 2019. Une caractérisation du décalage des masques sur la période estivale avant travaux est alors nécessaire pour déterminer les périodes présentant des différences communes pour l'analyse statistique.

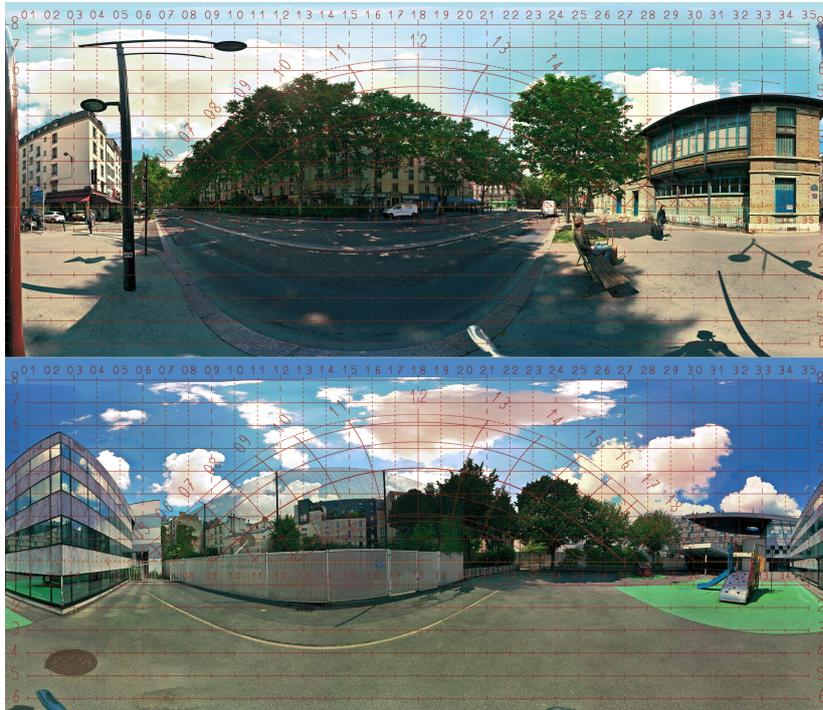


FIG. 4.12 – Diagramme solaire pour la station témoin (haut) et la station d'étude (bas) (d'après Gérard Mayençon pour Météo France).

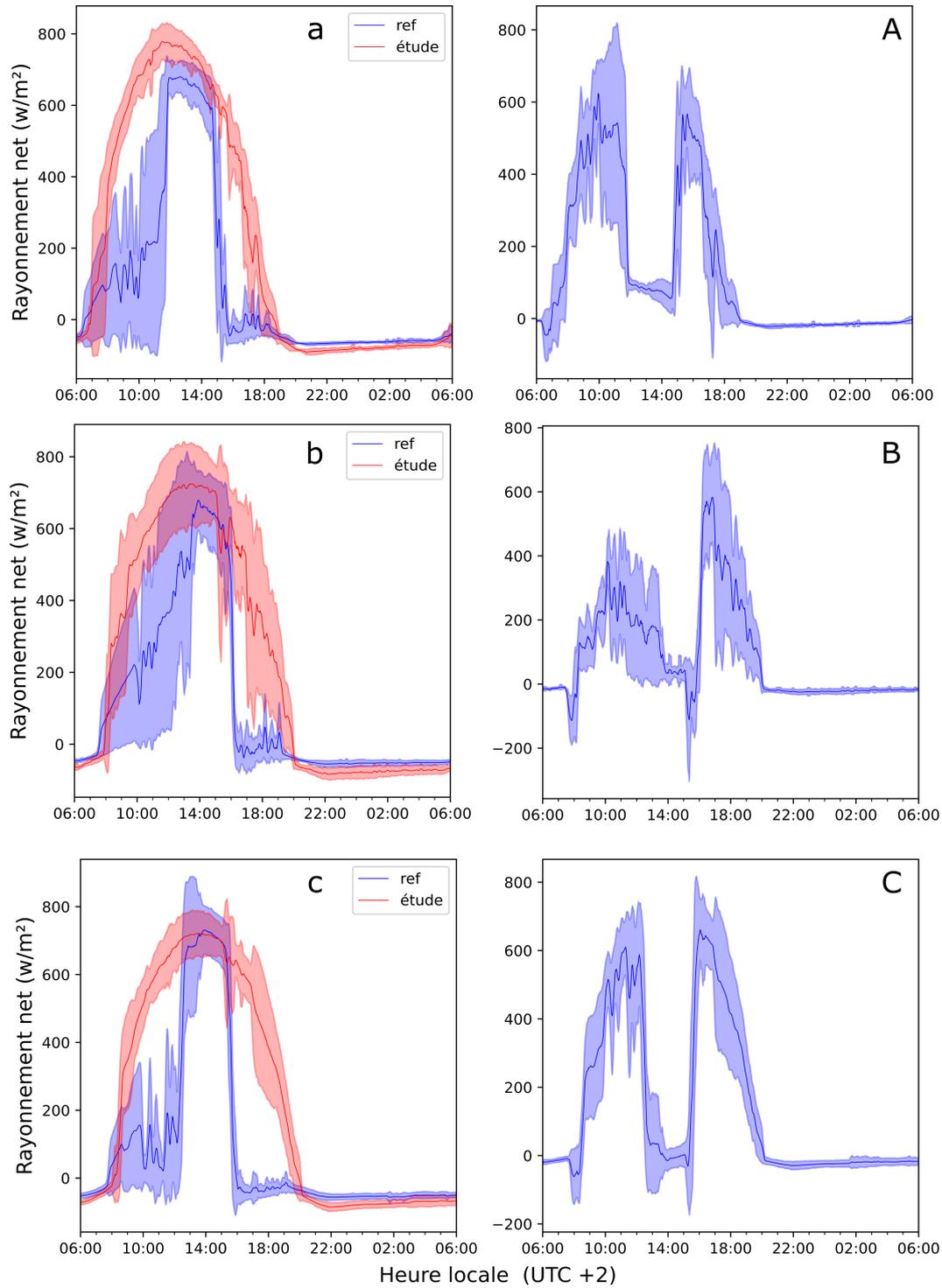


FIG. 4.13 – A gauche : rayonnement net enregistré sur la station témoin (en bleu) et d'étude (en rouge) moyenné avant travaux (a), et après travaux en 2021 (b) et en 2021 et 2022 (c). A droite : le profil interstation moyen avant la phase de travaux (A), le profil interstation moyen après travaux en 2021 (B) et le profil interstation moyen en 2022 (C).

4.2.3 Prétraitement des masques solaires

Il est important de noter que la variation des masques représentée à la Figure 4.11 est observée à une hauteur de 4 m. Afin de prendre en compte les différences d'ensoleillement qui seront effectivement ressenties par l'utilisateur, il convient d'étudier l'environnement thermique radiatif à hauteur de piéton, qui permet notamment de tenir compte d'arbres à proximité. La caractérisation des masques solaires se fait donc par le biais de l'étude de la charge radiante $\Delta T_{mrt,a}$. La période d'observation estivale est découpée en 4 périodes d'ensoleillement P1, P2, P3, P4 correspondant aux mois de juin, juillet, août et septembre pour caractériser l'évolution de la trajectoire du Soleil. Durant chacune de ces périodes, la trajectoire du soleil est à une hauteur angulaire δ appelée déclinaison définie par rapport à l'horizontale illustrée à la Figure 4.14. Pour la période d'observation estivale, la déclinaison est maximale en juin et décroît au cours de l'été pour atteindre son minimum en septembre.

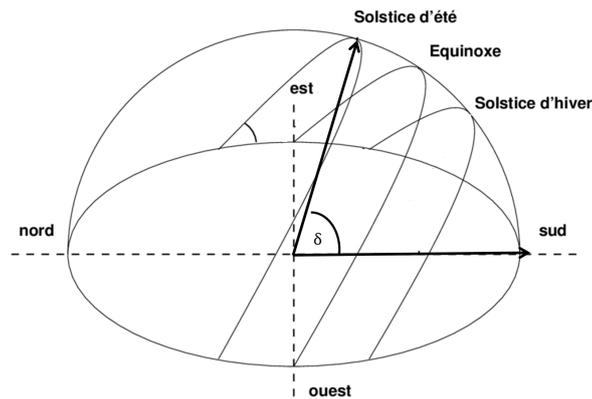


FIG. 4.14 – Trajectoire diurne du Soleil pour les solstices et les équinoxes dans l'hémisphère nord (Vial, 2007).

Pour chacune des périodes P1, P2, P3 et P4, les journées radiatives sont retenues pour tracer la courbe $\Delta T_{mrt-a} = T_{mrt} - T_a$. Sur la Figure 4.16 (a) et (b) sont illustrées les courbes de charge radiante établies pour la période P1 sur la station d'étude et la station témoin. La charge radiante au sein de la cour d'école se maintient aux alentours de 15°C en journée, (de 8h à 18h). Sur l'espace public, la charge radiante est égale à 15°C entre 7h et 8h, entre 9h et 10h, et de 12h à 15h. En dehors de ces périodes, elle varie entre 0 et 5°C en journée et se stabilise à partir de 21h autour de 0°C. L'évolution de la charge radiante de la période P1, qui couvre le mois de juin, peut être corrélée aux courbes de rayonnement net du 1^{er} juin 2021 et du 2 juillet 2022 de la Figure 4.11. Les chutes de rayonnement net coïncident avec les réductions de la charge radiante sur chacune des stations. Cette différence de charge radiante

entre les deux stations est à l'origine des écarts d'UTCI observés sur le profil interstation, et biaise les résultats d'analyse statistique en faisant apparaître une création d'ombrage au sein de la cour alors que ce n'est pas le cas.

Afin de tenir compte des éventuelles variations non simultanées du profil interstation de la charge radiante, nous devons procéder à la caractérisation de son état, ensoleillé ou ombragé pour chacune des stations appariées d'un site donné. Afin de caractériser l'état ensoleillé, nous définissons un seuil $\Delta T_{mrt-a,max}$ sur la base de charge radiante maximale atteinte au cours d'une période donnée. Ce seuil est défini comme suit :

$$\Delta T_{mrt-a,max} = \frac{\max(\Delta T_{mrt-a})}{2} \tag{4.13}$$

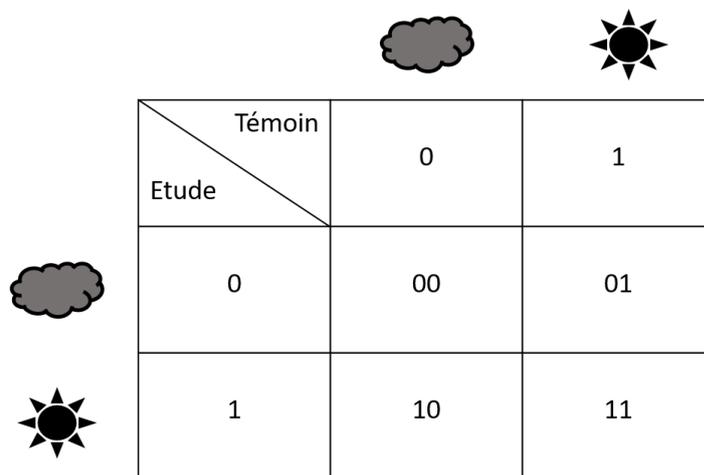


FIG. 4.15 – Tableau logique de l'état d'ensoleillement d'une paire de stations d'un site donné.

Si la charge radiante d'une des stations est inférieure au seuil $\Delta T_{mrt-a,max}$ son globe noir sera considéré comme étant à l'ombre. Sinon, il sera considéré être au soleil. Cette analyse est réalisée pour la station d'étude et la station témoin de chaque site. Ces informations pour la paire de station sont binarisées selon la Table 4.15.

Les Figures 4.16 A et B illustrent la binarisation des courbes de charge radiante pour deux stations. Ainsi, l'état ensoleillé d'une station prise seule sera codé par le chiffre 1, l'état ombragé par le chiffre 0. Quatre configurations d'ensoleillement sont possibles pour une paire de stations :

Etat 00 : la station d'étude et la station témoin sont à l'ombre.

Etat 10 : la station d'étude est au soleil, la station témoin est à l'ombre.

Etat 01 : la station d'étude est à l'ombre, la station témoin est au soleil.

Etat 11 : la station d'étude et la station témoin sont au soleil.

Les états d'ensoleillement sont codés pour chaque pas de mesure sur les périodes P1, P2, P3 et P4. Nous obtenons 4 profils d'état d'ensoleillement, un pour chaque période. Ces profils sont analysés en vue d'isoler les moments au cours de la journée où le profil interstation de la charge radiante est stable au long de l'été. Concrètement, cela correspond aux moments de la journée qui conservent leur état d'ensoleillement au cours des 4 périodes de l'été. Cela correspond à l'intersection de profils de ces quatre périodes.

Le filtrage obtenu permet de conserver les moments de la journée où les résultats de l'analyse statistique ne devraient pas être biaisés par les modifications d'ensoleillement qui ont lieu naturellement au cours de l'été, indépendamment de toute intervention sur les cours pilotes.

L'intersection des 4 profils correspond aux données acceptables communes illustrées à la Figure 4.17 qui seront retenues pour l'analyse statistique de la charge radiante et de l'UTCI. Les données de température de l'air et d'humidité absolue ne sont pas filtrées, dans la mesure où les instruments sont sous abri solaire ventilé. Dans notre cas d'étude, l'algorithme a été appliqué aux journées radiatives avant et après travaux.

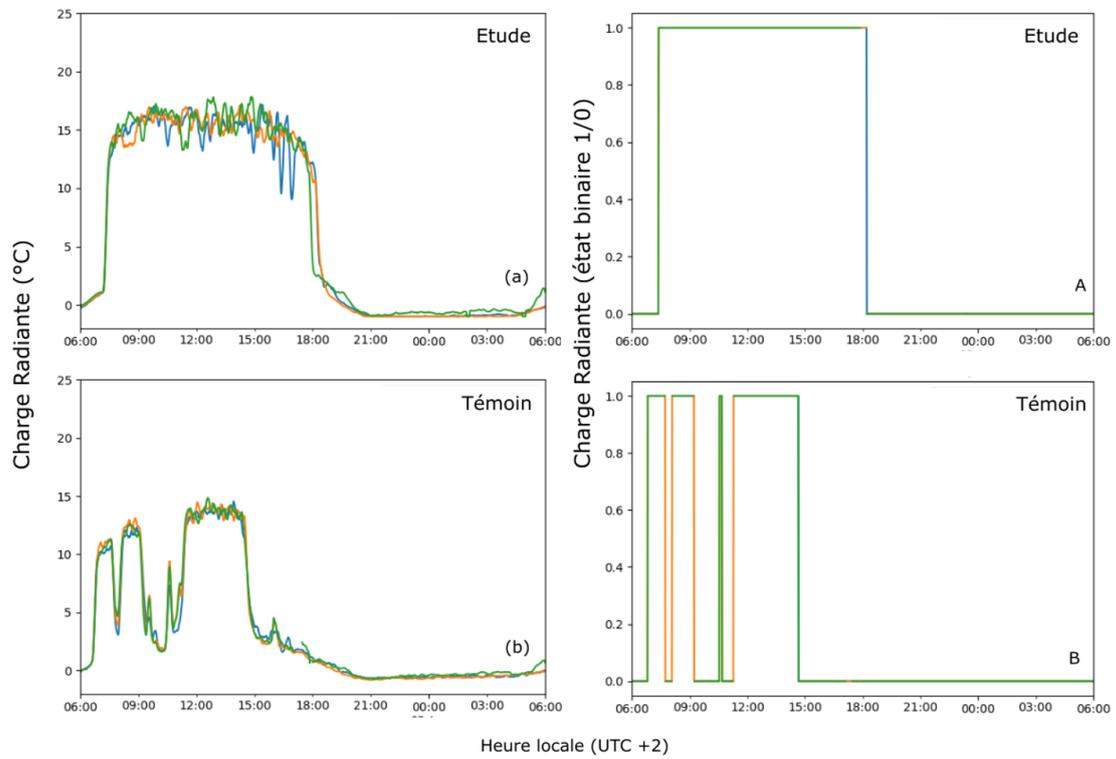


FIG. 4.16 – Charge radiante (gauche) et binarisation de celle-ci (droite) pour les stations d'étude (haut) et témoin (bas) du site Tandou en période P1.

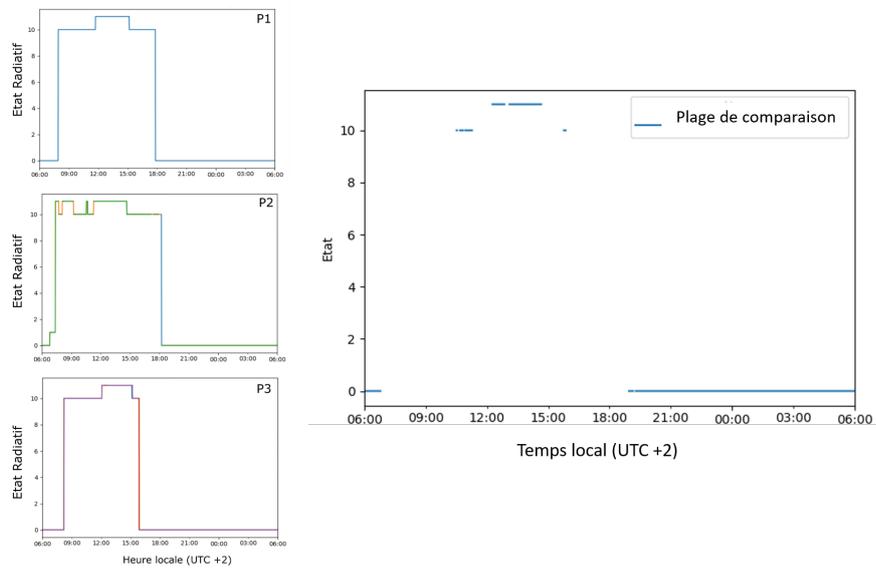


FIG. 4.17 – Profil binarisé représentant les états d’ensoleillement pour la paire de stations fixes du site Tandou sur les 3 périodes P1, P2 et P3 (gauche). Les données retenues correspondent à des états d’ensoleillement communs aux deux stations sur l’ensemble de l’été (droite).

4.2.4 Résultats

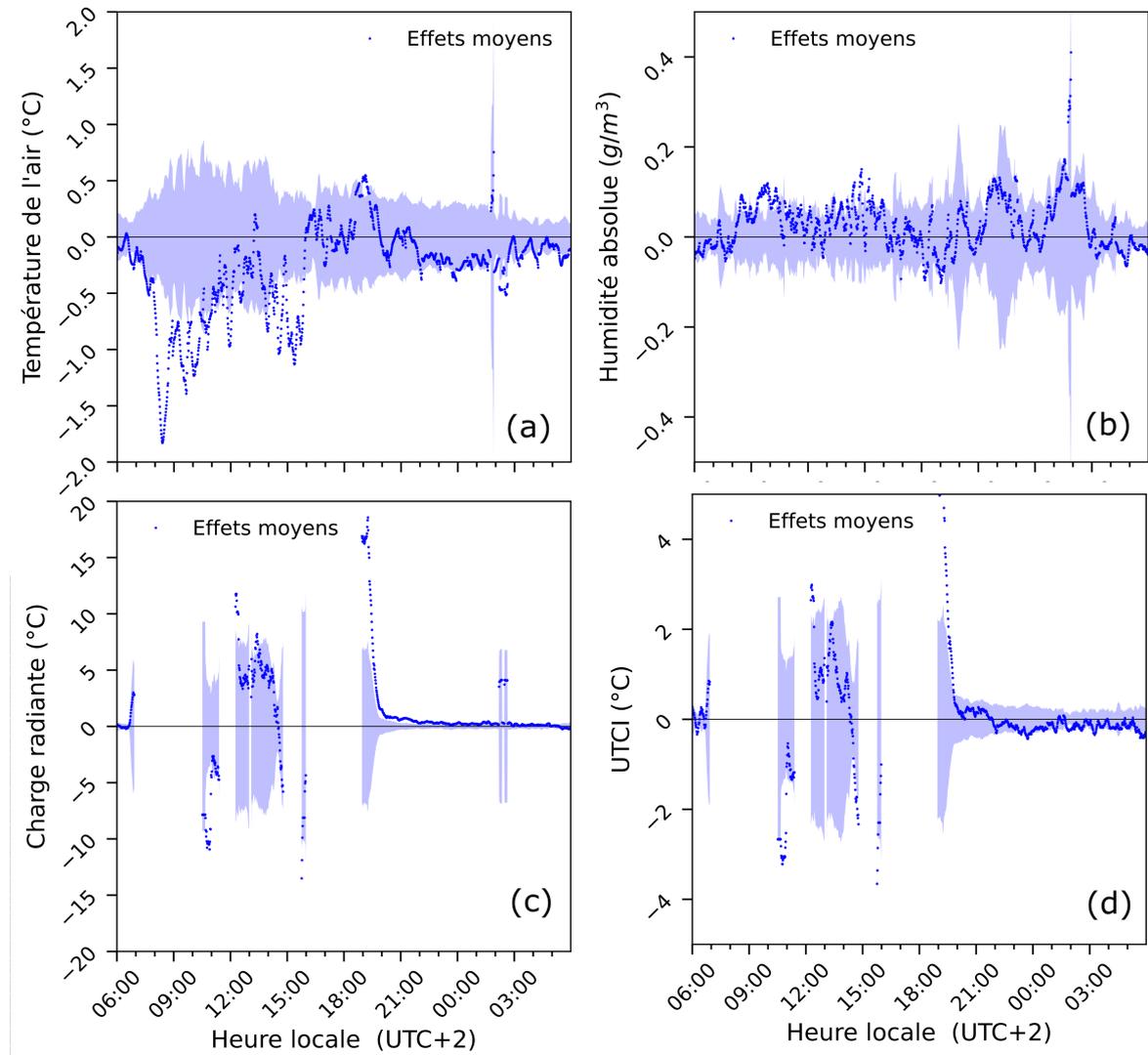


FIG. 4.18 – Impact microclimatique des travaux OASIS sur la température de l’air, l’humidité absolue, la charge radiante et l’UTCI après application du filtre de masques solaires.

La Figure 4.18 montre l’impact microclimatique des travaux OASIS sur la température de l’air, l’humidité absolue, la charge radiante et l’UTCI après prétraitement des masques solaires au sein de la cour d’école Tandou. Le nombre d’observations avant travaux est $N_{ref} = 7$, le nombre d’observations après travaux est $N_{OASIS} = 10$. Les points bleus représentent les effets moyens et l’enveloppe bleue transparente l’intervalle de confiance à 95 %. Les points

en dehors de cet intervalle sont considérés comme statistiquement significatifs.

On observe une réduction de la température de l'air sur l'ensemble de la journée de l'ordre de $-0,5\text{ °C}$ avec une réduction plus marquée entre 7h et 10h du matin de l'ordre de $-1,5\text{ °C}$ et une réduction de -1 °C aux alentours de 15h. L'humidité absolue ne semble pas avoir été significativement modifiée dans la nuit, mais présente une légère augmentation de l'ordre de $0,1\text{ g/m}^3$ aux alentours de 15h. Cette observation peut s'expliquer par l'usage qui a été fait de la cour lors des vagues de chaleurs de l'été 2021. En effet, l'école possède un plan canicule qui consiste à mettre en place de l'arrosage au sein de la cour. Les données de charge radiante filtrées ne permettent pas de conclure sur la matinée, mais montrent qu'il n'y a pas d'augmentation statistiquement significative de la charge radiante, au cours de la journée, à l'exception de quelques pics à -10 °C à 11h, 10 °C à 12h, 7 °C à 13h, -15 °C à 15h30 et 17 °C à 19h, qui se répercutent sur l'UTCI avec une réduction de 3 °C à 11h et 4 °C à 15h30, et une augmentation de 3 °C à 12h, et de 5 °C à 19h. Ces pics peuvent être liés à la méthodologie de création des masques, et correspondraient à une phase d'ensoleillement asynchrone sur la paire qui n'ont pas été prises en compte.

Nous pouvons nous demander si un échantillon de données de plus grande taille serait capable d'absorber la différence d'ombrage. En effet, le profil interstation du rayonnement net établi avec les journées radiatives retenues en 2021 et 2022 est similaire à celui avant travaux, comme illustré à la Figure 4.13, ce qui semble indiquer que les observations supplémentaires de 2022 permettent de s'affranchir des variations non simultanées d'ensoleillement entre les stations témoin et d'étude du site.

La Figure 4.19 montre l'impact microclimatique des travaux OASIS sur la température de l'air, l'humidité absolue, la charge radiante et l'UTCI au sein de la cour d'école Tandou. Le nombre d'observations avant travaux est $N_{ref} = 7$, le nombre d'observations après travaux en 2021 et 2022 est $N_{OASIS} = 29$. Les points bleus représentent les effets moyens et l'enveloppe bleue transparente l'intervalle de confiance à 95 %. Les événements hors de cet intervalle sont considérés comme statistiquement significatifs.

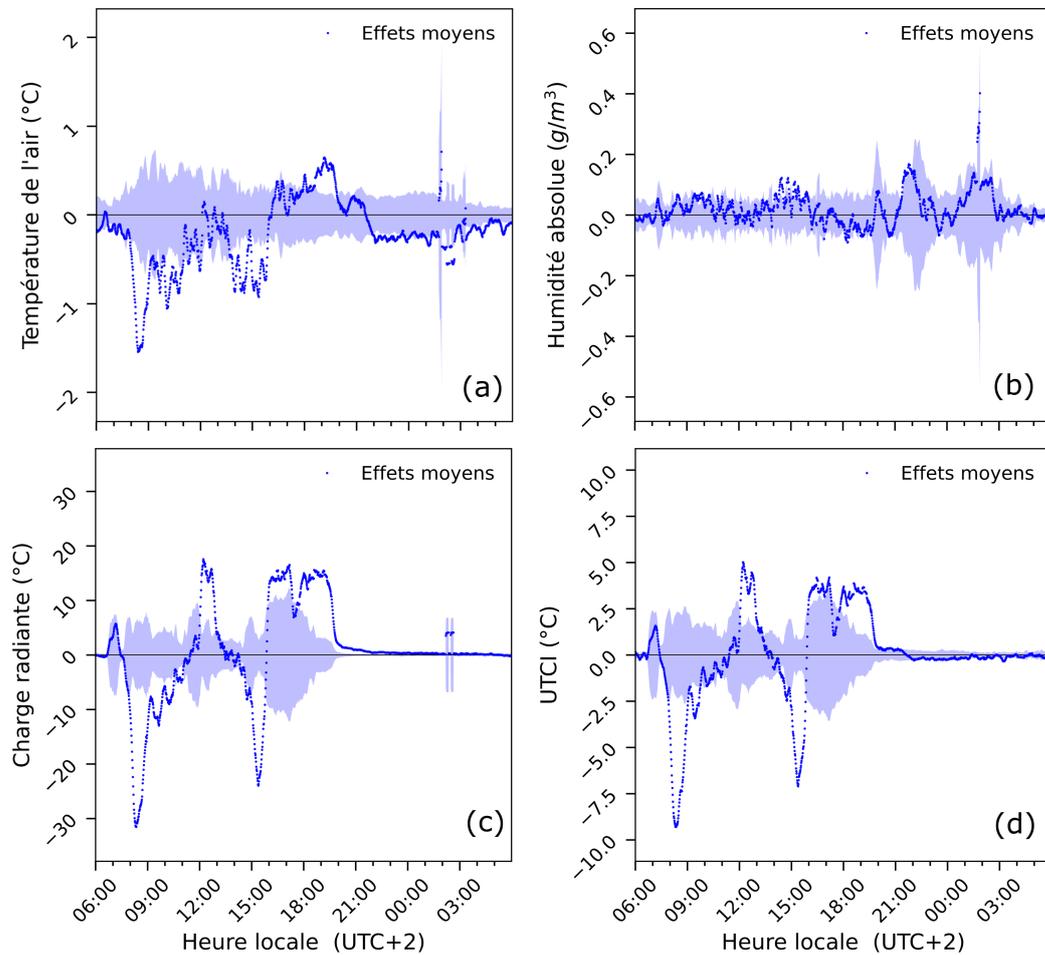


FIG. 4.19 – Impact microclimatique des travaux OASIS sur la température de l'air (a), l'humidité absolue (b), la charge radiante (c) et l'UTCI (d) après travaux avec un été supplémentaire (2022).

Après les travaux, l'humidité absolue (Figure 4.19 (b)) ne varie pas en journée de manière marquée, avec une légère augmentation de $0,1 \text{ g/m}^3$ à entre 14h et 16h. L'effet moyen sur la température de l'air est plus prononcé (Figure 4.19 (a)), avec une réduction moyenne statistiquement significative de l'ordre de $0,2 \text{ °C}$ à partir de 21h jusqu'à 7h J+1. Nous observons 3 périodes remarquables en journée avec une réduction maximale de la température de $1,5 \text{ °C}$ à 8h du matin, une réduction moyenne de température de l'ordre de 1 °C entre 13h et 15h, et une augmentation de l'ordre de $0,5 \text{ °C}$ entre 18h et 20h. Ces pics de températures semblent corrélés avec les variations de charge radiante reportées sur la Figure 4.19(c). On observe deux réductions de charge radiante de 30 °C à 8h et 20 °C à 15h, et deux augmentations respectives de 17 °C et 15 °C entre 11h30 et 13h et entre 16h et 20h. Ces variations se traduisent par une

diminution de l'UTCI de l'ordre de 8 °C à 8h et 7,5 °C à 15h, ainsi qu'une augmentation de 5 °C entre 11h et 13h et de 3°C °C entre 16h et 21h. La charge radiante s'annule à la tombée de la nuit. La corrélation entre les variations remarquables de température de l'air en journée et celles de la charge radiante suggèrent que le filtre doit aussi être appliqué à l'étude des effets des travaux sur la température de l'air, même si le capteur est sous abri solaire (Petralli et al., 2009; Lacombes et al., 2011; Bernard et al., 2019). Les variations de charge radiante ou d'UTCI sont caractéristiques du passage à l'ombre ou au soleil de la station/du globe noir (Middel et al., 2021). Cela étaye la nécessité du prétraitement des données dans le cas où les journées d'observation présentent des profils interstation d'ensoleillement qui se décalent au cours de l'été.

Les Tableaux 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 synthétisent respectivement la durée, l'effet moyen, l'effet maximal et l'heure d'occurrence de l'effet maximal des impacts microclimatiques statistiquement significatifs des travaux OASIS sur la température de l'air, l'humidité absolue, la charge radiante et l'UTCI pour le site Tandou.

Ces tableaux permettent de constater que l'augmentation du nombre de jours d'observation permet aussi de préciser les effets moyens et leur robustesse statistique. En effet, la durée des effets moyens augmente pour chaque paramètre microclimatique lorsque l'on complète le jeu de données 2021 par celui de 2022. La synthèse des tableaux permet d'observer une réduction globale de la température de l'air en contrepartie d'une augmentation de la charge radiante en journée du site Tandou.

| Température de l'air | 2021 & Filtre | 2021 & 2022 | 2021 & 2022 & Filtre |
|----------------------------|---------------|-------------|----------------------|
| Effet moyen (°C) | -0,64 | -0,35 | -0,35 |
| Durée (heure/jour) | 8,35 | 12,6 | 12,6 |
| Réduction maximale (°C) | -1,83 | -1,54 | -1,54 |
| Heure locale (UTC +2) | 8 :23 | 08 :24 | 08 :24 |
| Augmentation maximale (°C) | 0,55 | 0,65 | 0 65 |
| Heure locale (UTC +2) | 19 :07 | 19 :08 | 19 :08 |

TABLEAU 4.6 – Synthèse de l'analyse statistique pour la température de l'air pour les différents jeux de données bruts et filtrés

| Humidité absolue | 2021 & Filtre | 2022 & 2021 | 2021 & 2022 & Filtre |
|---|---------------|-------------|----------------------|
| Effet moyen (g/m ³) | 0,04 | 0,06 | 0,06 |
| Durée (heures/jour) | 3,6 | 3,1 | 3,1 |
| Réduction maximale (g/m ³) | -0,1 | -0,09 | -0,09 |
| Heure locale (UTC +2) | 19 :01 | 18 :16 | 18 :16 |
| Augmentation maximale (g/m ³) | 0,16 | 0,17 | 0,17 |
| Heure locale (UTC +2) | 01 :36 | 21 :48 | 21 :48 |

TABLEAU 4.7 – Synthèse de l'analyse statistique pour l'humidité absolue pour les différents jeux de données bruts et filtrés.

| Charge radiante | 2021 & Filtre | 2021 & 2022 | 2021 & 2022 & Filtre |
|----------------------------|---------------|-------------|----------------------|
| Effet moyen (°C) | 1,68 | 0,58 | 2,24 |
| Durée (heures/jour) | 6,9 | 16,3 | 9,6 |
| Réduction maximale (°C) | -13,51 | -31,53 | -8,32 |
| Heure locale (UTC +2) | 15 :46 | 08 :21 | 14 :47 |
| Augmentation maximale (°C) | 18,55 | 17,56 | 18,04 |
| Heure locale (UTC +2) | 19 :16 | 12 :13 | 12 :16 |

TABLEAU 4.8 – Synthèse de l'analyse statistique pour la charge radiante pour les différents jeux de données bruts et filtrés.

| UTCI | 2021 & Filtre | 2021 & 2022 | 2021 & 2022 & Filtre |
|----------------------------|---------------|-------------|----------------------|
| Effet moyen (°C) | 0,34 | -0,02 | 0,85 |
| Durée (heure/jour) | 4,1 | 11,1 | 5,4 |
| Réduction maximale (°C) | -3,66 | -9,3 | -2,69 |
| Heure locale (UTC +2) | 15 :46 | 08 :19 | 14 :47 |
| Augmentation maximale (°C) | 5,54 | 5,01 | 4,57 |
| Heure locale (UTC +2) | 19 :16 | 12 :13 | 12 :18 |

TABLEAU 4.9 – Synthèse de l'analyse statistique pour l'UTCI pour les différents jeux de données bruts et filtrés

La diminution de la température de l'air en contrepartie d'une augmentation de la charge radiante a été observée sur différentes études au sein de cours et de canyons urbains, notamment lorsque l'albédo des façades latérales sont élevés (Taleghani et al., 2014a; Lopez-Cabeza et al., 2022; Erell et al., 2014). Ce phénomène est aggravé, lorsque l'albédo du sol est augmenté. C'est le cas de la cour Tandou, dont les bâtiments sont vitrés et réfléchissants, et où l'asphalte a été partiellement remplacé par des copeaux de bois très clairs. La variation d'humidité absolue est inférieure à $0,1 \text{ g/m}^3$ et ne peut être associée aux arbres plantés, car la présence de végétation est corrélée à une augmentation allant de $0,3$ à 3 g/m^3 (Rahman et al., 2020). L'âge des arbres plantés et la sécheresse des étés 2021 et 2022 sont des facteurs qui pourraient expliquer ce manque d'évapotranspiration (Gill et al., 2013). Nous observons une augmentation ponctuelle de l'humidité absolue autour de 15h, qui pourrait être corrélées aux usages de la cour : En effet, l'école maternelle Tandou met en place les jours de canicules un dispositif de rafraîchissement qui consiste à organiser des jeux d'eau dans la cour. Cette augmentation d'humidité correspondrait alors aux effets de l'arrosage dans la cour.

Le prétraitement des données discuté plus haut permet de tenir compte des variations d'ensoleillement lorsque la répartition des jours d'observation en été n'est pas équilibrée entre périodes. Après avoir testé et discuté la méthodologie d'analyse statistique avec prétraitement, nous l'appliquons à l'ensemble des cours OASIS qui ont été transformées en 2020.

4.3 Résultats généraux et discussion

4.3.1 Impact microclimatique des travaux OASIS au sein des cours pilotes

Les courbes relatives aux autres sites sont fournies en Annexe, à l'exception du site Quatre Fils, dont les travaux ont eu lieu à l'été 2021, et ne seront pas détaillées ici en dehors des tableaux synthétiques suivants. De même, les travaux de réaménagement au sein de l'établissement Keller ont eu lieu dans la cour attenante à celle où est implantée la station d'étude initialement sélectionnée pour les travaux.

Le Tableau 4.10 reporte les effets moyens statistiquement significatifs sur 24h observés au sein des cours pilotes suite aux travaux OASIS, à l'exception du site Quatre Fils.

TABLEAU 4.11 – Effets moyens statistiquement significatifs des travaux OASIS sur l’humidité absolue, la température de l’air, la charge radiante et l’UTCI. Le calcul est réalisé pour la période allant de 6h à 18h. Les effets non statistiquement significatifs sont abrégés en non stat. sign.

| Site | Humidité absolue (g/m^3) | Température de l’air (°C) | Charge radiante (°C) | UTCI (°C) |
|-------------|---------------------------------|------------------------------|-------------------------|-----------------|
| P. ALVISET | -0,09 | -0,83 | 9,83 | 1,09 |
| O. GREARD | non stat. sign. | non stat. sign. | non stat. sign. | -0,6 |
| KELLER | non stat. sign. | -0,15 | non stat. sign. | non stat. sign. |
| J. D’ARC | 0,2 | non stat. sign. | non stat. sign. | non stat. sign. |
| J. DOLENT | non stat. sign. | non stat. sign. | non stat. sign. | non stat. sign. |
| EMERIAU | non stat. sign. | non stat. sign. | non stat. sign. | 0,76 |
| TANDOU | non stat. sign. | -0,38 | non stat. sign. | non stat. sign. |
| EE M. HILSZ | 0,13 | 0,46 | 3,39 | 1,85 |
| EM M. HILSZ | 0,09 | non stat. sign. | non stat. sign. | non stat. sign. |

TABLEAU 4.10 – Effets moyens statistiquement significatifs des travaux OASIS sur l’humidité absolue, la température de l’air, la charge radiante et l’UTCI moyenné sur 24h. Les effets non significatifs sont abrégés en non stat. sign.

| Site | Humidité absolue (g/m^3) | Température de l’air (°C) | Charge radiante (°C) | UTCI (°C) |
|-------------|---------------------------------|------------------------------|-------------------------|-----------------|
| P. ALVISET | 0,08 | 0,4 | non stat. sign. | 0,51 |
| O. GREARD | non stat. sign. | 0,56 | non stat. sign. | non stat. sign. |
| KELLER | non stat. sign. | 0,2 | non stat. sign. | non stat. sign. |
| J. D’ARC | 0,23 | non stat. sign. | non stat. sign. | non stat. sign. |
| J. DOLENT | non stat. sign. | non stat. sign. | non stat. sign. | non stat. sign. |
| EMERIAU | non stat. sign. | non stat. sign. | non stat. sign. | non stat. sign. |
| TANDOU | non stat. sign. | 0,27 | non stat. sign. | non stat. sign. |
| EE M. HILSZ | 0,13 | 0,11 | 1,33 | 0,53 |
| EM M. HILSZ | 0,08 | 0,25 | non stat. sign. | non stat. sign. |

Nous nous intéressons également aux impacts en décomposant les 24 heures en une période de 6h à 18h correspondant à la journée (Tableau 4.11) et une période de 18h à 6h du lendemain correspondant à la nuit (Tableau 4.12).

De manière générale, nous constatons sur les 24h une faible augmentation des températures de l’air pour les cours d’école de 0,11 à 0,56 °C. En journée et en soirée, l’effet sur les températures est plus variable. On observe en journée des réductions de l’ordre de -0,16 °C à

TABLEAU 4.12 – Effets moyens statistiquement significatifs des travaux OASIS sur l’humidité absolue, la température de l’air, la charge radiante et l’UTCI. Le calcul est réalisé pour la période allant de 18h à 6h le lendemain. Les effets non significatifs sont abrégés en non stat. sign.

| Site | Humidité absolue (g/m^3) | Température de l’air (°C) | Charge radiante (°C) | UTCI (°C) |
|-------------|---------------------------------|------------------------------|-------------------------|----------------|
| P. ALVISET | -0,06 | non stat. sign | non stat. sign | non stat. sign |
| O. GREARD | non stat. sign | 1,03 | 0,36 | 0,59 |
| KELLER | non stat. sign | -0,26 | -0,25 | -0,22 |
| J. D’ARC | 0,26 | -0,36 | non stat. sign | non stat. sign |
| J. DOLENT | non stat. sign | non stat. sign | non stat. sign | non stat. sign |
| EMERIAU | 0,14 | -0,59 | non stat. sign | -0,51 |
| TANDOU | non stat. sign | -0,16 | non stat. sign | non stat. sign |
| EE M. HILSZ | 0,12 | -0,33 | -0,74 | -0,49 |
| EM M. HILSZ | 0,07 | -0,33 | -0,72 | -0,46 |

-0,85 °C qui sont proches des ordres de grandeur des réductions de température observées des parcs urbains au sein et alentours (Bowler et al., 2010; Shashua-Bar and Hoffman, 2004). D’autres cours, à l’instar de l’école élémentaire Maryse Hilsz (EE M. Hilsz), présentent des augmentations de température de l’air en journée et des diminutions en soirée. Cette observation pourrait être expliquée par le remplacement à grande échelle des matériaux de revêtement par des matériaux réfléchissants (asphalte clair) et poreux (copeaux de bois) à faible inertie. Comme il s’agit de matériaux réfléchissants, la réduction des températures de l’air devrait s’accompagner d’une augmentation de la charge radiante.

Les variations de la charge radiante se répercutent directement sur celles de l’UTCI. On n’observe pas de différence remarquable de charge radiante sur 24 heures, à l’exception de l’élémentaire Maryse Hilsz (EE M. Hilsz) où la charge radiante augmente de 1,33 °C et entraîne une augmentation de l’UTCI de 0,53 °C. Cette grandeur subit dans la majorité des cours d’écoles une augmentation de l’ordre de 3 °C à 9 °C en journée. Cette augmentation peut être imputée à l’augmentation de l’albédo des surfaces, en particulier l’installation de copeaux de bois et d’asphalte clair (Taleghani et al., 2014b). Toutefois, la charge radiante est réduite en soirée, notamment du fait des faibles températures de surface des revêtements réfléchissants et de la faible inertie des copeaux. Ce phénomène est notamment observé au sein de la cour EE M. Hilsz où l’effet moyen en journée est respectivement de +3,39 °C et en soirée de -0,74 °C. De manière plus générale, l’élévation de la charge radiante en journée contribue à une augmentation de l’UTCI de l’ordre de 0,76 °C à 1,85 °C. Cette

dégradation du stress thermique liée à l'augmentation d'albédo est observée dans d'autres travaux scientifiques tels que ceux de [Morille and Musy \(2017\)](#); [Lopez-Cabeza et al. \(2022\)](#).

L'humidité absolue augmente en moyenne pour les cours J. d'Arc, EE M. Hilsz, EM M. Hilsz et P. Alviset. Ces cours ont bénéficié d'aménagements visant à augmenter la fraction végétalisée de la cour, qu'il s'agisse de paillage végétal, de parterres plantés ou d'arbres. La station d'étude EE M. Hilsz affiche une augmentation de $0,13g/m^3$. Cette valeur est toutefois inférieure à celles rapportées par [Mballo et al. \(2021\)](#) à proximité d'arbres. Cette augmentation de l'humidité n'est pas forcément synonyme de rafraîchissement, dans la mesure où l'UTCI augmente en journée au sein des établissements, notamment au sein de la cour EE M. Hilsz avec une augmentation de $1,85\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La variabilité de ces observations ne permet pas de conclure quant à un effet général de ces aménagements, qui dépendent des spécificités de chaque site, par exemple la configuration des bâtiments autour de la cour et son exposition au soleil. Nous pouvons invoquer le changement du "BACI contrast", puisque les états d'avant travaux et après travaux de certains sites ont été modifiés au cours du projet. Une analyse plus poussée nécessite de se pencher sur l'évolution temporelle des impacts au cours de la journée disponibles en Annexe. Il est important de rappeler que ces analyses excluent les périodes durant lesquelles l'évolution de l'ensoleillement est désynchronisée sur la paire de stations fixes pour ce qui est de la charge radiante et de l'UTCI. L'humidité absolue et la température de l'air n'ont pas été filtrées, mais l'observation de l'évolution de la température de l'air dans les périodes d'ensoleillement asymétrique nous pousse à envisager une éventuelle surchauffe de l'abri en journée.

4.3.2 Augmentation du nombre d'observations par extension de la période de mesure

Le prétraitement des données permet de s'affranchir dans une certaine mesure des différences d'ombrage. Comme l'évolution de la température moyenne radiante est très sensible aux variations d'ensoleillement et se répercute sur le calcul de l'UTCI, il est préférable de manière générale d'augmenter le nombre d'observations afin d'augmenter la robustesse des analyses. Dans l'idéal, il faudrait avoir un nombre égal d'observations pour chaque période P1, P2, P3, P4 afin que le profil interstation moyen tienne compte des masques

solaires de manière équilibrée. Un jeu de données optimal serait constitué de 20 journées d'observations réparties de manière égale sur les mois de juin, juillet, août et septembre (5 journées d'observations pour chacune des périodes). En nous référant aux critères de journées radiatifs cités plus haut, il est envisageable d'étendre la période d'observation de l'équinoxe de printemps (21 mars) à l'équinoxe d'automne (21 septembre), pour la centrer autour du solstice d'été, à l'instar de la Figure 4.20, pour laquelle la courbe d'ensoleillement annuel est symétrique par rapport au solstice d'été.

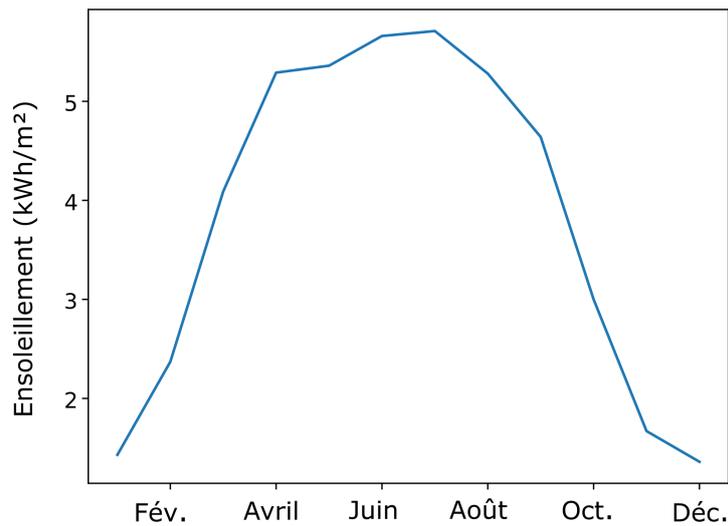


FIG. 4.20 – Ensoleillement mensuel à Paris mesuré à la station Paris-Montsouris.

De même, le rayonnement observé à la station les jours de grand soleil en dehors de la période estivale est peu atténué par rapport à cette dernière, tel qu'observé sur la Figure 4.21.

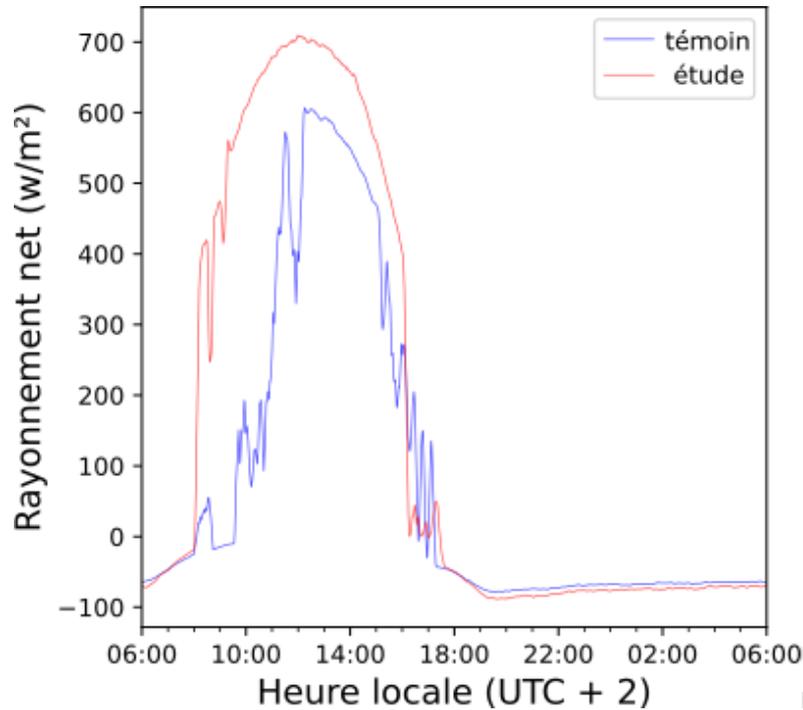


FIG. 4.21 – Courbe d'ensoleillement de la paire de stations du site Tandou le 1^{er} avril 2020.

Inclure le printemps est acceptable du point de vue des apports solaires qui sont identiques par temps clair en été et au printemps en prenant le solstice d'été comme point de symétrie. Cependant, cela n'est pas vrai a priori pour l'évapotranspiration des (éventuels) végétaux et surfaces perméables. En particulier, la pluviométrie est, sous le climat parisien, plus faible en été qu'au printemps. Néanmoins, l'analyse réalisée pour des journées radiatives éliminera un certain nombre de journées problématiques de ce point de vue dans la mesure où ce choix devrait entraîner un état sec des surfaces perméables. Il faudra toutefois tenir compte dans le cas de sols perméables de la pluviométrie des jours précédents. On peut donc s'attendre à ce que les transferts de chaleur latente soient plus importants au printemps qu'en été. Cela peut gêner l'analyse lors de l'extension de la période d'observation pour des sites très végétalisés (et dans une moindre mesure à revêtements perméables). Outre la disponibilité en eau, la phénologie des arbres doit être prise en compte (en phase de croissance au printemps, en état de floraison et fructification en été), notamment les arbres caducs qui, ayant perdu leurs feuilles en hiver, entament leur phase de bourgeonnement au printemps et transmettent par conséquent beaucoup plus d'irradiance solaire par rapport à l'été.

L'augmentation de la taille du jeu de données permettra de mettre en œuvre la méthode

développée par [Parison et al. \(2020b\)](#) basée sur les modèles linéaires à effets mixtes, où les variations d'ensoleillement seraient considérées comme un facteur aléatoire (cf. Figure 4.6). L'application du modèle linéaire mixte permettra non seulement d'évaluer l'impact des travaux sur les différents paramètres microclimatiques, mais éventuellement de différencier les contributions de l'augmentation de l'albédo des surfaces, de l'ajout d'ombrières, de la végétalisation ou de la perméabilisation des surfaces. Cette analyse serait particulièrement intéressante au sein des cours d'écoles maternelle et élémentaire Hilsz, où le revêtement asphalté a été remplacé par un revêtement d'albédo plus élevé en complément d'une augmentation de la fraction végétalisée du sol qui atteint désormais 50 % de la surface. L'estimation de l'impact microclimatique des arbres au sein des cours d'école se heurte à la contrainte temporelle de maturation des arbres. En effet, il n'est pas possible de saisir l'effet de la plantation d'arbres au sein des cours un an après les travaux, car les arbres plantés ne sont pas totalement développés. Les bénéfices de l'ombrage et de l'évaporation fournis par les canopées sont donc sous-estimés ([Kántor et al., 2018](#)).

4.4 Conclusion

Ce chapitre s'est focalisé sur l'analyse des données enregistrées par le réseau de stations de mesure fixes déployées dans les 10 cours d'écoles pilotes du projet FEDER UIA OASIS. Un réseau de 19 stations météo a été déployé à l'échelle de la métropole parisienne afin d'évaluer l'impact microclimatique des travaux de réaménagement des cours pilotes. Les sites étudiés sont chacun équipés d'une paire de stations météo mesurant la température de l'air, l'humidité relative, la température de globe noir, la vitesse du vent et le rayonnement net. Les paramètres microclimatiques enregistrés permettent de calculer la température moyenne radiante et par la suite l'UTCI. Les stations météo fixes permettent d'assurer un suivi continu dans le temps de l'évolution des paramètres microclimatiques avant et après travaux.

Les données sont analysées avec la méthodologie d'analyse statistique BACI-FEM développée par [Parison et al. \(2020b\)](#). Un profil interstation moyen est établi pour chacune des grandeurs suivantes : température de l'air, humidité absolue, charge radiante et UTCI. Compte tenu du nombre d'observations réduit et de l'évolution désynchronisée des masques solaires entre la station témoin et la station d'étude, un prétraitement supplémentaire est proposé afin de les filtrer. Ce prétraitement est réalisé en étudiant la différence entre la

charge radiante $\Delta T_{mrt,a}$ mesurée sur la station d'étude et la station témoin pendant un été complet. La période d'observation estivale est découpée en 4 périodes d'observation où le masque solaire est altéré. L'état d'ensoleillement du globe noir est binarisé pour les stations d'étude et témoin au cours de chaque période d'observation. Le recouvrement des états d'ensoleillement pour les paires de stations permet de définir la plage de données exploitables sur une période. L'intersection des plages de données exploitables obtenues pour chaque période permet d'obtenir les données comparables entre elles tout au long de l'été.

Ce prétraitement permet d'éviter la détection de faux impacts, mais réduit la fenêtre temporelle d'observation. Afin de pallier l'hétérogénéité du jeu de données, nous pouvons envisager d'appliquer l'analyse statistique sur l'ensemble des jours d'une même période d'observation, qui satisfait la condition d'évolution synchrone de l'ensoleillement de la paire de station avant et après travaux. L'augmentation du nombre de jeux de données avant et après travaux permettrait quant à elle d'étudier l'impact des différentes solutions d'aménagement (évapotranspiration des végétaux, évaporation des matériaux perméables en fonction de la disponibilité en eau ...) dans le cadre du modèle linéaire mixte proposé par [Parison et al. \(2020b\)](#).

L'interprétation des courbes d'impact microclimatique des travaux OASIS au sein des cours pilotes se fait au cas par cas, en étudiant l'évolution temporelle des différentes grandeurs au cours de la journée. L'augmentation de l'albédo des surfaces au sein d'une cour enclavée permet d'abaisser les températures de surface des matériaux et la température de l'air, mais dégrade le confort thermique des usagers en augmentant la charge radiante du fait du piégeage radiatif. L'effet de la végétation ne peut être correctement évalué à ce stade du projet puisque la végétation et les arbres ne sont pas encore matures. La réduction de la température de l'air nocturne en contrepartie d'une augmentation de charge radiante en journée observée sur les cours EE M. Hilsz et Emériau où l'asphalte existant a été remplacé par un asphalte clair, corrobore les résultats numériques obtenus par les simulations de Météo France ([Goret and Lovat, 2022](#)).

La station d'étude au sein de la cour permet de quantifier l'évolution des paramètres enregistrés au cours de la journée ainsi que de tester et vérifier la robustesse statistique des résultats obtenus. Cependant, elle ne permet pas de caractériser la variabilité spatiale du stress thermique au sein de la cour. Une méthodologie de plus haute résolution spatiale doit

être mise en œuvre pour cela. Nous présenterons dans le chapitre suivant une méthodologie de caractérisation spatiale du stress thermique des usagers au sein de la cour sur la base de mesures mobiles.

Chapitre 5

Evaluation microclimatique continue dans l'espace par mesures mobiles

| | | |
|-------|---|-----|
| 5.1 | Matériel et méthodes | 110 |
| 5.1.1 | Instruments et protocole d'observation | 110 |
| 5.1.2 | Indicateurs climatiques | 112 |
| 5.2 | Cas d'étude : EM M. Hilsz | 116 |
| 5.2.1 | Résultats | 121 |
| 5.3 | Discussion et perspectives | 130 |
| 5.3.1 | Protocole de mesure et d'observation | 130 |
| 5.3.2 | Effet de l'albédo et de la végétation sur le stress thermique | 132 |
| 5.4 | Conclusion | 132 |

Le chapitre précédent s'est consacré à l'analyse des mesures fixes réalisées dans les cours OASIS. Ces dernières permettent d'assurer un suivi continu dans le temps des paramètres microclimatiques et de tester la robustesse statistique des résultats obtenus. Nous nous concentrons dans ce chapitre sur les mesures mobiles qui seront exploitées pour établir une cartographie du stress thermique avant et après les travaux de réaménagement. La cour de l'école maternelle Maryse Hilsz servira ici de cas d'étude à l'élaboration de la méthodologie d'évaluation proposée. Une synthèse des campagnes de mesures mobiles effectuées lors des étés 2020 et 2021 permettra d'évaluer la pertinence de certaines stratégies au regard de l'amélioration du stress thermique.

Les mesures mobiles seront utilisées pour cartographier à de fines échelles spatiales (distances de l'ordre de la dizaine de mètres) les variations de température de l'air, de l'humidité, de la vitesse de vent et de température de globe, permettant ainsi de d'évaluer le stress thermique du piéton. Elles nécessitent toutefois d'établir un protocole d'observation permettant d'en assurer la reproductibilité et comparabilité d'une année à l'autre.

5.1 Matériel et méthodes

5.1.1 Instruments et protocole d'observation

Une station de mesure mobile permet de mesurer la température de l'air et de globe noir, l'humidité et la vitesse de vent en plusieurs points des cours d'étude. L'instrumentation de la station de mesure mobile utilisée est récapitulée au Tableau 5.1, tandis qu'un schéma des stations fixe et mobile est présenté à la Figure 5.1.

TABLEAU 5.1 – Paramètres mesurés et instrumentation de la station de mesure mobile.

| Paramètre | Instrument | Hauteur (m) | Incertitude |
|---------------------------------|--------------------------------|-------------|-------------|
| Température de l'air T_a | Pt -100 sous abri | 1,5 | 0,1 °C |
| Humidité relative RH | Hygromètre capacitif sous abri | 1,5 | 1,5% |
| Température de globe noir T_g | Pt -100 norme ISO 7726 | 1,5 | 0,1 °C |
| Vitesse du vent v | Anémomètre à fil chaud | 1,5 | 0,15 m/s |

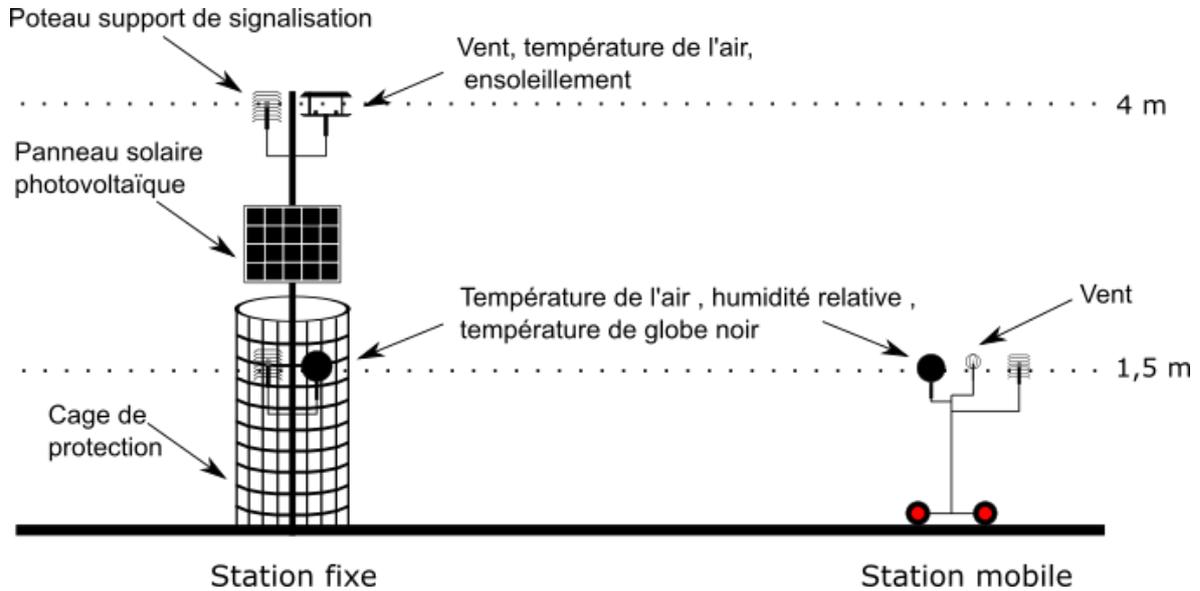


FIG. 5.1 – Schéma des stations fixes et mobiles.

Les jours de mesure correspondent à des journées radiatives chaudes, de classe de stabilité de Pasquill A ou A-B (Pasquill, 1961), présentant des conditions dégagées (nébulosité inférieure à 3 octas), des vitesses de vent faibles ($v_a < 3 \text{ m/s}$).

Au sein de chaque cour d'étude, 4 à 5 points de mesure sont choisis de sorte à être représentatifs des différents environnements de la cour : plein soleil, ombre, proximité de végétation. Les mesures sont effectuées à 1,5 m de hauteur toutes les 15 secondes. Chaque point de mesure est caractérisé pendant 10 à 20 minutes afin de permettre au globe noir de se stabiliser (Qi et al., 2021). En un point de mesure donné i , les paramètres enregistrés sont utilisés pour le calcul de la température moyenne radiante $T_{mrt,i}$ (ISO 7726, 2001) et de l'indice universel de climat thermique $UTCI_i$ (Błażejczyk et al., 2010) afin de quantifier le stress thermique ressenti par un usager. Par la suite, nous noterons cette température équivalente $T_{UTCI,i}^{mobile}$, qui est fonction des paramètres enregistrés lors de la mesure mobile au point i , à savoir : $T_{a,i}^{mobile}$, RH_i^{mobile} , $T_{mrt,i}^{mobile}$ et v_i^{mobile} .

Le tableau 5.2 récapitule les campagnes de mesures mobiles effectuées avant et après les travaux.

| ECOLE | 2019 | 2020 | 2021 |
|-----------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| QUATRE FILS | 21/08 15h35-17h01 | - | 11/06 12h00-14h00 |
| PIERRE ALVISET | 24/07 10h39-11h57 | 23/06 15h17-16h16 | 14/06 14h00-16h00 |
| OCTAVE GREARD | 29/07 15h42-16h34 | 02/06 14h45-16h38 | 12/08 14h00-16h00 |
| KELLER | 23/08 15h30-16h49 | 25/06 13h05-14h18 | 20/07 14h00-16h00 |
| JEANNE D'ARC | 23/08 12h49-14h28 | - | 21/07 13h30-15h00 |
| JEAN DOLENT | 26/07 14h09-15h03 | - | 17/07 13h50-16h00 |
| EMERIAU | 21/08 12h34-13h38 | - | 22/07 13h30 -15h00 |
| TANDOU | 22/08 15h08-16h43 | - | 06/09 14h00-16h30 |
| MARYSE HILSZ EE | 08/08 12h09-13h05 | 24/06 16h08-17h10 | 15/06 13h09-15h00 |
| MARYSE HILSZ EM | 25/07 15h31-16h27 | 24/06 14h28-15h47 | 15/06 15h20-17h00 |

TABLEAU 5.2 – Dates et horaires des mesures mobiles effectuées entre 2019 et 2021. Les dates de l'été 2021 correspondent aux mesures dans les écoles après travaux OASIS, à l'exception de l'école Quatre Fils.

5.1.2 Indicateurs climatiques

De manière analogue aux analyses des mesures fixes, on cherche à quantifier le stress thermique des usagers mesuré par l'UTCI ainsi que ses facteurs de calcul T_a , humidité et charge radiante. Pour autant, à la différence des mesures fixes, les mesures mobiles obtenues en différents points ne sont pas simultanées. Leur comparaison nécessite quelques précautions.

Plusieurs études de la littérature scientifique soulignent l'importance d'employer une correction temporelle pour des données obtenues au cours de traversées mobiles réalisées sur plusieurs heures, afin de prendre en compte l'évolution des paramètres mesurés au cours de la période de mesure (Leconte et al., 2015a; Tsin et al., 2016). De même, les mesures microclimatiques ayant lieu à une année (ou plus) d'intervalle, il est nécessaire de tenir compte des variations des conditions météorologiques entre deux campagnes de mesures. La comparaison de ces mesures avec une station témoin permet de prendre en compte les variations temporelles à court et long terme.

Afin de quantifier l'impact de la transformation de la cour, nous nous intéressons à un indicateur de stress thermique relatif $\Delta T_{UTCI,i}$ défini ci-dessous :

$$\Delta T_{UTCI,i} = T_{UTCI,i}^{mobile} - T_{UTCI,i}^{ref}(T_{a,i}^{témoin}, RH_i^{témoin}, T_{mrt,ref}, v_{ref}) \quad (5.1)$$

$\Delta T_{UTCI,i}$ représente, en un point de mesure i , l'écart entre la température équivalente UTCI calculée en ce point ($T_{UTCI,i}$) et une température équivalente UTCI de référence ($T_{UTCI,i}^{ref}$). Celle-ci correspond au stress thermique mesuré dans une situation ombragée et à l'abri des courants d'air, simultanément à la mesure mobile réalisée au point i . Cette dernière fait office d'état de stress thermique de référence et est calculée avec les paramètres suivants :

$$T_{a,i}^{ref} = T_{a,i}^{témoin} \quad (5.2)$$

$$RH_i^{ref} = RH_i^{témoin} \quad (5.3)$$

$$T_{mrt,i}^{ref} = T_{a,i}^{témoin} \quad (5.4)$$

$$v_{i,ref} = 0,5 \text{ m/s} \quad (5.5)$$

La température de l'air de référence et l'humidité de référence sont respectivement la température de l'air et l'humidité relative mesurée à la station témoin lors de la mesure i . On impose $T_{mrt,ref} = T_{a,i}^{témoin}$ et on fixe la vitesse de vent à 0,5 m/s à 1,5 m de hauteur. Ces conditions de référence correspondent aux conditions que l'on retrouverait au sein d'une cour ombragée où les vitesses de vent sont faibles. L'ombrage de la cour est tel que la température moyenne radiante suit la température de l'air. Cela permet de s'affranchir des variations de conditions météorologiques entre les années ainsi que de l'évolution temporelle des paramètres au cours d'une même campagne de mesure.

Construit de la sorte, l'indicateur de stress thermique relatif est représentatif d'un niveau de stress thermique relatif, plutôt que d'un niveau absolu, qui dépend nécessairement des conditions météorologiques synoptiques et pas seulement de la performance intrinsèque du site étudié. Ainsi, un point présentant un stress thermique relatif de +5 °C relativement au point de référence (à l'ombre et à l'abri du vent) signifie que ce point connaîtra un UTCI 5°C plus élevé que celui-ci. Ainsi, pour une journée avec une température d'air de 40 °C mesurée au point de référence et une humidité relative de 24% (soit un UTCI de référence égal à 40 °C), l'UTCI au point d'étude serait de 45°C. Pour une journée de 20°C au point de

référence et une humidité relative de 53% (soit un UTCI de référence de 20 °C), ce serait 25°C. Ce stress thermique relatif est lié aux caractéristiques thermiques du site d'étude.

Nous proposons une nouvelle échelle inspirée de celle de l'UTCI qui permet de rendre compte de l'ampleur de la modification de la catégorie de stress thermique, illustrée à la figure 5.2. La matrice représente la valeur de la surchauffe UTCI, notée $\Delta T_{UTCI,i}^{mobile}$ obtenue au point i par rapport à la valeur UTCI calculée au point de référence $T_{UTCI,i}^{ref}$.

Un écart faible (de 0 à 3°C) à modéré (de 3 à 6°C) peut ne pas impacter le niveau de stress thermique. Un écart fort (6 à 9°C) ou très fort (supérieur à 9°C) correspond à un changement de un à deux niveaux de stress thermique.

À titre d'exemple, sur la Figure 5.2, le piéton situé au point de mesure i est en situation de stress thermique très élevé : $T_{UTCI,i}^{mobile} = 39^\circ C$. Aux conditions de référence définies (cour d'immeuble ombragée et abritée du vent) et pour la même température et humidité, ce même piéton aurait été en situation de stress thermique modéré : $T_{UTCI,i}^{ref} = 31^\circ C$. Le stress thermique relatif au point de mesure i est telle que le niveau de stress thermique est fortement dégradé : $\Delta T_{UTCI,i} = 8^\circ C$

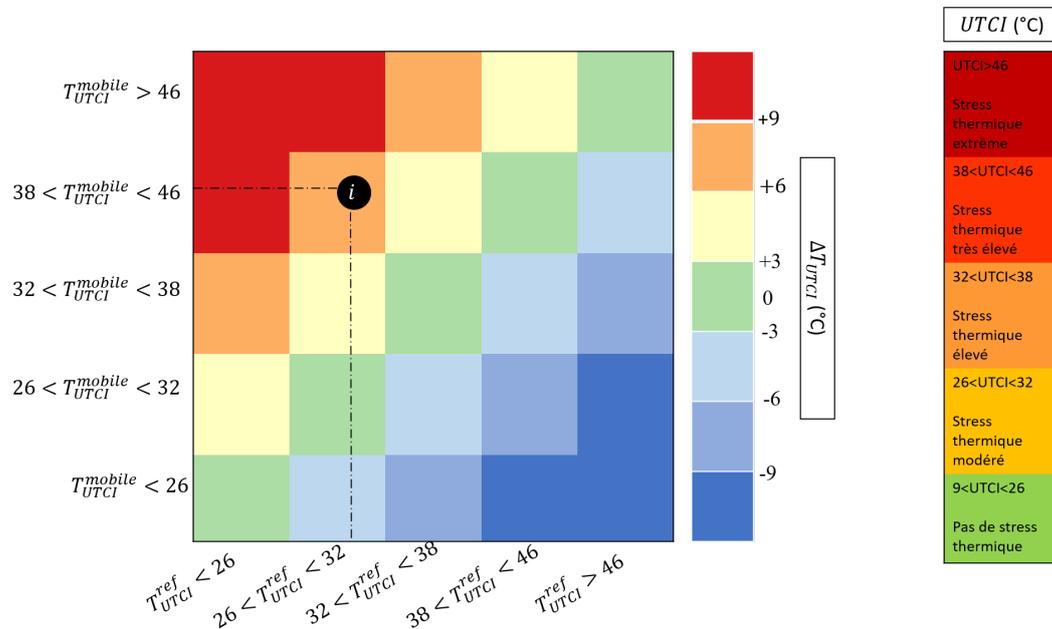


FIG. 5.2 – Matrice du stress thermique relatif établie sur la base de l'échelle UTCI (à droite) développée par Blazejczyk et al. (2012).

On s'intéressera ainsi aux grandeurs indépendantes suivantes issues des mesures mobiles :

La surchauffe atmosphérique, qui représente l'écart entre la température de l'air mesurée au point i et la température de l'air mesurée simultanément à la référence :

$$\Delta T_{a,i} = T_{a,i}^{mobile} - T_{a,i}^{témoin} \quad (5.6)$$

L'excès d'humidité défini comme la différence entre la pression partielle de vapeur d'eau mesurée au point i et la pression partielle de vapeur d'eau mesurée simultanément à la référence :

$$\Delta pv_i = pv_i^{mobile} - pv_i^{témoin} \quad (5.7)$$

La surcharge radiante, définie comme l'écart entre la température moyenne radiante mesurée au point i et la température moyenne radiante mesurée à la référence :

$$\Delta T_{mrt,a,i} = T_{mrt,i}^{mobile} - T_{mrt,i}^{référence} \quad (5.8)$$

Ainsi que $\Delta T_{UTCI,i}$, donné par l'équation 5.1.2

Il est à noter que dans la mesure où la charge radiante de référence est nulle, on peut écrire : $\Delta T_{mrt,a,i} = T_{mrt,i}^{mobile} - T_{a,i}^{témoin}$

A priori, ces indicateurs microclimatiques, relatifs aux conditions de référence choisies, intègrent les corrections nécessaires pour éliminer la dérive temporelle des paramètres microclimatiques bruts du stress thermique qui a lieu au cours d'une même campagne de mesure (d'une durée de plusieurs heures) ou entre deux campagnes de mesure éloignées de plusieurs jours, mois, voire années utilisées par exemple pour comparer le stress thermique avant ou après travaux. Cela devrait se vérifier par la stabilité pour un point donné de ces différentes grandeurs au cours du temps.



FIG. 5.3 – À gauche, photo aérienne des cours d'écoles élémentaire et maternelle Maryse Hilsz avant travaux. À droite, le plan de réaménagement (d'après le CAUE 75).

5.2 Cas d'étude : EM M. Hilsz

L'école maternelle Maryse Hilsz (EM M. Hilsz), adjacente à l'école élémentaire Maryse Hilsz (EE M. Hilsz), est située dans le 20^{ème} arrondissement de Paris. Le groupe scolaire se trouve dans une LCZ de type 5 : "open midrise" (Stewart and Oke, 2012). L'ensemble des deux cours occupe une surface totale de 2774 m² dont 13% de sol naturel. Les travaux de réaménagement ont eu lieu à l'été 2020. La Figure 5.3 illustre les cours du groupe scolaire Maryse Hilsz avant et après travaux. La fraction de pleine terre a été respectivement portée à 46% et 45% pour les cours maternelle et élémentaire. Les fractions végétalisées (plantation de végétation basse) ont été portées à 12% pour l'école maternelle et 14 % pour la cour élémentaire, que 5 et 21 arbres et arbustes ont été plantés dans les deux cours, respectivement. L'emplacement des stations de mesure fixes au sein des cours élémentaire et maternelle ainsi que dans l'espace public est illustré à la Figure 5.4.

Des mesures mobiles ont eu lieu dans la cour EM M. Hilsz avant travaux le 24 juin 2020 entre 14h30 et 15h47, et après travaux le 15 juin 2021, entre 15h20 et 17h en heure locale (UTC + 2). Des mesures mobiles additionnelles ont été réalisées le 25 juillet 2019 entre 15h31 et 16h27. Ces mesures viennent en complément des mesures fixes décrites au Chapitre 4 précédent.

L'albédo du principal revêtement a été mesuré avant et après travaux dans la cour selon la méthode ASTM E1918-16 (2016). Avant travaux, l'asphalte noir a un albédo de $\alpha = 0,14$, après travaux l'asphalte clair a un albédo de $\alpha = 0,34$.

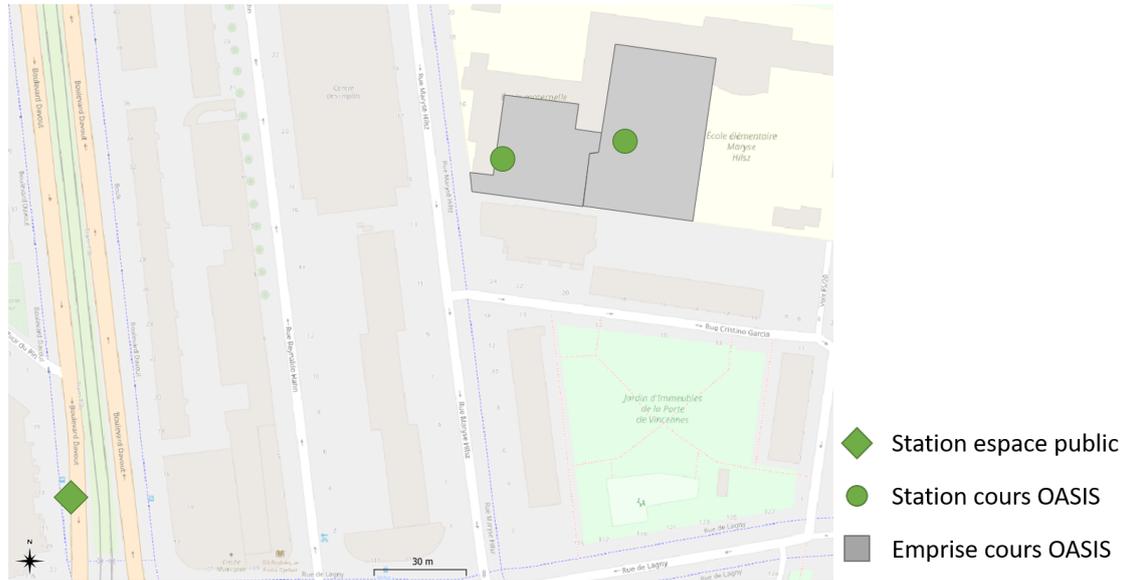


FIG. 5.4 – Emplacement des paires de stations fixes pour le site Hilsz.

La Figure 5.5 montre l'évolution des différentes grandeurs observées à la station fixe au cours de journées radiatives avant et après travaux, respectivement les 25 juillet 2019 et 15 juin 2021. La bande verticale bleue correspond à la période durant laquelle ont eu lieu les mesures mobiles, soit la plage 15h30 - 17h. Rayonnement net, charge radiante $\Delta T_{mrt,a}$ (Figure 5.5 a et b) ainsi que l'écart de température de l'air $T_a^{\text{étude}} - T_a^{\text{témoin}}$, et de stress thermique $T_{UTCI}^{\text{étude}} - T_{UTCI}^{\text{témoin}}$ sont représentés ainsi que l'écart de pression partielle de vapeur d'eau $p_v^{\text{étude}} - p_v^{\text{témoin}}$ (Figure 5.5 b et d). Les données sont lissées sur 5 minutes.

Comme nous l'observons sur les courbes de rayonnement net et de charge radiante, la sélection de journées radiatives permet d'assurer des conditions d'ensoleillement similaires entre les deux campagnes de mesure. Ainsi, les écarts entre les températures de l'air et d'humidité absolue sur la station étude et la station de référence sont relativement stables sur toute la journée avec des variations ponctuelles pouvant atteindre 2°C ou 1 hPa. Les écarts de charge radiante et de température équivalente UTCI sont relativement stables la nuit après 22h, ainsi qu'en journée pendant la période d'ensoleillement continue, avec des fluctuations plus importantes (1°C ou 2°C pour l'UTCI, plusieurs °C pour la charge radiante). Les passages au soleil ou à l'ombre de la station sont marqués par des fluctuations importantes des paramètres observés.

D'après ces observations, la nuit apparaît comme période la plus propice en termes de stabilité des paramètres corrigés par rapport à la référence choisie. Toutefois, cette période

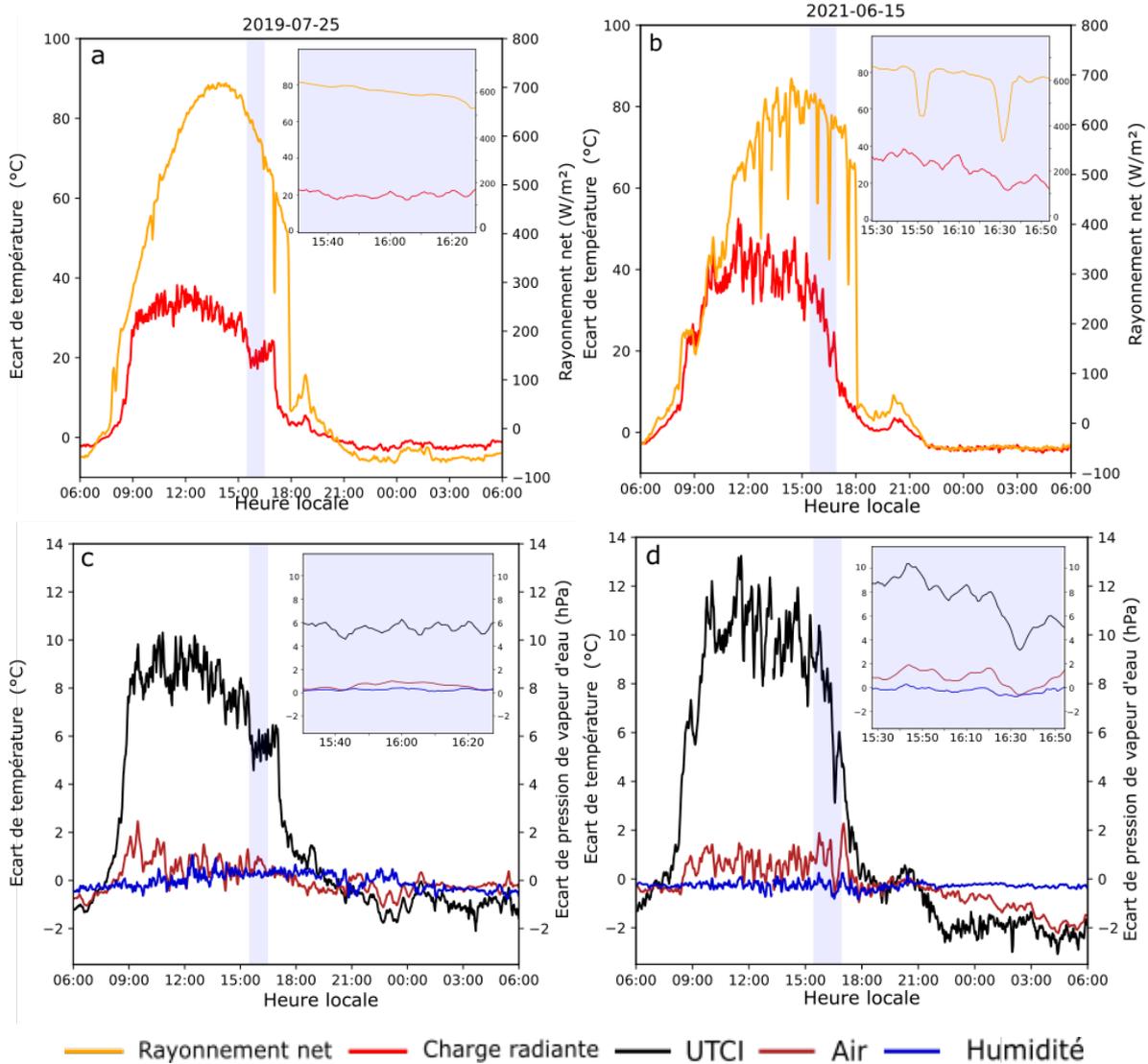


FIG. 5.5 – Évolution à la station d'étude fixe de l'EM M. Hilsz du rayonnement net et de la charge radiante (a et b) et des écarts à la référence de la température de l'air, de la pression de vapeur d'eau ainsi que le stress thermique relatif (c et d). Les mesures ont lieu lors de journées radiatives de mesures mobiles en 2019 (a et c) et 2021 (b et d). La bande bleutée correspond à la période de mesures mobiles. Les encarts se focalisent sur celles-ci.

n'est évidemment pas pertinente pour l'évaluation du stress thermique ressenti par un usager en journée. Cela concerne particulièrement les cours d'écoles qui sont fréquentées par les enfants qu'en journée. Les observations précédentes confirment néanmoins l'existence de périodes de stabilité relative des paramètres en journée. Il s'agit pour le 25 juillet 2019 de l'intervalle entre 10h et 15h, avec une amplitude de variation du stress thermique relatif de 2°C. Pour la journée du 15 juin 2021, les conditions sont moins stables et le stress thermique relatif diminue de 2°C entre 11h et 14h30 avec des fluctuations de l'ordre de 2°C. Les chutes de rayonnement net sont liées au passage de nuages ponctuels.

La Figure 5.6 montre les différents points de mesure au sein de la cour. Les points sont représentatifs des différentes ambiances thermiques de la cour, et permettront d'étudier l'évolution du stress thermique suite aux travaux d'aménagement. En revanche, ils n'interviennent pas dans la caractérisation de l'impact de la plantation des nouveaux arbres dont la canopée n'était pas encore développée lors des mesures post-travaux. Certains points de mesure ont dû être déplacés à cause de modifications du plan d'aménagement, notamment la construction de talus au sein de la cour qui n'étaient pas prévus dans les phases initiales des travaux. L'état d'ensoleillement de chaque point de mesure (ombre, soleil) est conservé d'une année à l'autre sauf création d'ombrage (ombrières, arbres, etc.).

Les points de mesure reportés à la Figure 5.6 sont illustrés par les photographies correspondantes à la Figure 5.7. Une diminution de luminosité au point 2 est visible sur la photo après travaux en raison du passage ponctuel d'un nuage. L'albédo mesuré à chaque point de mesure est répertorié dans le Tableau 5.3.

En raison d'une avarie de matériel, les données de la station de l'espace public EP Hilsz ne sont pas exploitables pour la journée du 24 juin 2020. La station EE Keller présente un profil de température et d'humidité similaire pour les deux journées d'études, et est située dans une cour n'ayant pas subi de travaux de transformations. Elle est donc substituée à la station EP Hilsz. Les deux journées du 20 juin 2020 et 15 juin 2021 répondent aux critères de température, nébulosité et vent sans pour autant afficher des températures exceptionnellement élevées. L'ordre chronologique des points a été respecté en 2020 et 2021.



FIG. 5.6 – Haut : points de mesure avant travaux ainsi que leur état d'ensoleillement (S : au soleil ; O : à l'ombre). Bas : points de mesure après travaux. Le point bicolore (bord noir et centre blanc) représente la position de la station fixe.



FIG. 5.7 – Photos des points de mesure (cf. Figure 5.6) avant travaux en 2020 (en haut) et après travaux en 2021 (en bas).

| Point | Albédo | | Matériau | Description |
|-------|--------|-------|-----------------|--------------------|
| | Avant | Après | | |
| 1 | 0,12 | 0,38 | Asphalte clair | Plein soleil |
| 2 | 0,12 | 0,38 | Asphalte clair | Soleil |
| 3 | 0,19 | 0,20 | Copeaux de bois | soleil |
| 4 | 0,12 | 0,38 | Asphalte clair | Arbres à proximité |

TABLEAU 5.3 – Valeurs d'albédo mesurées au points de mesure avant et après travaux selon la norme [ASTM E1918-16 \(2016\)](#)

5.2.1 Résultats

Les mesures avant travaux (2020) ont eu lieu entre 14h30 et 15h30. Les mesures après travaux (2021) ont eu lieu quant à elles entre 15h30 et 16h30. Nous estimons une incertitude de répétabilité reportée dans le tableau 5.4 à partir des écarts entre les différents paramètres microclimatiques mesurés entre la station fixe EM M. Hilsz et la station témoin EE Keller en 2019, illustrés à la Figure 5.8

L'incertitude de répétabilité est quantifiée sur la période de mesure considérée (14h30-

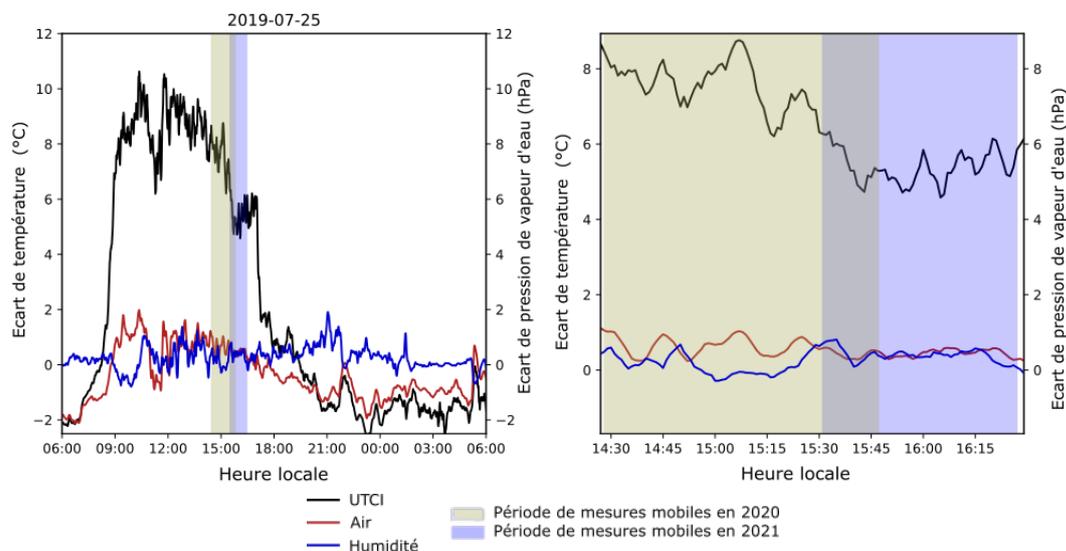


FIG. 5.8 – Écarts des différents paramètres microclimatiques mesurés entre la station EM M. Hilsz et la station EE Keller en 2019. Les bandes bleues et vertes représentent les périodes de mesures mobiles avant (2020) et après (2021) travaux qui seront exploitées.

16h30). Les stations fixes enregistrent des données à la minute. Ces dernières sont lissées sur 5 minutes afin de correspondre au mode de calcul des mesures mobiles. Les fluctuations autour de la valeur moyenne de cette mesure stable est estimée en prenant l'écart-type sur cette plage. L'incertitude de répétabilité est estimée en calculant l'écart-type à la moyenne sur cette plage, pour un intervalle de confiance de 95% (incertitude élargie avec $k=2$ pour $n=120$ mesures). On considèrera ainsi qu'un écart de $0,2\text{ °C}$ est nécessaire pour qu'une variation de ΔT_{UTCI} soit significative. Cette incertitude est estimée avec le point fixe situé au soleil. Elle est donc probablement surestimée pour des points situés à l'ombre.

Nous détaillerons par la suite les valeurs de surchauffe atmosphérique, de surcharge radiante, d'excès d'humidité et de stress thermique relatif, calculées en chaque point de mesure mobile avec la station de l'école élémentaire Keller (EE Keller) en guise de station témoin.

TABLEAU 5.4 – Estimation des incertitudes de répétabilité

| Point Fixe | Surchauffe atmosphérique | Excès d'humidité | Surcharge radiante | Stress thermique relatif |
|-----------------------------|--------------------------|------------------|--------------------|--------------------------|
| Ecart-type | 0,2 °C | 0,27 hPa | 4,30 °C | 1,18 °C |
| Incertitude de répétabilité | 0,04 °C | 0,05 hPa | 0,8 °C | 0,2 °C |

5.2.1.1 Surchauffe atmosphérique

La Figure 5.9 représente la surchauffe atmosphérique, différence entre la température de l'air mesurée au point i et la température de référence mesurée à la station témoin.

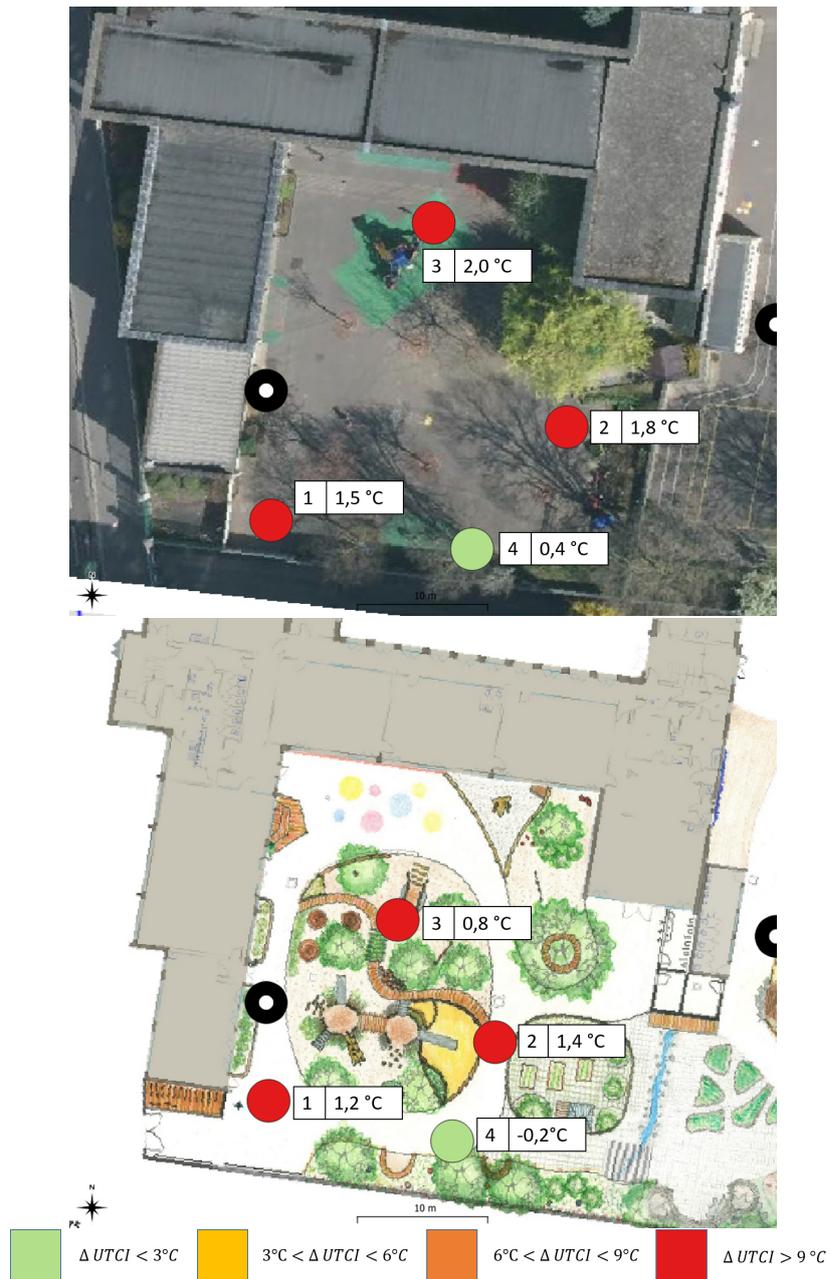


FIG. 5.9 – Écart de la température de l'air à la référence $T_{a,i}^{mobile} - T_{a,i}^{ref}$ mesurée en chaque point au sein de la cour EM M. Hilsz avant (2020) et après (2021) travaux. La couleur des points (cf. légende en bas) indique le niveau de stress thermique relatif.

La surchauffe atmosphérique diminue aux points 1, 2 et 3 de respectivement 0,3°C, 0,4°C et 1,2°C. À l'ombre de l'arbre, la surchauffe atmosphérique passe de +0,4°C en 2020 à -0,2°C en 2021. L'impact de l'augmentation de l'albédo semble entraîner une réduction des températures de surface, et par conséquent une réduction localisée de la température de l'air.

Les travaux de terrain dans la littérature portant sur l'impact des revêtements réfléchissants rapportent des réductions de température d'air de l'ordre de 1° à 2°C, pour des revêtements d'albédo compris entre 0,6 et 0,9 en remplacement d'un revêtement d'albédo de départ de 0,08 à 0,4 (Santamouris, 2013). Les travaux portant sur l'augmentation des albédos de toitures, de façade et de revêtement de sol rapportent des réductions de température de l'air plus pouvant aller jusqu'à 4°C (Morini et al., 2018; Taleghani, 2018a). Les réductions de température d'air plus faibles observées dans notre cas d'étude ne sont donc pas aberrantes compte tenu de l'augmentation plus limitée de l'albédo du sol, de 0,12 pour l'asphalte noir existant à 0,38 pour l'asphalte clair qui le remplace. Par ailleurs, il est à noter que l'incertitude de répétabilité sur les écarts de températures de l'air à la référence est estimée à 0,04 °C, mais qu'il faut aussi tenir compte de l'erreur systématique liée aux instruments de mesure qui est de 0,1°C pour les thermomètres sous abri.

5.2.1.2 Surcharge radiante

La Figure 5.10 reporte les valeurs de la surcharge radiante, définie ici comme la différence entre la température moyenne radiante mesurée au point i et la température de l'air correspondante mesurée à la station de référence. La surcharge radiante augmente aux points 1 et 2 respectivement de 5,9°C et 7°C. Cela confirme ainsi l'augmentation de la température moyenne radiante suite à l'augmentation de l'albédo des revêtements, inconvénient soulevé par Taleghani and Berardi (2018), et Erell et al. (2014).

La surcharge radiante diminue au point 3 de 6°C entre 2020 et 2021. Les copeaux de bois présentent un albédo de 0,2, proche du revêtement antérieur, un sol souple d'albédo 0,19, cette modification des propriétés réfléchissantes ne suffit pas à expliquer la réduction de la charge radiante. Nous pouvons considérer la porosité des copeaux de bois, et émettre l'hypothèse que le matériau organique poreux stocke moins de chaleur que le sol souple, imperméable et dense, et contribue moins au rayonnement thermique en journée. L'observation des températures de surface à l'aide d'une caméra IR permettrait de valider cette hypothèse.



FIG. 5.10 – Surcharge radiante $T_{mrt,i}^{mobile} - T_{mrt,i}^{ref}$ mesurée en chaque point au sein de la cour EM M. Hilsz avant (2020) et après (2021) travaux. La couleur des points (cf. légende en bas) indique le niveau de stress thermique relatif.

À l'ombre des arbres au point 4, la surcharge radiante reste faible (6,6°C en 2020 et 7,3°C en 2021), mais augmente marginalement de 0,7 °C. Si l'effet rafraîchissant des arbres en milieu imperméable est avéré, une augmentation de la charge radiante peut être corrélée à

la dégradation des performances rafraîchissantes de ce dernier (Gillner et al., 2015; Rahman et al., 2017; Erell et al., 2014). Cette observation reste toutefois à considérer avec précaution, au vu de l'incertitude de surcharge radiante estimée, qui est de l'ordre de 0,8 °C.

5.2.1.3 Excès d'humidité

La Figure 5.11 reporte les différences de pression partielle de vapeur d'eau (en hPa) mesurées entre les points de mesure et la station de référence. L'air semble plus sec par rapport aux conditions de référence en 2020, en particulier au point 4 qui présente un déficit de pression de vapeur d'eau de 0,8 hPa. En 2021, la pression de vapeur d'eau au sein de la cour est globalement plus élevée que celle mesurée à la station témoin, avec une différence maximale de 0,4 hPa sous l'arbre (au point 4). Le point 2 conserve un excédent d'humidité de 0,1 hPa avant et après travaux, tandis que les points 1 et 2 passent respectivement de -0,3 hPa et -0,5 hPa avant travaux à 0,2 hPa et 0,1 hPa après travaux. Cette augmentation pourrait être expliquée par l'augmentation globale de la fraction végétale au sein de la cour, mais ces variations restent inférieures à l'évolution de la pression de vapeur d'eau sous l'arbre. Au point 4, l'augmentation de la pression de vapeur d'eau de 1,2 hPa pourrait témoigner d'une évapotranspiration accrue de l'arbre faisant suite à la désimperméabilisation de la cour. Cette activité est régie par le déficit de pression de vapeur (DPV), défini comme suit :

$$DPV = p_v - p_s \quad (5.9)$$

où p_s est la pression de vapeur saturante correspondante calculée pour une température donnée et p_v la pression partielle de vapeur d'eau au point de mesure. Une charge radiante élevée sous la couronne de l'arbre alourdit son bilan thermique et stimule son évapotranspiration (Leuzinger et al., 2010; Gebert et al., 2019).

Au point 4, le DPV atteint respectivement 3,9 kPa et 2,5 kPa en 2020 et 2021, des valeurs qui sont caractéristiques d'un air assez sec et proche d'une valeur seuil (4 kPa) à partir de laquelle l'arbre serait soumis à un stress hydrique qui inhiberait sa transpiration (Rahman et al., 2021; Chen et al., 2012b). En situation de stress hydrique, l'arbre diminue sa transpiration, aux dépens de la régulation thermique de ses feuilles, ce qui contribue à augmenter la température moyenne radiante ambiante (Kjelgren and Montague, 1998; Robineau et al., 2022).



FIG. 5.11 – Écart de la pression partielle de vapeur d'eau à la référence $p_{v,i}^{mobile} - p_{v,i}^{ref}$ mesuré en chaque point au sein de la cour EM M. Hilsz avant (2020) et après (2021) travaux. La couleur des points (cf. légende en bas) indique le niveau de stress thermique relatif.

5.2.1.4 Stress thermique relatif

Le Tableau 5.5 récapitule les résultats obtenus lors des campagnes de mesures de l'été 2020 et 2021. Il résume l'UTCI et le stress thermique relatif calculés en chaque point avant et après travaux. La Figure 5.12 représente quant à elle la cartographie du stress thermique relatif au sein de la cour d'école. En plein soleil, ΔT_{UTCI} en 2020 est de l'ordre de la dizaine de degrés Celsius et présente un stress thermique absolu de niveau très élevé. Il est maintenu, voire augmenté pour les points 1 et 2 en 2021, avec un stress thermique relatif qui augmente respectivement de 1,4 °C et 0,8°C par rapport à 2020. Le point 3 quant à lui se rafraîchit par rapport à 2020. Le stress thermique relatif diminue de 2°C, mais reste toutefois supérieure à 9°C. Le point 4 localisé à l'ombre d'un arbre se maintient dans un état de stress thermique absolu neutre.

Conformément à l'observation des surchauffes atmosphériques et surcharge radiante, le stress thermique relatif présente une réduction drastique à l'ombre illustrée par l'évolution de ΔT_{UTCI} au point 4. L'augmentation du stress thermique relatif aux points 1, et 2 pourrait être quant à elle liée aux propriétés réfléchissantes de l'asphalte clair, qui contribuerait à augmenter la charge radiante par rapport à un asphalte conventionnel, tel qu'observée sur la cartographie de surcharge radiante. Ces résultats sont toutefois à nuancer, au vu de l'incertitude de répétabilité et de l'incertitude systématique liées à la méthodologie de mesure. Nous en discutons par la suite.

TABLEAU 5.5 – Stress thermique et surchauffe thermique (en °C) avant (2020) et après (2021) travaux dans la cour EM M. Hilsz aux points de mesure mobile. La station de référence utilisée est celle de l'école élémentaire Keller (EE Keller) dans le 11^{ème} arrondissement.

| Point | Description | 2020 | | 2021 | |
|-------|--------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| | | $T_{UTCI,i}^{mobile}$ | $\Delta T_{UTCI,i}^{avant}$ | $T_{UTCI,i}^{mobile}$ | $\Delta T_{UTCI,i}^{après}$ |
| 1 | Plein soleil | 40,6 | 10,9 | 40,8 | 12,3 |
| 2 | Soleil | 42,2 | 12,2 | 40,8 | 12,6 |
| 3 | Soleil | 43,4 | 13,3 | 39,6 | 11,3 |
| 4 | Arbres à proximité | 32,5 | 1,9 | 29,9 | 1,6 |

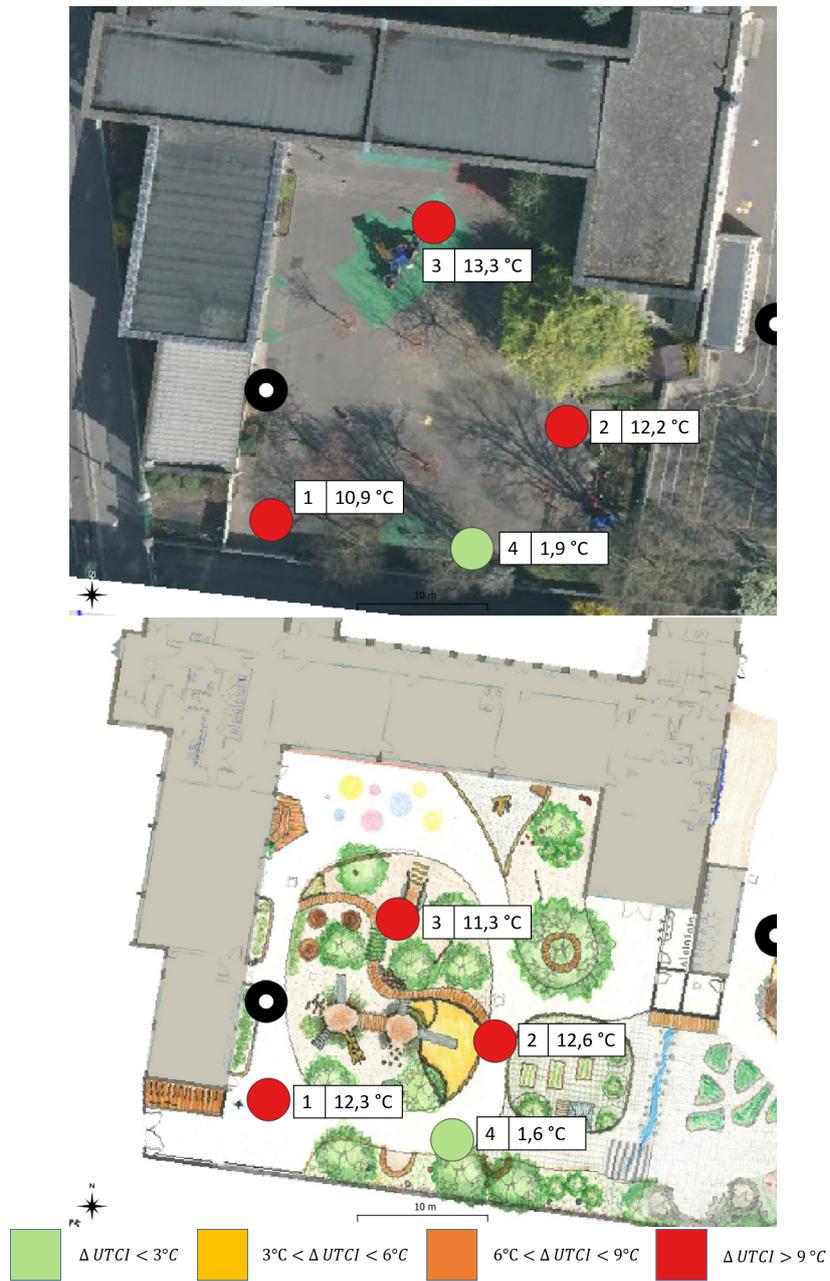


FIG. 5.12 – Cartographie du stress thermique relatif au sein de la cour EM M. Hilsz avant (2020) et après (2021) travaux.

5.3 Discussion et perspectives

5.3.1 Protocole de mesure et d'observation

Alors que les mesures fixes offrent un ensemble de données temporellement continues qui peut être analysé statistiquement, à l'instar de la démarche adoptée au chapitre 4, leurs résultats ne sont pertinents que pour leur voisinage immédiat étant donné la grande variabilité spatiale des conditions microclimatiques à l'échelle du piéton. C'est notamment le cas, dans le cadre de l'étude du stress thermique d'un usager, dans la mesure où un simple passage de l'ombre au soleil suffit à augmenter la température moyenne radiante et par la suite l'UTCI d'une dizaine de degrés. Les mesures mobiles offrent un ensemble de données plus continu dans l'espace, mais elles n'offrent qu'un nombre limité d'observations dans le temps pour chaque point. Il est donc difficile de juger de la représentativité ou robustesse des mesures mobiles. En outre, les mesures mobiles ne sont pas simultanées pour l'ensemble des points d'intérêts : la dérive temporelle entre le premier et le dernier point de mesure peut être importante. Enfin, la comparaison de mesures obtenues à plusieurs jours, semaines, mois ou même années d'intervalle rend encore plus difficile la comparaison des observations avant et après la rénovation d'un site.

Le calcul de l'UTCI de référence permet de tenir compte de ce décalage de températures et de se concentrer sur le stress thermique relatif en un point i exprimée par $\Delta T_{UTCI,i}$. Dans le cas de mesures mobiles dont la durée ne dépasse pas 2 heures et sans passage de nuages, les variations des paramètres microclimatiques (T_a et $\Delta T_{mrt,a}$) sont inférieures à 1°C. Cette incertitude est jugée acceptable dans la plupart des cas, lors de l'évaluation de l'impact des travaux sur le stress thermique des usagers. La répétition de plusieurs observations permettrait de tester la robustesse de cette hypothèse. Outre la station météo située hors de la cour d'étude, nous recommandons d'inclure un point de mesure fixe de collecte de données tout au long de la période de mesures mobiles. Ce point permet de valider l'hypothèse de la stabilité du stress thermique relatif tout au long de la période de mesures mobiles.

Le choix de journées radiatives permet d'assurer d'une journée à l'autre, voire d'une année à l'autre, un ensoleillement stable sur le créneau horaire 12h-16h, et assure une conservation des valeurs de charge radiante, pour assurer la reproductibilité des mesures.

Étant donné que seulement deux campagnes de mesures mobiles ont été analysées, la

robustesse statistique des résultats présentés reste à confirmer par des campagnes supplémentaires. L'étude d'un point non impacté par les travaux de réaménagement permettrait de tenir compte de la variabilité intra- et inter-annuelle de ces mesures (Chaniel et al., 2022a).

Dans le cas du projet OASIS, le réseau de stations fixes déployé sur Paris permet de fournir ce point fixe. En particulier, nous pouvons étudier l'évolution du stress thermique relatif à la station fixe EM Hilsz par rapport aux conditions de température et d'humidité mesurées à la station témoin EP Hilsz. Les résultats sont reportés au Tableau 5.6. Les valeurs sont calculées sur la plage horaire 15h30 et 16h30 pour les années 2019 et 2021.

TABLEAU 5.6 – Évolution du point fixe avant et après travaux mesurée à la station EM Hilsz par rapport à la station EP Hilsz.

| | Avant travaux | Après travaux |
|--------------------------|---------------|---------------|
| Stress thermique relatif | 5,3 °C | 8,1 °C |
| Surcharge radiante | 19,3 °C | 29,8 °C |
| Surchauffe atmosphérique | 0,6 °C | 1,0 °C |
| Excès d'humidité | 0,2 hPa | -0,2 hPa |

Entre les années 2019 et 2021, sur la plage horaire de 15h30 à 16h30, le stress thermique relatif augmente de 2,8°C. Cet effet est inclus dans une période où l'évolution de l'ensoleillement sur la paire de station est asynchrone (cf. A). Il en est de même pour l'évolution de la charge radiante qui est exclue de l'analyse statistique. D'après les mesures mobiles, le bilan radiatif semble marginalement dégradé au sein des cours avec une augmentation de 10,4°C qui est similaire aux valeurs de la littérature où l'augmentation de la charge radiante suite à la mise en œuvre de matériaux réfléchissants est observée (Taleghani, 2018a; Taleghani and Berardi, 2018). Nous observons enfin une augmentation de la température de l'air de l'ordre de 0,5°C, valeur à considérer avec précaution au vu de la variabilité des mesures mobiles. L'effet des travaux sur la température de l'air est, d'après l'analyse statistique des mesures fixes, non significatif.

Compte tenu de la diversité des ambiances thermiques au sein des cours OASIS, il serait intéressant d'étudier la stabilité des valeurs de stress thermique relatif en fonction du choix de la station témoin, et d'étudier l'impact du choix de cette dernière sur l'évolution des paramètres observés. Nous pourrions envisager de créer une station témoin virtuelle, moyenne de plusieurs stations témoins, qui permettrait ainsi d'intégrer la variabilité des environnements radiatifs au sein du milieu urbain.

5.3.2 Effet de l'albédo et de la végétation sur le stress thermique

Si l'augmentation de l'albédo des revêtements permet d'abaisser les températures de surface et par la suite la température de l'air, la réflexion du rayonnement de courte longueur d'onde augmente de la charge radiante et est à l'origine de la dégradation du stress thermique des usagers tel que démontré dans certaines simulations (Erell et al., 2014). La mise en œuvre de revêtements à albédo élevé serait donc plus adaptée aux toits et canopées urbaines plutôt que les canyons.

Outre le stress hydrique lié à une augmentation de la charge radiante, la disponibilité des sols en eau ainsi que leur nature affecte la capacité de la végétation à évapotranspirer et altère ses propriétés de régulation thermique (Chen et al., 2012b). Une évaluation des capacités rafraîchissantes de la végétation nécessite donc de connaître le substrat de plantation (pleine terre, bac imperméable), la disponibilité en eau aux profondeurs pertinentes, ainsi que la maturité de l'arbre.

Comme mentionné précédemment, l'usage de la caméra thermique permet de compléter le jeu de données avec les températures de surface des revêtements ainsi que de la couronne de l'arbre, et valider ainsi les hypothèses émises quant au comportement thermo-climatique de la végétation en cas de stress hydrique. Cette mesure est envisageable sous réserve que la variation de la température de surface des feuilles de l'arbre par rapport à la température de l'air soit supérieure à la limite de détectabilité de la caméra IR, typiquement de l'ordre de 1 °C.

5.4 Conclusion

Nous avons proposé une méthodologie de mesures mobiles couplées à des mesures fixes afin d'évaluer les performances rafraîchissantes d'une cour d'école OASIS à l'échelle du piéton. Afin de tenir compte des dérives temporelles de moyen et long terme, nous proposons d'évaluer un stress thermique relatif, en introduisant la surchauffe UTCI notée ΔT_{UTCI} qui compare le stress thermique mesuré en un point donné de la cour à une valeur de référence du stress thermique, pour les conditions de température et d'humidité d'une cour témoin ombragée et à l'abri du vent.

Si la mise en œuvre de revêtements réfléchissants permet de réduire les températures de

l'air, les multiples réflexions générées augmentent la charge radiante et par là dégradent le confort thermique du piéton avec des surchauffes thermiques de l'ordre de 6 à 7°C. La création d'ombrage par les arbres permet de réduire le stress thermique relatif de manière remarquable, mais cette performance est aussi tributaire de l'état de stress hydrique des arbres. En complément des mesures mobiles, les thermographies infrarouges sont préconisées afin d'enregistrer les températures de surface : cette donnée permettra de quantifier la réduction des températures de surface par augmentation d'albédo et de caractériser, selon leurs températures de surface, le comportement thermique des arbres et de la végétation selon leur état de stress hydrique (Gillner et al., 2015; Konarska et al., 2016). Au sein d'une cour d'école, l'augmentation du nombre de campagnes de mesures mobiles permettrait d'étoffer le jeu de données et ainsi assurer la robustesse statistique des analyses. L'étude de la stabilité du stress thermique relatif en fonction du choix de la station de référence permettrait aussi d'étayer la pertinence de cette méthodologie.

L'optimisation de la mise en œuvre des solutions de rafraîchissement nécessite de penser en amont les aménagements d'une cour d'école, notamment en terme d'agencement, d'ombrage arboré et de matériaux réfléchissants. Nous proposons dans le chapitre suivant une méthodologie d'identification des zones pertinentes à rafraîchir au sein d'une cour d'école à l'aide d'un outil d'aide à la décision faisant appel aux systèmes d'information géographique.

Chapitre 6

Description du stress thermique à l'échelle du piéton : Indicateur de Potentiel de Rafraîchissement

| | | |
|-------|--|-----|
| 6.1 | Méthodologie | 137 |
| 6.1.1 | Approche géomatique de l'indicateur de potentiel de rafraîchissement | 137 |
| 6.1.2 | Implémentation géomatique | 141 |
| 6.1.3 | Expression de l'indicateur de potentiel de rafraîchissement | 145 |
| 6.1.4 | Cas d'étude : groupe scolaire M. Hilsz | 148 |
| 6.2 | Résultats et discussions | 153 |
| 6.2.1 | Confrontation entre mesures mobiles et IPR | 154 |
| 6.2.2 | IPR et échanges radiatifs | 156 |
| 6.3 | Conclusion | 159 |

L'évaluation de la démarche OASIS a été présentée sous différents prismes : thermique des matériaux (chapitre 3), mesures microclimatiques fixes continues dans le temps (chapitre 4), et mesures microclimatiques mobiles plus continues dans l'espace (chapitre 5). Les résultats montrent que des solutions telles que l'augmentation de l'albédo des revêtements présentent des avantages et des inconvénients en fonction du contexte de leur mise en œuvre qui se répercutent sur le confort thermique des usagers de manière différente au sein d'une même cour d'école. Afin de pallier les discontinuités spatiales que ne peuvent résoudre les mesures mobiles, il est proposé dans ce chapitre de développer un indicateur géomatique à l'échelle du piéton (1 m) afin de tenir compte des hétérogénéités microclimatiques au sein d'un même espace pouvant affecter le confort thermique des usagers. Développé en parallèle des mesures de terrain, cet indicateur vise à proposer une alternative relativement simple aux modélisations numériques multiphysiques (Mauree et al., 2019) pour le diagnostic du stress thermique et à pouvoir servir d'outil d'aide à la décision destiné aux urbanistes et aménageurs pour la conception d'un espace extérieur donné, mettant à contribution les systèmes d'information géographiques (SIG).

Comme vu dans l'état de l'art, les effets microclimatiques sont impactés par les caractéristiques du bâti et la morphologie du milieu urbain étudié. Par exemple, la hauteur des bâtiments influe sur le facteur de vue du ciel dans la rue/au sol et par conséquent sur les températures de surfaces et d'air diurnes et nocturnes (Chen et al., 2012a; Svensson, 2004). Les systèmes d'information géographiques (SIG) sont aujourd'hui mobilisés afin d'ancrer les informations physiques à l'échelle de la ville, de la rue ou du quartier pour mieux déterminer leurs caractéristiques climatiques globales et locales (Ren et al., 2011).

En particulier, l'étude du stress thermique des piétons montre une grande variabilité à l'échelle d'une rue en fonction de l'exposition au soleil ou de la présence d'arbres (Chen et al., 2012a; Kousis et al., 2021). Middel et al. (2021) introduisent sans plus détailler le concept des Zones microclimatiques (Microclimate Zones, MCZ) à l'échelle du piéton : "Analogues aux LCZ..., les MCZ définissent pour une zone de 1 à 10 m² des profils thermiques diurnes caractéristiques (T_a , T_{mrt} et T_s) déterminés par la morphologie urbaine et les propriétés des matériaux dans l'environnement immédiat d'une personne". Les auteurs insistent sur la nécessité de centrer cette nouvelle classification sur le stress thermique du piéton en s'appuyant sur des données empiriques microclimatiques et biométéorologiques.

En France, des bureaux d'étude développent des outils cartographiques à cette fine

échelle. On peut citer l'outil Score ICU de [E6 consulting \(2016\)](#) ou le module ICEtool d'[elioth \(2021\)](#). ICEtool vise à modéliser les températures de surfaces, tandis que le score ICU est présenté comme "un outil d'évaluation simplifiée et de dialogue sur les ICU". Si ces outils sont d'ores et déjà mis en œuvre sur le terrain, il n'y a pas ou peu de publications scientifiques visant à confronter ces modélisations avec des données expérimentales, en particulier de stress thermique.

L'Indicateur de Potentiel de Rafraîchissement (IPR) que nous développons ici est un indicateur géomatique qui pourrait s'inscrire dans la démarche de formalisation des MCZ. Il vise à identifier, à l'échelle du piéton, les surfaces urbaines où le stress thermique du piéton serait maximal, et où la mise en œuvre de techniques de rafraîchissement est particulièrement indiquée, car offrant de bonnes conditions pour maximiser leur efficacité. Il a fait l'objet d'un dépôt de brevet d'invention (N° national et réf : FR2211783).

6.1 Méthodologie

6.1.1 Approche géomatique de l'indicateur de potentiel de rafraîchissement

Comme vu au chapitre 2 le bilan thermique d'un piéton ([Havenith, 1999](#)) nous permet de dégager les termes liés au stress thermique, présentés de manière conceptuelle par l'analogie électrique à la Figure 6.1. On y distingue les quatre modes d'échange entre un piéton et la voûte céleste, l'air ambiant de la couche de canopée urbaine (dans laquelle évolue un piéton), le bâti, le sol, la végétation basse et la végétation haute ainsi que l'air de la couche de surface situé au-dessus de la couche de canopée urbaine.

Il est à noter que la résistance de chaque liaison dépend de plusieurs paramètres, selon le mode d'échange (coefficients d'échanges convectifs ou radiatifs, facteurs de forme, ...). Le bâti et la végétation haute interviennent dans l'intensité du flux solaire échangé entre voûte céleste et piéton via leur création d'ombrage plus ou moins pleine selon leur transmissivité.

Dans cette représentation, hormis pour la voûte céleste, chacune de ces catégories génériques de nœud peut représenter plusieurs systèmes différents. Ainsi, le bâti désigne a priori plusieurs bâtiments et leurs facettes verticales et horizontales, supposées sèches lors des journées radiatives. Le sol désigne l'ensemble des revêtements minéraux (imperméables

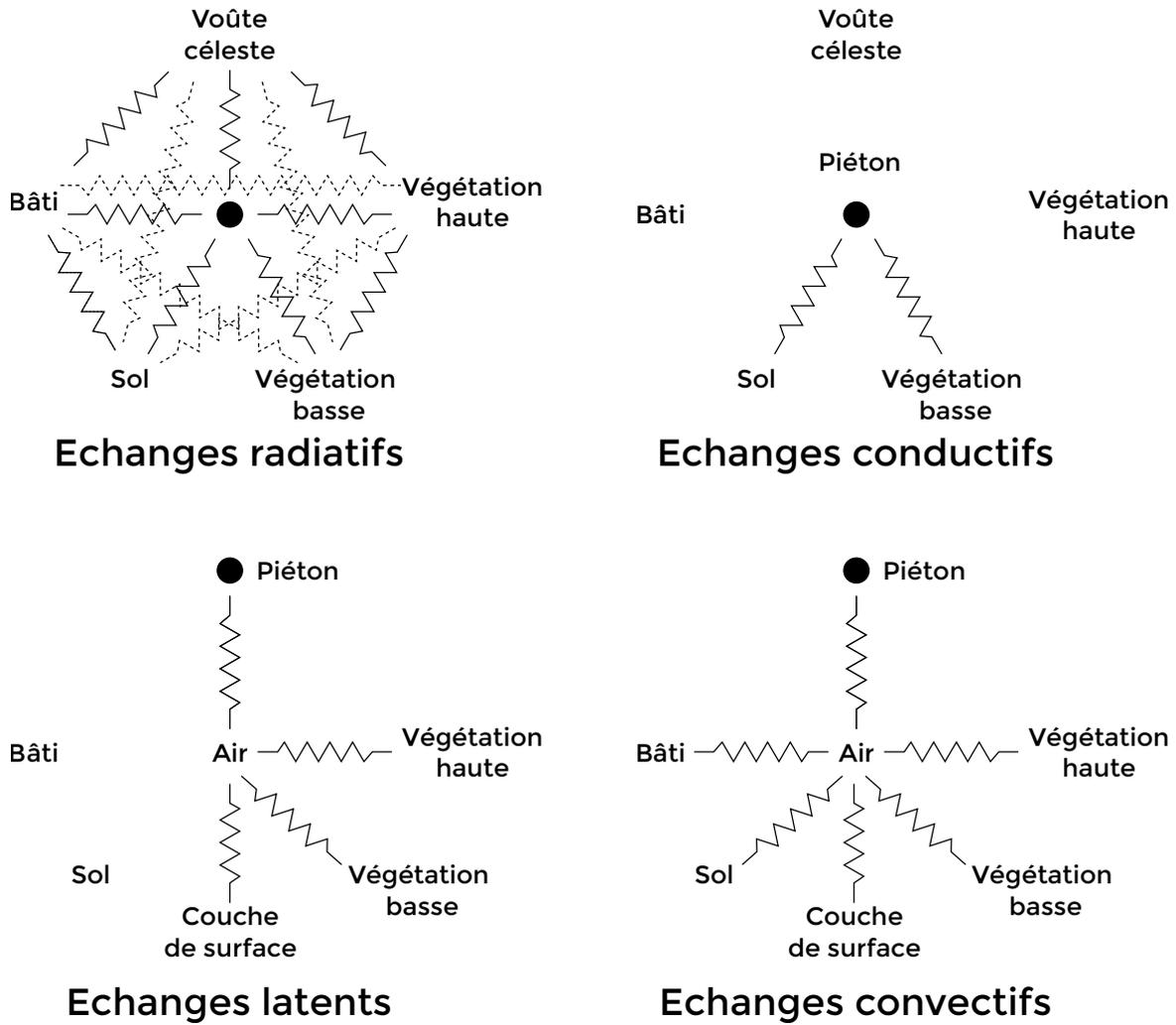


FIG. 6.1 – Représentation schématique des échanges thermiques entre un piéton, la voûte céleste, l’air (couche de canopée urbaine), le bâti, la végétation haute et basse, le sol et l’air de la couche de surface, par mode d’échange thermique. Les segments qui en croisent d’autres sont représentés en pointillés pour une meilleure lisibilité.

ou non) eux aussi considérés comme secs par journées radiatives. La végétation basse représente quant à elle les pelouses et surfaces végétalisées (e.g. chaussée végétale, pavés enherbés, toiture végétalisée, ...), tandis que la végétation haute regroupe les arbustes et arbres susceptibles de projeter une ombre profitable aux piétons.

Dans le cadre de la mise au point d'un indicateur géomatique d'analyse du stress thermique d'un piéton par journée radiative estivale sur un site donné en période diurne, on cherche à simplifier les échanges modélisés. La Figure 6.2 illustre le schéma 6.1 simplifié sur la base des hypothèses suivantes :

- On s'intéresse au bilan thermique du piéton en journée, lors d'une journée radiative estivale. Cela implique que les vitesses de vent sont faibles et ainsi que la zone source de l'air autour du piéton correspond à l'environnement immédiat de celui-ci.
- Les échanges conductifs sont négligés.
- Le bâti est source de chaleur sensible par ses surfaces verticales et horizontales, mais aussi par les rejets anthropiques générés par les activités humaines qui s'y déroulent (climatisation, industrie et artisanat...). C'est d'ailleurs la seule source de rejets anthropiques que nous considérons (pas de rejets dus au trafic routier). Ces derniers contribuent uniquement à l'échauffement atmosphérique (nous ne considérons pas les rejets de chaleur par rayonnement).
- Le bilan radiatif du piéton est dominé par l'irradiance de la voûte céleste en journée. L'intensité de ces échanges est modulée par la morphologie du bâti et la végétation haute qui créent de l'ombrage et/ou favorisent le piégeage radiatif.
- Lors d'une journée radiative, les surfaces non végétales sont sèches.
- La végétation haute et basse permet de diminuer l'échauffement atmosphérique par évapotranspiration.

La Figure 6.2 représente le bilan simplifié en tenant compte des hypothèses énoncées plus haut. Nous nous concentrons désormais sur les échanges convectifs et latents qui ont lieu entre l'air et les différentes composantes urbaines, ainsi que sur les échanges radiatifs entre la voûte céleste et le piéton.

Dans le cadre d'une modélisation géomatique, l'irradiance solaire peut être directement simulée et les autres modes d'échanges (latents et sensibles) sont intégrés de manière indirecte.

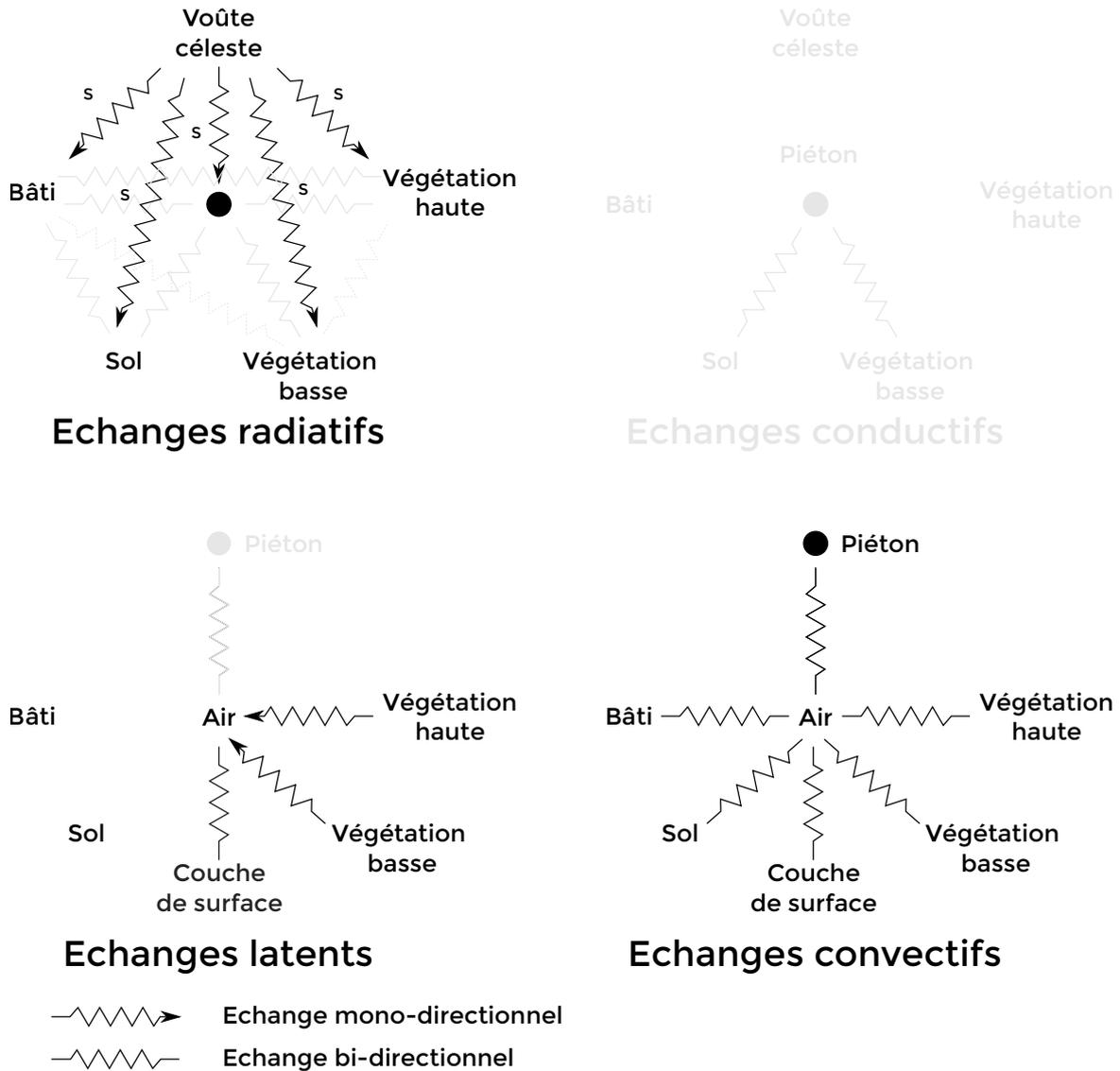


FIG. 6.2 – Représentation schématique simplifiée des échanges thermiques retenus pour l’IPR entre un piéton, la voûte céleste, l’air de la canopée urbaine, le bâti, la végétation haute et basse, le sol et l’air de la couche de surface, par mode d’échange thermique. Les liaisons et les modes négligés sont en gris clair.

De plus, l'analyse de ces échanges simplifiés via des outils géomatiques impose une nouvelle contrainte : celle de projeter les différents bilans thermiques sur une surface horizontale en 2D correspondant à notre zone d'étude découpée en mailles élémentaires. Ainsi, nous ne modélisons pas le piéton en tant que tel, mais les surfaces élémentaires sur lesquelles il peut se trouver. Ainsi, le stress thermique du piéton que nous estimons est celui qu'un éventuel piéton, debout sur la surface modélisée, ressentirait lors d'une journée radiative.

La Figure 6.3 représente la modélisation géomatique que nous retenons afin de traduire les contributions des différents transferts thermiques au stress du piéton. La maille modélisée peut être de type sol minéral, ou végétation basse. Cette maille est exposée au soleil, ou située dans une zone d'ombrage créée par le bâti et/ou la végétation haute. L'ombre créée par le bâti est pleine, tandis que l'ombre créée par la végétation haute est partielle.

La totalité des apports radiatifs sont identifiés à l'irradiance solaire provenant de la voûte céleste, contribuant à la charge radiative du piéton d'une part et à l'échauffement des surfaces ensoleillées d'autre part, dissipé par évapotranspiration ou convection.

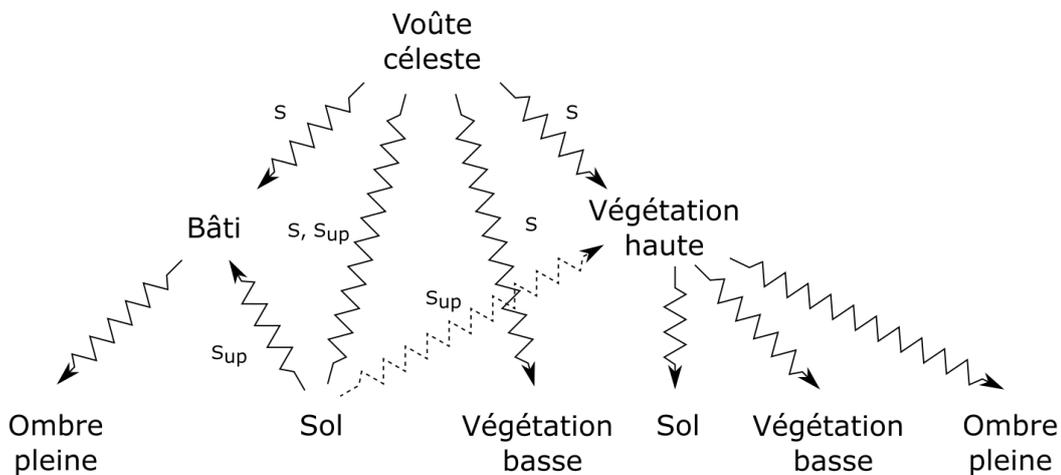


FIG. 6.3 – Modélisation géomatique des échanges thermiques.

6.1.2 Implémentation géomatique

L'indicateur Potentiel de Rafraîchissement est calculé à partir d'informations géographiques et permet d'estimer le gain en rafraîchissement dont pourrait bénéficier une surface donnée en se basant sur la réduction des échanges thermique modélisés à la Figure 6.3 Par

informations géographiques, nous désignons des données géolocalisées, par exemple d'ensoleillement, d'élévation des bâtiments, de hauteur de végétation ou encore des matériaux déployés. Nous détaillerons ci-dessous comment nous utilisons ces données géographiques pour décrire un site d'étude et comment les relier aux transferts thermiques qui déterminent le confort thermique d'un piéton.

6.1.2.1 Irradiance solaire

L'irradiance solaire est le facteur dominant du bilan énergétique du piéton et dans notre cas, de la maille horizontale élémentaire modélisée. Il comporte une composante directe et une composante diffuse. Les cartographies d'ensoleillement permettent d'établir la distribution spatiale de l'ensoleillement d'un site en fonction du relief et de ses coordonnées géographiques. Les simulations d'ensoleillement sont aujourd'hui accessibles sur différentes plateformes SIG et nécessitent de disposer d'un MNE (Modèle Numérique d'Élévation) de la zone d'intérêt afin de générer correctement les masques solaires.

Le facteur de vue du ciel, (Sky View Factor, SVF), caractérise le facteur de forme entre un point et la voûte céleste et module la composante diffuse de l'irradiance (Svensson, 2004). Le calcul du SVF est obtenu à partir d'un MNE.

Un MNE apparaît donc comme une donnée fondamentale pour la bonne prise en compte des échanges radiatifs diurnes. Le MNE est utilisé pour simuler l'irradiance solaire par temps clair pour chaque maille du site étudié.

L'irradiance est modulée le cas échéant par les masques solaires générés par le bâti et/ou la végétation haute. Si l'irradiance est interceptée par du bâti, l'ombre générée est considérée comme pleine. Si l'irradiance est interceptée par de la végétation haute, une fraction atteint le niveau du sol. Cependant, en géomatique la végétation haute est modélisée comme un volume plein du sol jusqu'au haut de sa couronne illustré à la Figure 6.4. Ainsi, pour la représentation géomatique, un arbre génère une ombre pleine sur son entourage immédiat tandis que sa couronne est ensoleillée directement. On considérera dans notre modélisation qu'une ombre partielle existe à l'aplomb de la couronne, en faisant la différence entre revêtement minéral et végétal sous l'arbre. En l'absence d'ombrage, l'absorption de l'irradiance d'une surface de sol minéral ou végétal est conditionnée par son albédo pour un sol et, par analogie, par le score végétal empirique γ , défini par la suite.

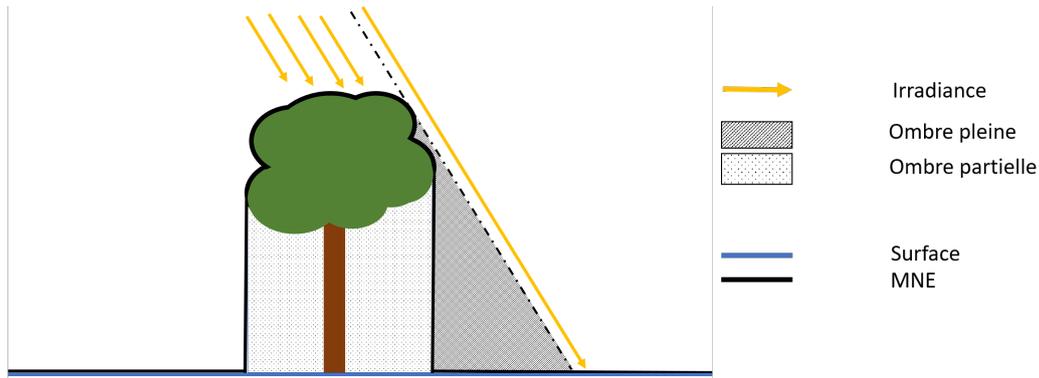


FIG. 6.4 – Modélisation géomatique d'un arbre.

6.1.2.2 Rejets de chaleur anthropique

Les rejets de chaleur anthropique contribuent à l'échauffement atmosphérique en milieu urbain avec des variations journalières, hebdomadaires et saisonnières, dégradant en été le confort thermique des piétons (Salamanca et al., 2014; Yuan et al., 2020; Jin et al., 2020). Il s'agit d'un flux plus ou moins localisé selon la source (ponctuelle pour un rejet de climatisation individuelle, diffuse pour le trafic automobile).

Sailor et al. (2015) détermine trois sources majeures de rejets de chaleur anthropique en milieu urbain : le métabolisme humain, le secteur des transports et les rejets liés à la consommation énergétique des bâtiments. La principale source de rejet de chaleur anthropique est cette dernière, et concentre, outre les rejets liés aux activités industrielles, les rejets atmosphériques des systèmes de climatisation principalement situés dans les quartiers résidentiels et commerciaux, selon le taux d'équipement en climatiseur (Quah and Roth, 2012).

Pour notre modèle, on pourra tenir compte de rejets anthropiques ponctuels avec un apport de chaleur localisé d'intensité fixée pour un usage donné (par exemple, la puissance installée d'un climatiseur rapportée à la surface de la zone équipée, ou autre valeur connue rapportée à une densité de flux de chaleur). Il serait envisageable d'affiner cette modélisation par des modèles plus complexes tenant compte de données climatiques, démographiques et socio-économiques, telles que les températures de surface, les données de consommation des ménages et les données de densité de population (Chow et al., 2014; Chen et al., 2020; Firozjaei et al., 2020; Mei and Yuan, 2021).

6.1.2.3 Surfaces minérales (sol)

La contribution à l'échauffement atmosphérique des surfaces minérales est proportionnelle au gradient de température entre l'air ambiant et le revêtement.

Pour notre modèle, on intégrera uniquement l'impact de l'albédo, étant donné que les matériaux au sol sont généralement diélectriques à émissivité élevée, peu discriminante du point de vue du stress thermique. On pourrait par la suite inclure des informations sur l'effusivité des matériaux pour affiner le modèle.

6.1.2.4 Végétation haute et basse

La végétation est source d'échanges latents par évapotranspiration et seule la végétation haute génère de l'ombre. L'effet rafraîchissant d'un arbre est majoritairement lié à l'obstruction du rayonnement solaire par la couronne des arbres dont la transmissivité moyenne est de l'ordre 15 à 20 % avec des variations liées à l'essence considérée et la saison (Konarska et al., 2014; Robitu et al., 2006; Lindberg and Grimmond, 2011b; Heisler, 1986; Gómez-Muñoz et al., 2010). Le ratio d'évapotranspiration sur rayonnement net $\frac{LE}{R_n}$ varie entre 22 et 32 %, mais la contribution de l'évapotranspiration au rafraîchissement d'un arbre à hauteur de 26% reste inférieure à la contribution de l'ombrage (qui est de l'ordre de 74%) (Mballo et al., 2021; Rahman et al., 2020, 2017). Takebayashi and Moriyama (2012) s'intéressent au bilan énergétique de gazon et de terre végétale et trouvent des ratios $\frac{LE}{R_n}$ variant entre 20 et 60 %. Ces résultats sont obtenus sous réserve d'apports suffisants en eau. Dans le cas contraire, les performances rafraîchissantes sont dégradées (Coutts et al., 2016b). L'effet rafraîchissant de la végétation est maximisé par la combinaison de végétation basse et haute (Shashua-Bar et al., 2011).

Dans notre modélisation, la contribution des végétaux aux échanges latents et sensibles, mais aussi aux échanges radiatifs par ombrage (cf. supra), est prise en compte via un coefficient empirique γ construit par analogie avec l'absorptivité d'un sol minéral. Il traduit la partition des flux thermiques sur une surface végétale entre flux de chaleur convectifs et latents LE d'une part et la diminution des apports solaires par ombrage végétal d'autre part. Le score végétal γ synthétise au sein d'un même coefficient l'action combinée de l'évapotranspiration et de l'ombrage.

Le Tableau 6.1 reporte les valeurs du score γ retenues pour les différents types de végétation.

TABLEAU 6.1 – Valeurs du score γ en fonction du type de végétation

| Type de végétation | γ | Mécanismes à l'oeuvre |
|--------------------|----------|-----------------------------|
| Basse | 0,2 | Evapotranspiration |
| Haute | 0,6 | Ombrage, évapotranspiration |
| Haute et Basse | 0,8 | Ombrage, évapotranspiration |

Le score végétation est modulé par la présence d'une gestion de l'irrigation qui agit comme un apport d'eau anthropique dans le bilan de surface et catalyse l'évapotranspiration (Oke and Cleugh, 1987). La valeur de γ est fixée en fonction de la nature de la végétation (haute, basse, combinée) et de la quantité d'eau disponible a priori pour l'évapotranspiration. Une valeur de gamma maximale égale à 1 correspondrait à un arbre en bonne santé planté par-dessus une pelouse dans des conditions d'irrigation optimales.

Les informations géographiques que nous retenons donc pour le calcul géomatique de l'IPR sont le MNE, qui permet de calculer le SVF et par la suite l'irradiance incidente, la fraction végétale de la surface de la cour, les données d'albédo des surfaces minérales, et la typologie de végétation qui permet de déterminer le score végétal γ .

6.1.3 Expression de l'indicateur de potentiel de rafraîchissement

L'indicateur est destiné à établir un diagnostic relatif aux journées radiatives, c'est-à-dire lors de conditions anticycloniques caractérisées par une faible couverture nuageuse et des vents faibles. Cet indicateur vise à déterminer les espaces prioritaires dans le cadre d'intervention de rafraîchissement. Nous proposons de comparer la surface urbaine que nous considérons à une surface équivalente où le stress thermique du piéton serait maximal ou très élevé en journée : cela correspondrait à un volume constitué d'une surface plane, nue, imperméable, pleinement exposée au soleil dans la journée, et absorbant la totalité du rayonnement. Ce cas de figure existe aujourd'hui et correspondrait théoriquement à un parking asphalté d'albédo nul. À l'inverse, un espace où le rafraîchissement serait maximal correspondrait à une forêt de canopée dense et très peu transmissive avec végétation au

sol, sans manque d'eau. La priorisation des espaces à rafraîchir se fera sur la base d'une comparaison des flux entrants et sortants avec le volume urbain de référence.

En ayant traduit avec des informations géographiques les échanges radiatifs et convectifs, nous pouvons construire des nombres adimensionnels représentatifs de la thermique urbaine traduisant les échanges du bilan représenté à la Figure 6.3 : En particulier, nous nous concentrons sur la résultante des échanges convectifs entre l'air entourant le piéton et les différentes surfaces minérales et sèches ou végétales, ainsi que sur le rayonnement incident provenant de la voûte céleste.

La contribution au stress thermique retenu pour une surface minérale correspond à la chaleur absorbée par celle-ci, donnée par $(1 - \alpha) \cdot I_{incident}$. En supposant une réflexion diffuse par la surface minérale, sur la part réfléchie α , seule la fraction SVF parvient à échapper réellement au volume urbain. Ne pouvant répercuter cela simplement à l'endroit où cette énergie serait interceptée, nous attribuons cette énergie à la maille élémentaire où a lieu la réflexion initiale. Ce choix se traduit par une surestimation de la chaleur emmagasinée par cette surface. On retient donc pour une surface minérale l'absorption suivante composée des termes d'absorption solaire directe et du rayonnement réfléchi intercepté :

$$[(1 - \alpha) + \alpha(1 - SVF)]I_{incident} \quad (6.1)$$

$$(1 - \alpha \cdot SVF)I_{incident} \quad (6.2)$$

De manière analogue, on retiendra la contribution au stress thermique d'une surface végétale par :

$$(1 - \gamma)I_{incident} \quad (6.3)$$

avec le coefficient γ qui traduit à la fois le rafraîchissement par ombrage et par évapotranspiration.

Ainsi, la contribution au stress thermique peut être écrite comme la somme des contributions des surfaces minérales (sèches) et des surfaces végétales, ainsi que du terme source Q_F :

$$[(1 - \alpha \cdot SVF)\lambda_m + (1 - \gamma)\lambda_v]I_{incident} + Q_F \quad (6.4)$$

où λ_m et λ_v correspondent respectivement aux fractions minérale et végétale de la surface de la maille considérée. Cette maille peut être entièrement minérale, végétale ou hybride (minérale et végétale), à l'instar d'un pavé enherbé. La somme des fractions minérale et végétale de la maille considérée est égale à 1.

$$\lambda_m + \lambda_v = 1 \quad (6.5)$$

Si nous considérons le cas d'une surface minérale d'albédo égal à 1 (en l'absence de rejets anthropiques), nous remarquons que sa contribution au stress thermique du piéton s'annule. La situation analogue pour une surface végétale serait celle d'un gazon irrigué pour lequel la contribution serait égale à $0,2 \cdot I_{incident}$, ce qui n'est pas cohérent avec les observations de terrain (Bouzouidja et al., 2021b; Takebayashi and Moriyama, 2012; Morille and Musy, 2017). Afin d'assurer la bonne comparabilité de ces deux situations analogues, nous ajoutons un coefficient β empirique pour aligner la performance d'une surface minérale 100 % réfléchissante avec celle d'un gazon irrigué, soit $\beta = 0,2$.

On obtient alors :

$$[(1 - \beta\alpha \cdot SVF)\lambda_m + (1 - \gamma)\lambda_v]I_{incident} + Q_F \quad (6.6)$$

Ces termes sont ensuite normalisés par l'irradiance globale horizontale par ciel clair lors de la journée d'étude, notée I_0 pour calculer l'indicateur de potentiel de rafraîchissement urbain :

$$IPR = \frac{[(1 - \beta\alpha \cdot SVF)\lambda_m + (1 - \gamma)\lambda_v] \cdot I_{incident} + Q_F}{I_0} \quad (6.7)$$

L'IPR ainsi déterminé a une valeur comprise entre 0 et 1 en l'absence de rejets de chaleur anthropiques, mais peut dépasser 1 si ces rejets sont suffisamment importants. Un IPR nul correspondrait ainsi à une zone ne présentant pas de possibilité d'amélioration du stress thermique, typiquement une forêt dense avec végétation basse ne manquant pas d'eau. Un IPR égal à 1, quant à lui, représente un espace où les stratégies de rafraîchissement apporteraient un gain maximal, typiquement un parking bitumé en plein soleil.

Dans le cadre du projet OASIS, le diagnostic se fait à l'échelle de la cour d'école. Les flux anthropiques sont considérés comme étant nuls : il n'y a pas de climatisation pérenne avec des rejets au sein des cours d'écoles qui sont à l'écart de la circulation automobile.

6.1.4 Cas d'étude : groupe scolaire M. Hilsz

Nous illustrerons l'implémentation cartographique de l'IPR en prenant pour cas d'étude le groupe scolaire Maryse Hilsz dont les travaux de transformation ont été décrits au chapitre 5.

Un MNE pour les deux cours a été généré à l'aide des logiciels SIG SAGA-GIS (System for Automated Geoscientific Analyses) (v 7.2) et QGIS (Quantum GIS (V 3.22.10. LTR)). La taille caractéristique du domaine modélisé varie entre 100 et 300 m de sorte à inclure la cour d'école dans un îlot urbain avec ses principaux masques solaires. En effet, cette distance permet de tenir compte d'un éventuel effet d'ombrage provenant des constructions attenantes à la cour. Le MNE permet de calculer le SVF et sert de donnée d'entrée au calcul de l'ensoleillement de la cour. La résolution spatiale est de 0,5 m.

Dans le cas du calcul de l'IPR, nous nous intéressons à l'ensoleillement représentatif d'une journée radiative estivale. L'irradiance globale horizontale par ciel clair cumulé sur 24h est calculé pour les différentes dates de l'été pour la période du 15 juin au 15 septembre. Pendant cette période, qui s'étend essentiellement du solstice d'été à l'équinoxe d'automne, d'importantes variations de l'irradiation solaire horizontale se produisent et doivent être prises en compte. Pour cela, des simulations de l'irradiance solaire par ciel clair sont réalisés avec l'outil Potential Incoming Solar Irradiance de SAGA à un pas de temps de 30 minutes entre 6h et 18h heure solaire ([Hendel et al., 2020](#)).

Les données de hauteur de végétation produite par l'APUR sont utilisées et permettent de déterminer la fraction végétale de chaque cour d'école ainsi que le type de végétation (haute ou basse). Il est important de noter que le calcul géomatique a été effectué avec une seule base de donnée de végétation avant et après travaux datant de 2015, faute de jeu de données plus récent. Les arbres ajoutés post-travaux sont modélisés par un cylindre de révolution de la hauteur de l'arbre et de diamètre égal à celui de sa couronne. Les mesures d'albédo de terrain complètent le jeu de données cartographiques. La Figure 6.5 illustre la cartographie de l'IPR obtenue pour les cours de l'EM et l'EE Maryse Hilsz.

Avant travaux, on constate que l'IPR moyen des cours EM et EE M. Hilsz est à 55% et 56% respectivement, avec environ 40% et 60% de leur surface à potentiel très élevé. Après travaux, l'IPR moyen passe à 46% pour EM M. Hilsz et 37% pour EE M. Hilsz avec une disparition de la catégorie de potentiel modéré au profit de la catégorie de potentiel faible, et une réduction

DESCRIPTION DU STRESS THERMIQUE À L'ÉCHELLE DU PIÉTON : INDICATEUR DE POTENTIEL DE
RAFRAÎCHISSEMENT

du pourcentage de surface présentant un IPR très élevé. Ces dernières occupent en effet moins du quart de la surface des deux cours.

On constate bien l'impact de la désimperméabilisation et de la végétalisation des revêtements qui améliore le score végétation des arbres existants, ainsi que l'effet des nouveaux arbres et des arbustes qui créent de nouveaux refuges à des endroits où le niveau d'IPR était à potentiel très élevé. Les copeaux et l'asphalte clair seuls réduisent moins significativement l'IPR des deux cours.

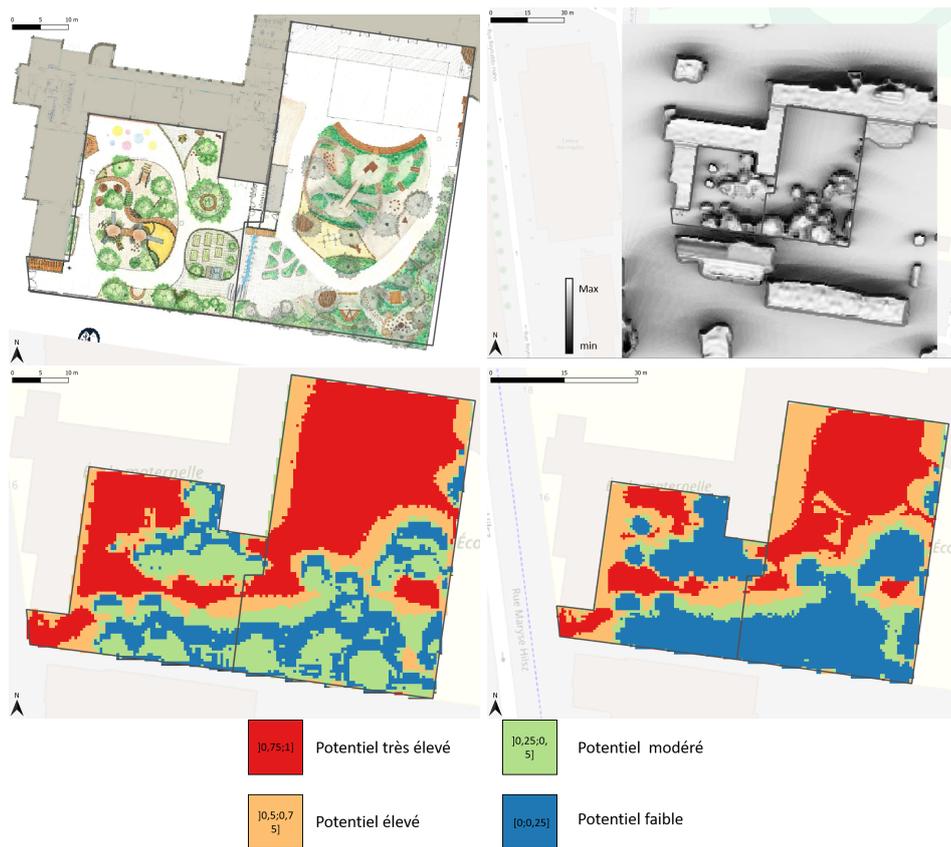


FIG. 6.5 – Processus de cartographie du potentiel de rafraîchissement. En haut, le plan d'aménagement (à gauche) permet de déterminer les propriétés des surfaces urbaines et de générer le MNE qui servira à calculer l'ensoleillement (en haut à droite). En bas, cartographie de l'IPR pour les cours Maryse Hilsz avant (gauche) et après (droite) travaux.

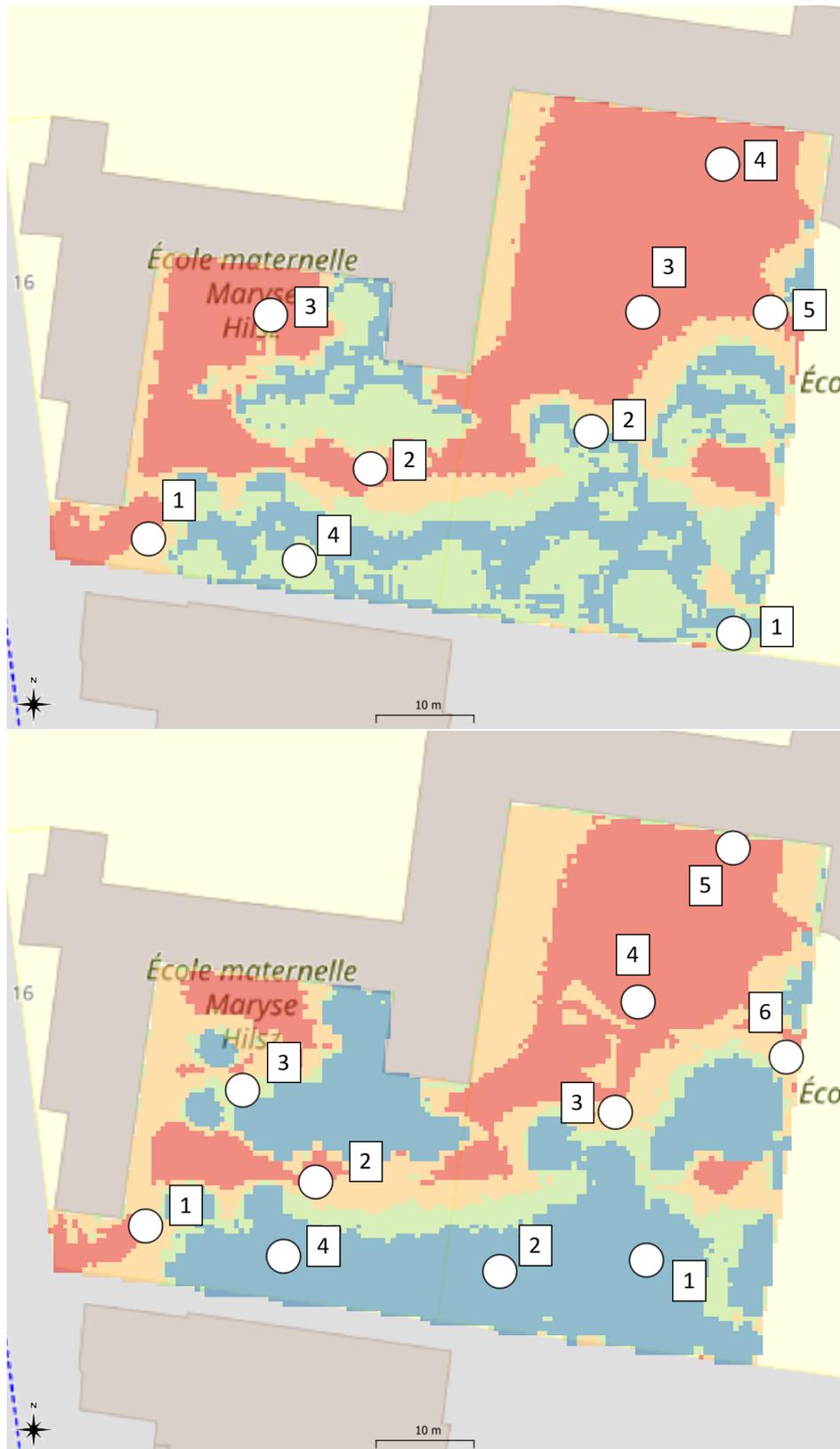


FIG. 6.6 – Circuits de mesures mobiles reportés sur la cartographie d'IPR des cours EE et EM M. Hilsz avant (haut) et après (bas) travaux.

DESCRIPTION DU STRESS THERMIQUE À L'ÉCHELLE DU PIÉTON : INDICATEUR DE POTENTIEL DE
RAFRAÎCHISSEMENT

TABLEAU 6.2 – Valeurs de l'UTCI, de stress thermique relatif et de l'IPR calculé en chaque point de mesure mobile avant et après travaux au sein des écoles EE et EM M. Hilsz.

| | IPR | | UTCI (°C) | | Stress thermique relatif (°C) | |
|------|-------|-------|-----------|-------|-------------------------------|-------|
| | Avant | Après | Avant | Après | Avant | Après |
| EE 1 | 0,31 | 0,07 | 32,4 | 29,3 | 1,4 | 2,1 |
| EE 2 | 0,42 | 0,1 | 41,3 | 39,1 | 10,4 | 11,9 |
| EE 3 | 0,89 | 0,71 | 42,6 | 39,4 | 11,9 | 12,6 |
| EE 4 | 0,93 | 0,86 | 45,8 | 41,7 | 14,8 | 14,2 |
| EE 5 | 0,85 | 0,83 | 40,9 | 33,8 | 10,1 | 5,41 |
| EE 6 | - | 0,65 | - | 41,3 | - | 12,5 |
| EM 1 | 0,7 | 0,84 | 40,6 | 40,8 | 10,9 | 12,9 |
| EM 2 | 0,9 | 0,79 | 42,2 | 40,8 | 12,2 | 12,8 |
| EM 3 | 0,87 | 0,46 | 43,4 | 39,6 | 13,3 | 10,6 |
| EM 4 | 0,02 | 0,08 | 32,5 | 29,9 | 1,9 | 1,3 |

La cartographie de l'IPR des cours Maryse Hilsz nous permet donc de visualiser les zones où le stress thermique du piéton y serait maximal. Nous proposons ici de confronter les résultats de la cartographie obtenue aux résultats de la campagne de mesures mobiles qui visait aussi à décrire le stress thermique d'un piéton au sein des cours d'école. La Figure 6.6 représente les points numérotés des mesures mobiles effectuées au sein des cours EE et EM M. Hilsz avant et après travaux. Le Tableau 6.2 reporte quant à lui les valeurs de stress thermique absolu, stress thermique relatif et la valeur moyenne de l'IPR correspondant au point de mesure. L'IPR d'un point de mesure est calculé sur QGIS en considérant un disque de rayon de 0,5 m centré sur le point de mesure.

Nous observons que les points EE 1, et EM 4 présentent des niveaux de stress thermique relatif faibles avant et après travaux, en concordance avec les valeurs d'IPR qui sont calculées en ces points. Les valeurs de l'IPR au point EE 4 et EE 3 sont les plus élevées de la cour EE M. Hilsz avant travaux et correspondent aux niveaux de stress thermique relatif les plus élevés tels que mesurés dans la cour. Il en est de même pour les points EM 2 et EM 3 au sein de la cour EM M. Hilsz avant travaux. Le point EM 3 présente un IPR presque réduit de moitié après travaux par rapport à sa valeur initiale (0,87 avant travaux contre 0,46) après travaux. Cette réduction d'IPR est accompagnée d'une réduction du stress thermique relatif de l'ordre de 2,7 °C. Certaines valeurs d'IPR semblent toutefois décorréliées des valeurs de stress thermique relatif calculé au point correspondant, à l'instar du point EE 2 qui présente

avant travaux un IPR modéré, mais un stress thermique relatif de 10,4 °C. Cette divergence peut s'expliquer par l'incertitude de localisation du point de mesure avant travaux sur la cartographie de l'IPR qui est générée avec une résolution de 0,5 m. En ce qui concerne la valeur du point EE 2 après travaux, nous pouvons citer la modélisation des arbres qui sont considérés comme des cylindres pleins totalement opaques aux rayons du soleil alors que le point de mesure était ensoleillé lors de la campagne de mesure. De même, le point EE 5 se trouve après les travaux à l'ombre d'un préau, ce qui explique la faible valeur de stress relatif mesurée malgré un IPR élevé.

Ainsi, une observation préliminaire des relations entre IPR et stress thermique relatif montre une corrélation positive entre IPR et stress thermique relatif puisque les points de mesure présentant les niveaux de stress thermique les plus élevés se trouvent dans les zones présentant un potentiel de rafraîchissement très élevé. L'observation de la corrélation entre les valeurs intermédiaires d'IPR et les niveaux de stress thermique montre la nécessité d'ajuster le calcul géomatique, notamment au niveau de la prise en compte des arbres et de leur ombrage.

L'indicateur peut tout aussi bien être utilisé dans une démarche de diagnostic, visant à discriminer des zones de stress thermique plus ou moins intense, que dans le cadre d'une démarche d'évaluation, afin de comparer les effets estimés des travaux de réaménagement, en particulier la végétalisation et la création d'ombrage. La Figure 6.7 cartographie les zones où l'IPR a le plus évolué suite aux travaux. Elle montre en effet que les écarts les plus marqués entre la cour avant travaux et la cour après travaux proviennent des démarches de végétalisation (terre, couvert végétal bas, ajout d'arbres). Ce résultat est confirmé avec les mesures mobiles qui montrent un faible niveau de stress relatif à l'ombre des arbres. Toutefois, certains ajustements sont à prévoir puisque l'on observe des élévations de stress thermique relatif malgré la diminution de l'IPR en certains points.

Les résultats préliminaires de l'analyse des mesures mobiles et de la cartographie de l'IPR du site M. Hilsz montre une corrélation positive entre IPR et niveau de stress thermique relatif avec certaines irrégularités. Nous étendons à présent cette analyse à l'ensemble des cours d'écoles FEDER OASIS afin de confirmer cette corrélation.

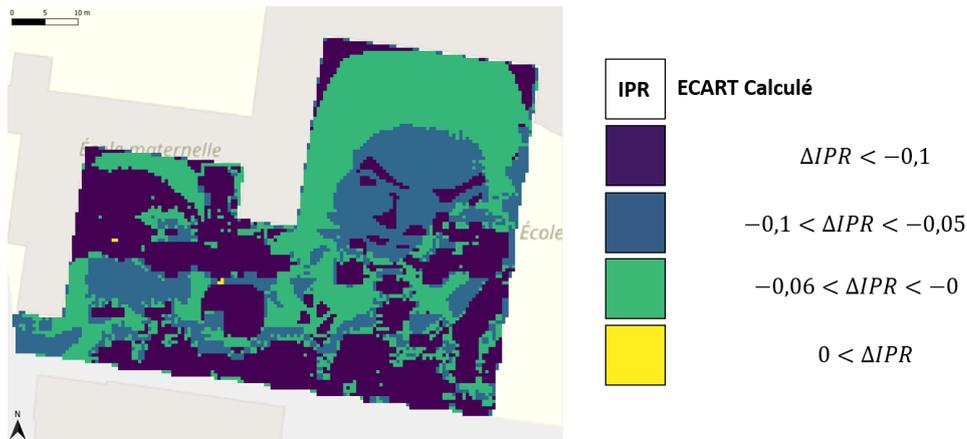


FIG. 6.7 – Variations de l'IPR suite aux travaux de rénovation des cours EE et EM M. Hilsz.

6.2 Résultats et discussions

Un premier diagnostic de l'exposition à la chaleur au sein des cours d'écoles a été appliqué à l'ensemble des 670 établissements gérés par IVdP. Ce diagnostic visait à classer les cours d'école au regard de la fraction de surfaces minérales exposées à l'irradiance solaire et donc propices à l'échauffement. 38 établissements présentant un potentiel élevé ont ainsi été priorités (Karam et al., 2019). Suite à la sélection finale des sites pilotes pour le projet FEDER OASIS, l'IPR a été calculé pour chaque cour d'école, avant et après travaux, sur la base des mesures d'albédo in situ (ASTM E1918-16, 2016), et des plans de réaménagement. On s'intéresse à présent aux résultats obtenus pour l'IPR sur l'ensemble des cours pilotes. Le tableau 6.3 reporte les IPR moyens et la fraction végétale et l'albédo moyen pour les cours d'école avant et après travaux.

Malgré une augmentation globale de l'albédo des cours OASIS, l'IPR moyen n'évolue pas de manière significative suite aux travaux à l'exception du site Maryse Hilsz dont l'IPR passe de 0,58 à 0,29. Cette réduction est due à l'augmentation de 10 % de la fraction végétale au sein des 2 cours, à l'augmentation de l'albédo moyen de la cour, mais aussi aux nouveaux arbres et arbustes ainsi que la désimperméabilisation/végétalisation du revêtement sous les arbres existants. L'asphalte existant d'albédo 0,14 a été remplacé par un asphalte clair d'albédo 0,32. Cette faible évolution de l'IPR de l'ensemble des cours peut s'expliquer d'une part par le calcul géomatique de la fraction végétale qui ne permet pas de tenir compte de la modification de l'albédo du revêtement situé sous la canopée de l'arbre. De plus, la prise en

compte des nouveaux arbres ajoutés est encore rudimentaire et ne permet pas de modéliser correctement l'ombre nouvelle générée.

TABLEAU 6.3 – Valeurs moyennes d'IPR, de la fraction végétalisée et de l'albédo de la surface de la cour calculées pour les sites Oasis avant et après travaux.

| ECOLE | Fraction végétale | | Albédo de la cour | | IPR | |
|-------------------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------|-------|
| | Avant | Après | Avant | Après | Avant | Après |
| P. Alviset | 24,65 | 24,65 | 0,12 | 0,4 | 0,38 | 0,34 |
| O. Greard | 20,25 | 20,25 | 0,11 | 0,22 | 0,48 | 0,47 |
| Keller | 44 | 44 | 0,11 | 0,22 | 0,36 | 0,32 |
| J. D'Arc | 53,43 | 53,43 | 0,21 | 0,25 | 0,35 | 0,31 |
| J. Dolent | 43,12 | 53,6 | 0,27 | 0,24 | 0,38 | 0,32 |
| Emeriau | 58 | 58 | 0,11 | 0,26 | 0,33 | 0,31 |
| Tandou | 23,49 | 28,78 | 0,13 | 0,18 | 0,61 | 0,58 |
| EE et EM M. Hilsz | 38,57 | 43,83 | 0,14 | 0,32 | 0,58 | 0,29 |

6.2.1 Confrontation entre mesures mobiles et IPR

L'IPR vise à identifier les zones où le stress thermique du piéton devrait être le plus élevé en journée. Il a été développé en parallèle des mesures expérimentales et de terrain. Afin de vérifier que l'objectif de l'indicateur est atteint, nous confrontons les cartographies d'IPR aux cartographies de stress thermique relatif établies au sein des cours d'école à l'aide des mesures mobiles décrites au chapitre 5.

La Figure 6.8 reporte les valeurs de stress thermique relatif calculées selon le protocole de mesures mobiles détaillées dans le chapitre 5 sur l'ensemble des campagnes de mesures mobiles sur l'ensemble des cours en fonction de l'IPR calculé au point de mesure correspondant.

Le jeu de données inclut une centaine de points obtenus à partir des mesures mobiles réalisées avant et après travaux au sein des 10 cours d'écoles pilotes du projet FEDER UIA OASIS. Les descripteurs Arbre, Minéral, Végétation basse, Préau renvoient à l'environnement immédiat du point de mesure dans la cour, c'est-à-dire "sous un arbre", "sur un revêtement minéral", "sur de la végétation basse" et "sous un préau", respectivement. D'une année à l'autre, les conditions d'ensoleillement des points de mesure sont respectées, sauf dans le

cas d'un ajout d'arbre ou d'abri.

On constate que les observations mobiles sont globalement en accord avec l'IPR calculé au même point, situées dans la diagonale allant des faibles IPR et stress thermiques relatifs aux IPR importants et stress thermiques relatifs élevés (pente de 11,01 °C par incrément d'IPR, ordonnée à l'origine de 1,5 °C et $R^2 = 0,44$).

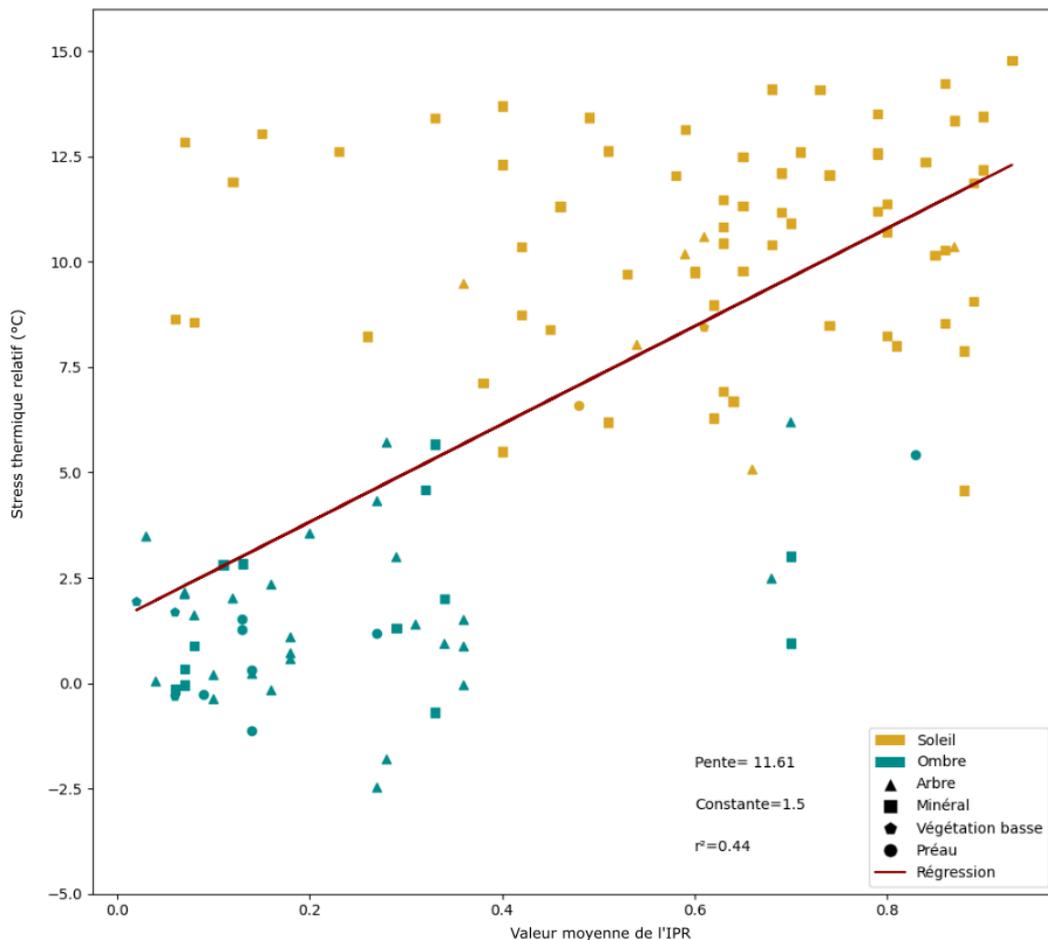


FIG. 6.8 – Stress thermique relatif mesuré sur site lors de balades thermiques en fonction de la valeur moyenne de l'IPR au même point.

On constate notamment que les points à l'ombre présentent un IPR inférieur à 0,4, et un stress thermique relatif moyen de l'ordre de 2 °C avec des déviations pouvant atteindre 7 °C au maximum. De la même manière, la moyenne des stress thermiques relatifs mesurés au soleil se situe autour de 12,5 °C et coïncide avec des IPR supérieurs 0,6. Les stress thermiques relatifs les plus importants sont observés pour des environnements immédiats de type

minéral.

Cela est conforme aux attentes établies sur la base de la littérature scientifique concernant le stress thermique au sein des cours, ainsi qu'à l'objectif de conception de l'IPR (Taleghani et al., 2014b; Middel et al., 2021).

Cependant, un certain nombre de points se trouve en dehors de cette zone de bonne concordance. Il s'agit notamment d'une dizaine de points présentant un stress thermique relatif élevé, mais un IPR inférieur à 0,4 et quelques points avec un IPR supérieur à 0,4 et un stress thermique relatif inférieur à 7,5 °C au soleil. Les points présentant des IPR élevés et des stress thermiques relatifs faibles correspondent à des points où la mesure a été perturbée par le passage d'un nuage.

Pour comprendre les écarts que nous ne pouvons expliquer par la perturbation de l'ensoleillement lors de la mesure, nous nous intéressons par la suite aux points de mesures ensoleillés de type minéral et en particulier à leur albédo.

6.2.2 IPR et échanges radiatifs

La Figure 6.9 associe aux points de mesure ensoleillés de type minéral l'albédo du revêtement. Ainsi, nous pouvons vérifier l'impact de la radiosité accrue du sol (corrélée à un albédo élevé) sur le stress thermique en ces points.

Sur la dizaine de points présentant un IPR faible et un stress thermique relatif élevé, nous pouvons compter 5 points d'albédo inférieur à 0,2, tous situés au sein de la cour du collègue O. Gréard. Nous pouvons remettre en cause le processus géomatique du calcul de l'IPR. En effet, cette cour comporte des arbres dont la couronne est peu dense tel qu'illustrée sur la Figure 6.10. À titre d'exemple, nous considérons le point de mesure indiqué par le cercle noir sur la Figure 6.10 (a). Ce point de mesure est situé sous un arbre (Figure 6.10 (b)) dont l'ombrage épars ne fait pas totalement obstruction au rayonnement solaire lors des campagnes de mesure mobile. Cet arbre est cependant modélisé par un cylindre plein de diamètre égal à la taille de son houppier. L'ombrage simulé sur SAGA est donc surestimé par rapport à la réalité. La valeur moyenne de l'IPR de notre point de mesure est calculée sur un disque de diamètre 1m centré sur ce dernier. Ce disque se trouve à proximité de l'arbre tel qu'illustré à la Figure 6.10 (c), auquel est associé un ombrage et par la suite des valeurs d'IPR proches de 0. Ainsi, l'IPR d'un point de mesure mobile à proximité d'un arbre est

sous-estimé par ce biais de calcul géomatique.

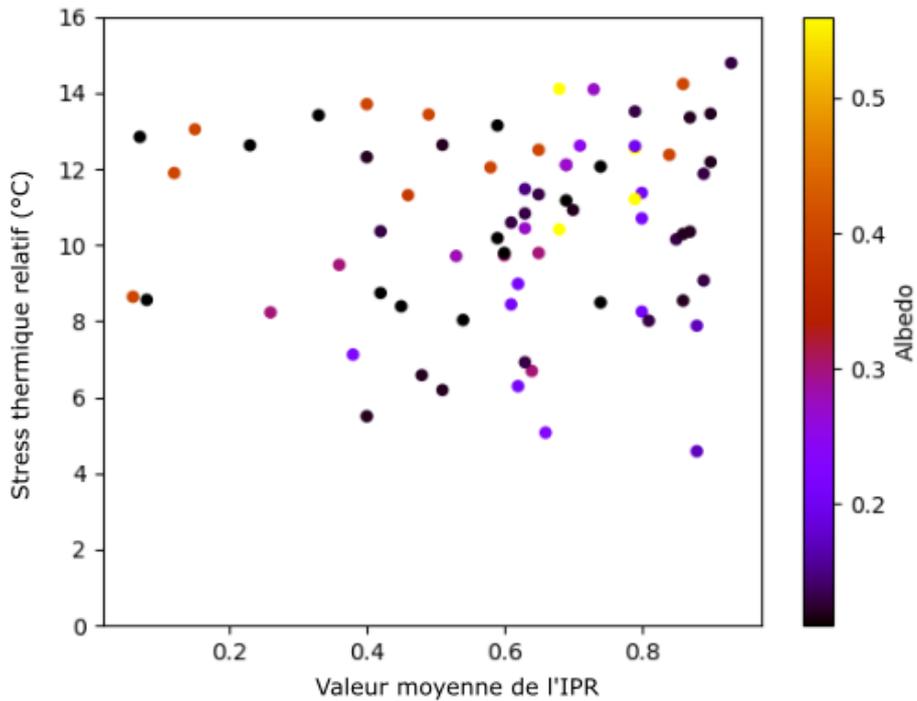


FIG. 6.9 – Valeurs d'albédo associées aux stress thermiques relatifs mesurées pour les points ensoleillés de type minéral.

Les 6 autres points présentent des albédos relativement élevés de valeur 0,3 à 0,4. Si l'albédo élevé des revêtements permet de réduire l'augmentation de la température de surface, la réflectivité de ces derniers contribue à augmenter la température moyenne radiante et, par conséquent, à la dégradation de confort thermique de l'utilisateur (Taleghani, 2018b; Erell et al., 2014). Cet effet n'est pas modélisé actuellement dans le calcul de l'IPR, ce qui pourrait expliquer l'écart observé.

Les échanges radiatifs avec le milieu environnant font partie des facteurs moteurs du stress thermique ressenti par le piéton. Il est donc nécessaire de prendre en compte cette grandeur dans le cadre d'un outil de décision orienté vers le confort thermique.

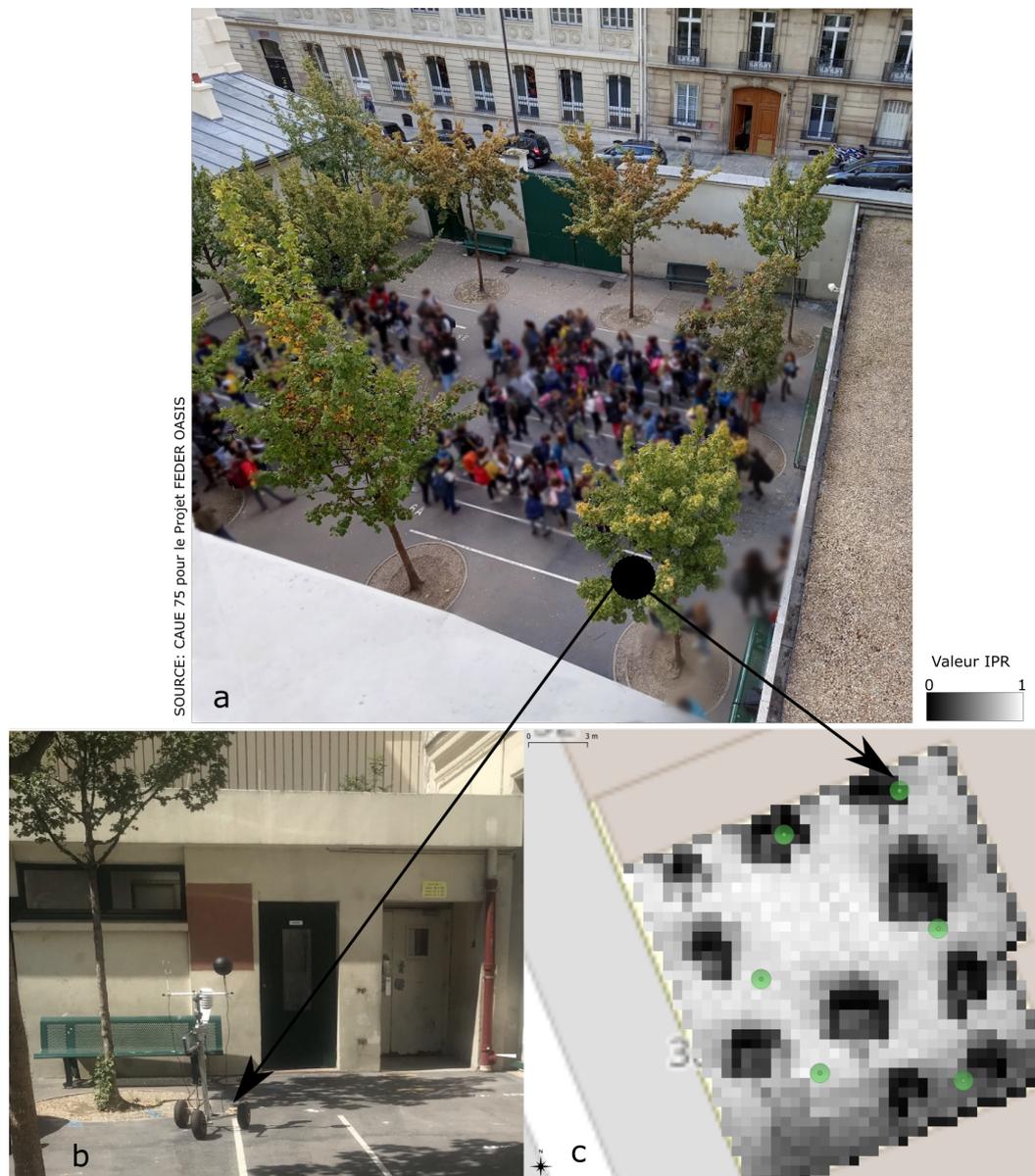


FIG. 6.10 – En haut (a), photo d’ensemble de la cour (CAUE). À gauche (b), photo de la station météo mobile au point de mesure. À droite (c), cartographie IPR de la cour Octave Gréard avant travaux. Les points verts représentent le circuit de mesures mobiles.

Lors de la construction du modèle, nous avons restreint les sources de rayonnement en journée à la voûte céleste. Ainsi, la construction de l’IPR n’est pas exhaustive vis-à-vis de l’albédo. Nous ne retenons de cette propriété que son intérêt en termes de réduction des températures de surface, mais ne tenons pas compte de son effet sur la radiosité du revêtement tel qu’observé expérimentalement au chapitre 3, ou de l’impact de son aug-

mentation sur l'environnement radiatif et par la suite le stress thermique du piéton, tel qu'observé au chapitre 5. L'expression de l'IPR doit être modifiée de sorte à intégrer la source de rayonnement thermique additionnel que constitue un matériau à fort albédo. Cette dernière pourrait simplement s'écrire comme un terme source additionnel $\alpha \cdot I_{incident}$, avec alpha, l'albédo moyen des surfaces ensoleillées et $I_{incident}$ l'irradiance solaire incidente. Une autre manière de procéder serait de simuler la distribution de température moyenne radiante, en faisant varier pour la zone d'étude, à irradiance fixée, l'albédo du sol, simulé afin de générer des cartographies de températures moyennes radiantes (Lindberg et al., 2008; Matzarakis et al., 2007). La variation de la température moyenne radiante en fonction de l'albédo permettrait de quantifier la contribution radiative due à l'albédo des surfaces.

6.3 Conclusion

Nous avons introduit dans ce chapitre un indicateur de potentiel de rafraîchissement, que nous avons développé en parallèle des mesures de terrain. Cet indicateur vise à identifier les espaces stratégiques pour atténuer le stress thermique des usagers afin d'optimiser les ressources et moyens d'intervention en amont des travaux de réaménagement.

Nous proposons un modèle simplifié des différents échanges thermiques entre le piéton et son environnement, qu'ils soient d'ordre convectif, radiatif, conductif ou latent. Nous retenons du point de vue du piéton deux modes d'échanges thermiques principaux : les échanges radiatifs, principalement avec la voûte céleste en journée, et les échanges convectifs avec l'air ambiant. Ces derniers sont liés à l'échauffement de l'air entourant le piéton au contact des différentes facettes urbaines, mais aussi des rejets de chaleur anthropique. La présence de végétaux ou de matériaux à rétention d'eau permet de réduire ce flux convectif par évapotranspiration. Nous traduisons ensuite ces transferts thermiques en terme d'informations géographiques.

L'effet rafraîchissant de la végétation est intégré à l'aide d'un score végétal tenant compte de l'ombrage et de l'évapotranspiration. De même, nous utilisons l'albédo afin d'estimer les gains solaires de la maille considérée. L'IPR est ainsi construit de sorte à estimer à l'échelle du piéton l'impact des matériaux sur le confort thermique, sur la base de leur réflectivité, du SVF et de la typologie de végétation.

L'IPR est un nombre adimensionnel compris entre 0 et 1, 0 étant le cas représentatif

d'une forêt dense ne pouvant bénéficier du déploiement d'une stratégie de rafraîchissement supplémentaire, car présentant un stress thermique minimal pour le piéton, et 1 étant le cas d'un espace urbain où le stress thermique serait maximal.

Une première confrontation entre mesures mobiles et IPR montre une corrélation entre IPR élevé et stress thermique, mais révèle quelques écarts. Il s'agit notamment de l'absence de prise en compte de l'impact de l'albédo sur la température moyenne radiante par l'IPR, ainsi que la modélisation de l'ombrage partiel sous les arbres considéré par l'IPR comme plein à l'aplomb des arbres. Il s'agit là de deux pistes importantes d'amélioration de l'indicateur.

L'IPR est calculé à l'aide d'outils SIG et permet de générer des cartographies mettant en évidence les espaces à rafraîchir en priorité. Cet indicateur est ainsi un outil d'aide à la décision assez rapide à mettre en place et avec des données facilement accessibles ou nécessitant peu de moyens à produire. Outre la rapidité de sa mise en place et sa facilité de compréhension, cet outil permet de répondre à la demande de services climatiques dans des régions où la production de données météorologiques et morphologiques est encore à ses débuts.

Chapitre 7

Conclusion

| | | |
|-------|---|-----|
| 7.1 | Une méthodologie d'évaluation à différentes échelles | 162 |
| 7.1.1 | Évaluation des matériaux à l'échelle du laboratoire | 163 |
| 7.1.2 | Évaluation des travaux OASIS à l'aide d'un réseau de stations fixes : un suivi continu dans le temps. | 163 |
| 7.1.3 | Évaluation des travaux OASIS à l'aide de mesures mobiles : un suivi continu dans l'espace. | 165 |
| 7.1.4 | L'indicateur de potentiel de rafraîchissement pour le diagnostic climatique | 166 |
| 7.2 | Discussions et perspectives | 167 |
| 7.2.1 | Évaluation du comportement thermoclimatique des matériaux : du laboratoire au terrain. | 168 |
| 7.2.2 | Impacts microclimatiques : limite, enseignements, effet d'échelle | 169 |
| 7.2.3 | Au-delà de l'impact local | 170 |
| 7.3 | Perspectives générales | 171 |
| 7.3.1 | Un nouveau paradigme pour les données du climat urbain | 172 |
| 7.3.2 | Les métadonnées du climat urbain : articulation technopolitique | 173 |

7.1 Une méthodologie d'évaluation à différentes échelles

Tout au long du manuscrit, nous avons élaboré et testé différentes méthodologies pour évaluer des solutions de rafraîchissement à l'échelle du laboratoire ou du terrain, dans le cadre du projet FEDER UIA OASIS porté par la Ville de Paris qui visait à transformer 10 cours d'écoles en îlots de fraîcheur urbains. À l'échelle du laboratoire, nous avons étudié le comportement thermique de différents revêtements de sol envisagés pour les écoles en conditions caniculaires. Nous avons déployé, à l'échelle de la ville, un réseau de 19 stations météorologiques afin d'assurer un suivi microclimatique continu dans le temps des travaux de transformation des 10 cours d'écoles. En complément, nous avons élaboré et mis en œuvre un protocole de mesures mobiles afin de saisir les variations de stress thermique au sein de la cour à des échelles spatiales plus résolues. Enfin, en considérant l'imbrication des bilans thermiques urbains et humains, nous avons développé un indicateur du potentiel de rafraîchissement, qui permet de diagnostiquer l'espace urbain du point de vue du stress thermique ressenti par le piéton. Nous avons évalué cet indicateur pour les 10 cours d'écoles et nous avons confronté les cartographies de potentiel de rafraîchissement obtenues aux niveaux de stress thermiques relatifs observés lors des mesures mobiles. Ce travail a été guidé par les pistes de recherches que nous avons définies aux chapitres 1 et 2 que nous rappelons ici :

1. Quelles solutions de revêtement de sol sont les plus adaptées au rafraîchissement d'une cour d'école parisienne lors de fortes chaleurs ?
2. Quel est l'impact des solutions de végétalisation sur le rafraîchissement dans une cour d'école ?
3. Quelles sont les échelles spatio-temporelles de l'évaluation du rafraîchissement ?
4. Comment intégrer les techniques de rafraîchissement au sein de l'action des collectivités territoriales ?

Ce travail a permis d'apporter des éléments de réponse à ces questions. Il a fait l'objet de communications et publications scientifiques (Karam et al., 2022; Hendel, 2020) et d'un dépôt de brevet d'invention (n°dépôt : FR2211783).

7.1.1 Évaluation des matériaux à l'échelle du laboratoire

Au cours du chapitre 3 nous avons étudié le comportement thermique de solutions de revêtement de sol conventionnelles, réfléchissantes et végétalisées en conditions caniculaires. Ce travail permet d'évaluer la contribution de ces matériaux à l'échauffement atmosphérique et aux conditions radiatives ambiantes qui régissent le stress thermique des usagers en journée et accompagne les collectivités dans le choix des solutions de revêtements lors de futurs travaux d'aménagement.

Sur la base du dispositif expérimental développé par [Parison et al. \(2020a\)](#), nous avons comparé les évolutions de températures en surface et en profondeurs ainsi que les dynamiques de transfert de flux de chaleur. Nous avons calculé la contribution à l'échauffement atmosphérique et la radiosité des matériaux cumulés sur une journée.

Les observations montrent que les solutions alternatives (asphalte clair, copeaux de bois, gazon) réduisent de 18,7 à 83,9% l'échauffement atmosphérique cumulé sur la journée par rapport à l'asphalte classique existant. Ce résultat est obtenu par la réduction des températures de surface en journée pour l'asphalte clair et le gazon (avec des amplitudes allant de 5°C pour l'asphalte clair à 15°C pour le gazon) et par un déstockage instantané de la chaleur pour les copeaux de bois du fait de leur faible inertie thermique.

Les performances thermiques des matériaux alternatifs en termes de réduction des échanges convectifs sont toutefois contrebalancées par leur contribution aux conditions radiatives ambiantes. En effet, ces matériaux présentent des albédos élevés par rapport au béton et à l'asphalte noir et augmentent ainsi de 6% à 17% la radiosité aux CLO en journée de ces matériaux par rapport à la référence, dégradant l'environnement radiatif du piéton.

Le revêtement végétal reste le plus indiqué en matière de minimisation de température de surface et de radiosité, mais ces performances nécessitent de maintenir un niveau d'irrigation suffisant.

7.1.2 Évaluation des travaux OASIS à l'aide d'un réseau de stations fixes : un suivi continu dans le temps.

Le chapitre 4 a présenté le déploiement du réseau de 10 paires de stations météorologiques fixes pour assurer un suivi continu dans le temps des travaux de transformation des 10

cours OASIS. Les paires de stations ont été installées en juillet 2019 et enregistrent depuis la température de l'air, l'humidité relative, la température de globe noir, la vitesse de vent et le rayonnement net. Pour chaque site OASIS, une station météorologique est installée au sein de la cour d'école et une station témoin est installée sur l'espace public à proximité. La paire de station permet ainsi de mettre en application la méthodologie BACI pour l'évaluation de l'impact des travaux de transformation sur les cours (Parison et al., 2020b).

La mise en œuvre de la méthode d'analyse statistique repose sur l'étude du profil inter-station qui caractérise la différence microclimatique de fond entre la station d'étude et la station témoin avant travaux, aussi connue sous le nom de BACI-contrast. Afin de prévenir la détection de faux impacts, nous avons développé à la section 4.2.3 une méthodologie de prétraitement des données afin de filtrer les différences d'ensoleillement entre la station témoin et la station d'étude. Ces différences impactent de manière significative les températures moyennes radiantes et par la suite l'UTCI, biaisant ainsi les résultats de l'analyse statistique.

Les résultats de l'analyse statistique montrent des impacts microclimatiques peu statistiquement significatifs sur 24h. La nuit, les réductions les plus significatives sont au niveau des températures de l'air et vont de $-0,26\text{ °C}$ à $-0,6\text{ °C}$ pour 5 cours d'écoles sur 9 analysées. En journée, les réductions de température de l'air sont moins remarquables et on observe une augmentation de la charge radiante au sein de certaines cours d'écoles qui peut être corrélée à l'augmentation de l'albédo des revêtements de sol.

Nous signalons que ces résultats sont à prendre avec précaution, au vu du filtrage de données qui enlève parfois une grande partie de la journée et au vu du nombre de journées radiatives que nous avons retenu pour l'analyse qui gagnerait à être augmenté. De plus, chaque école a bénéficié d'un plan d'aménagement unique, qui rend difficile la généralisation d'une observation sur l'ensemble du corpus et nécessite de se pencher sur chaque cas pour l'interprétation des résultats de l'analyse d'impact. En particulier, la durée du projet ne permet pas d'étudier l'impact de la végétation nouvellement plantée qui n'est pas encore totalement développée, ainsi que l'impact à long terme de la desimperméabilisation sur la gestion de l'eau et les performances des végétaux.

Enfin, le retour d'expérience permet de tirer des enseignements concernant les limites méthodologiques des études de terrain. La sélection des cours pilotes a été guidée par des considérations opérationnelles et logistiques de la VdP. Ainsi, certaines cours pilotes étaient

déjà relativement fraîches car arborées, à l'instar des cours Quatre Fils, Emeriau, ou Jeanne d'Arc. Ainsi, le BACI-contrast établi pour ces écoles est faible ce qui limite d'autant les impacts et leur significativité statistique.

7.1.3 Évaluation des travaux OASIS à l'aide de mesures mobiles : un suivi continu dans l'espace.

En complément des mesures fixes, nous avons établi au chapitre 5 une méthodologie de mesures mobiles tenant compte des variations temporelles à court terme et long terme, en introduisant une station météorologique fixe qui fait office de référence. Ainsi, la grandeur d'intérêt n'est plus le niveau de stress thermique absolu, mais le niveau de stress thermique relatif aux conditions de référence, que nous appelons stress thermique relatif, défini à l'équation 5.1.2. Nous désignons par conditions de référence, le stress thermique ressenti par un piéton au sein d'une cour abritée du vent et du soleil, pour des conditions de température de l'air et d'humidité relative données par une station témoin. Ainsi, cette nouvelle variable permet de comparer un stress thermique relatif en tenant compte de la dérive temporelle au sein d'une même journée de mesure et de la variabilité des conditions météorologiques entre deux journées de mesures ou deux années de mesures.

Nous définissons une plage horaire de mesure qui correspond à une phase de stabilité du rayonnement solaire, de la température de l'air et de l'humidité mesurée à la station témoin. Cette stabilité garantit la comparabilité des mesures entre elles d'une journée à l'autre et d'une année à l'autre.

Les mesures mobiles permettent ainsi de cartographier le stress thermique relatif d'un piéton au sein de la cour avec une résolution de l'ordre de la dizaine de mètres, soit une résolution spatiale supérieure à l'échelle microclimatique (~ 100 m) que l'on peut espérer avec un réseau de stations météorologiques fixes.

Nous avons appliqué la méthodologie de mesure aux dix cours d'école pilotes FEDER OASIS et avons réalisé 16 campagnes de mesures avant travaux et 11 campagnes de mesures après travaux durant les étés 2019, 2020 et 2021. Les résultats mettent en évidence la variabilité du stress thermique à l'échelle du piéton avec des variations de stress thermique relatif de l'ordre de 10°C entre un point situé à l'ombre d'un arbre ou en plein soleil au centre d'une cour asphaltée. Les mesures mobiles viennent aussi étayer l'évaluation thermoclimatique

des matériaux en laboratoire puisque l'on mesure une réduction de la température de l'air de l'ordre de 0,5 à 1 °C et une augmentation de la charge radiante de l'ordre de 7 °C corrélée à une augmentation d'albédo de 0,12 à 0,4. L'incrément de température radiante ΔT_{mrt} entraînant une augmentation de l'UTCI de l'ordre de $\frac{\Delta T_{mrt}}{3}$, l'augmentation de la charge radiante de 7°C se répercute sur l'UTCI avec une augmentation de l'ordre de 2°C.

Ainsi, la méthodologie de mesure établie s'inscrit dans le cadre d'une évaluation du stress thermique à fine échelle reproductible et comparable d'une année à l'autre. La cartographie du stress thermique par les mesures a révélé l'importance de la réflexion en amont de l'aménagement, notamment en ce qui concerne l'augmentation de l'albédo et le piégeage radiatif.

7.1.4 L'indicateur de potentiel de rafraîchissement pour le diagnostic climatique

Le chapitre 6 nous a permis d'introduire l'indicateur de potentiel de rafraîchissement, que nous avons élaboré en croisant les bilans thermiques urbains et humains. Cet indicateur vise à cartographier, à l'échelle du piéton, les zones d'un espace urbain où le stress thermique serait maximal et qui gagneraient à être rafraîchies en priorité.

En considérant une maille centrée autour du piéton imbriquée dans l'espace urbain, nous retenons les trois modes d'échanges thermiques affectant le bilan thermique du piéton : les échanges radiatifs dominés par les apports solaires en journée, les échanges convectifs entre le piéton et l'air ambiant et de manière indirecte, les échanges latents entre la végétation et l'eau urbaine qui contribue à rafraîchir l'air ambiant et par la suite le piéton. Cette modélisation simplifiée illustrée par la Figure 6.2 permet de dégager des propriétés caractérisant ces échanges, notamment l'albédo, la fraction végétale et l'ensoleillement d'une surface. Nous avons établi l'équation 6.7 qui formalise l'indicateur. Ensuite, nous avons traduit les termes de l'expression en information géographiques pour générer des cartographies du potentiel de rafraîchissement que nous avons confrontées à nos mesures mobiles. Globalement, nous observons une corrélation positive entre IPR et stress thermique relatif. Des améliorations sont à attendre en intégrant l'impact de l'albédo des surfaces sur le bilan radiatif du piéton à notre modèle et en tenant compte que le sol directement sous la couronne des arbres n'est pas nécessairement à l'ombre.

Ainsi construit, l'indicateur de potentiel de rafraîchissement permet de diagnostiquer la distribution spatiale du stress thermique en ville et d'optimiser l'intervention opérationnelle des collectivités dans le cadre de la mise en œuvre de stratégies de rafraîchissement..

Les travaux présentés dans ce manuscrit établissent une méthodologie d'évaluation des stratégies de rafraîchissement à l'échelle microclimatique et du piéton. Cette méthodologie combine expérimentation en laboratoire et mesures in situ. Les données expérimentales et de terrain produites ont permis de confirmer l'impact simulé de certaines techniques de rafraîchissement sur le confort thermique du piéton. Ces données ont aussi permis de valider notre indicateur de potentiel de rafraîchissement, qui propose une modélisation simplifiée du confort thermique du piéton au sein d'un espace urbain donné. La mise en application de cette méthodologie à des cours d'écoles parisiennes a toutefois soulevé des limites et futures pistes de réflexion qu'il convient de discuter.

7.2 Discussions et perspectives

Si le dispositif expérimental décrit au chapitre 3 permet de maintenir des conditions caniculaires simplifiées en laboratoire, les conditions météorologiques réelles sont plus variables et aléatoires. Comme discuté au chapitre 4, les critères de journées radiatives permettent d'assurer une reproductibilité des conditions météorologiques d'un été à l'autre et de standardiser les observations de terrain, mais les effets des solutions d'aménagement sont modulées par les perturbations météorologiques telles que les orages et précipitations ou encore les usages humains, à l'instar de l'arrosage urbain mis en place dans certaines cours d'école les jours de canicule. À la lumière des interventions de terrain et des résultats exposés précédemment, nous pouvons poser les questions suivantes :

- Les tendances de comportement identifiées en laboratoire sont elles représentatives du comportement dynamique qui se manifeste en conditions réelles ?
- Quels sont les facteurs déterminants l'intensité de l'impact microclimatique des travaux OASIS ?
- Quelle méthodologie pour étudier l'impact du stress hydrique sur les performances rafraîchissantes de la végétation vis-à-vis du stress thermique du piéton ?
- Comment raffiner l'indicateur de potentiel de rafraîchissement au regard de l'albédo des surfaces ?

7.2.1 Evaluation du comportement thermoclimatique des matériaux : du laboratoire au terrain.

L'évaluation des comportements thermiques des matériaux OASIS a été réalisée en laboratoire et permet d'estimer l'impact de ces matériaux sur la température de l'air ou le stress thermique des usagers. Certaines performances rafraîchissantes sont toutefois tributaires de facteurs extérieurs, à l'instar du gazon dont le pouvoir rafraîchissant est limité par l'humidité et la disponibilité en eau (Takebayashi and Moriyama, 2012). Il en est de même pour les matériaux poreux qui sont perméables et susceptibles de voir leurs comportements thermiques modifiés par un apport d'eau par irrigation ou arrosage, ou par l'usure mécanique liée à l'usage et l'encrassement (Parison et al., 2020a).

Nous avons procédé, lors des travaux de transformation des cours pilotes, à l'instrumentation de certains cours afin d'étudier à l'échelle du terrain les performances de ces matériaux en conditions réelles. Nous avons installé sous la couche de nouveau revêtement des capteurs de flux de chaleur et de température. Le tableau 7.1 répertorie les matériaux testés ainsi que les profondeurs d'instrumentation.

TABLEAU 7.1 – Instrumentation des matériaux *in situ* la profondeur des capteurs indiquée est celle qui a été prescrite au début des chantiers.

| Matériau | Support du capteur | Profondeur (cm) |
|---|--------------------|-----------------|
| Dallage perméable | grave | 12 |
| Béton désactivé | grave | 5 |
| Pavés granit | sable | 15 |
| Pavé béton | sable | 8 |
| Chaussée végétale | terre et gravats | 40 |
| Zone enherbée humide | terre végétale | 17 |
| Copeaux sombres | géotextile | [15-25] |
| Asphalte clair | sable | 12 |
| Terre végétale (recouverte de copeaux clairs) | terre végétale | [10-15] |

Les capteurs sont fabriqués et calibrés par la société Captec. Ils sont carrés et mesurent 200 mm de côté et près d'1 mm d'épaisseur, la zone sensible mesure 180×180 mm. Ils sont encapsulés entre 2 plaques d'aluminium d'épaisseur 5 mm. Les capteurs sont constitués d'un thermocouple de type T et un fluxmètre de sensibilité variant entre 73,8 V/(W/m²) et 77,1

V/(W/m²). Ils sont reliés aux stations météo fixes par un câble blindé. Ces capteurs ont été installés à l'été 2020 lors des chantiers de transformation des cours OASIS.

Les données récoltées permettront d'analyser les performances microclimatiques des matériaux en conditions réelles et à plus long terme d'étudier l'évolution de leurs propriétés avec le vieillissement. En complément de l'évolution journalière des températures de surface et des flux de chaleur, l'étude des matériaux sur un cycle de plusieurs journées permettrait de dégager des dynamiques de stockage de la chaleur et d'hystérésis (Chaniel et al., 2022b; Hendel, 2016). Dans cette optique, un démonstrateur 16 échantillons de matériaux de revêtement est développé par Parison et al. (2022) afin d'étudier et de comparer en conditions réelles et dynamique leur comportement thermoclimatique.

7.2.2 Impacts microclimatiques : limite, enseignements, effet d'échelle

Les mesures de terrain, fixes ou mobiles, posent la question de la robustesse statistique en fonction de la taille de l'échantillon de mesures et par la suite de l'horizon temporel nécessaire pour des projets de telle envergure afin de produire des jeux de données complets et suffisants. Nous avons discuté au chapitre 4, au vu des échéances du projet FEDER OASIS, des différentes manières de remédier au faible nombre de jours exploitables et avons proposé d'étendre la période d'observation aux mois de mars, avril et mai. Nous avons aussi émis l'idée de restreindre l'étude des effets microclimatiques aux journées présentant des courbes d'ensoleillement similaires, par exemple les journées du mois de juin seulement, de sorte à ne pas biaiser le BACI-contrast en modifiant les masques solaires. Cette stratégie nécessite d'anticiper l'instrumentation des sites d'étude afin de couvrir l'intégralité de la période d'observation avant et après travaux.

L'augmentation du jeu de mesures permettrait de mettre en application les modèles linéaires mixtes proposée par Parison et al. (2020b) afin de d'isoler l'effet des travaux OASIS en considérant la modification des masques solaires au cours de la période d'observation ou la dérive climatique. Il est important de noter que pour chaque état de chaque effet aléatoire, 10 à 30 observations sont nécessaires.

Outre les modifications d'ensoleillement, d'autres facteurs influents gagneraient à être étudiés, notamment celle du type de végétation sur le rafraîchissement des cours (Stark da Silva et al., 2023). En particulier, les campagnes de mesure mobile ont révélé un impact

variable des arbres sur la température moyenne radiante. Parmi les hypothèses que nous évoquons figure l'effet des précipitations et de la sécheresse sur la capacité des arbres à évapotranspirer. L'impact du stress thermique sur les performances rafraîchissantes des arbres a fait l'objet d'études récentes traitant de la résistance des plantes au stress hydrique en fonction de leur essence, de la disposition optimale des arbres pour le rafraîchissement ou encore de l'impact de leur mode de plantation (Langenheim et al., 2020; Gebert et al., 2019; Rahman et al., 2020; Fleckenstein et al., 2022). Dans cette optique, notre jeu de données permet aujourd'hui d'étudier la relation entre le déficit de vapeur d'eau et la charge radiante mesurée sous un arbre et gagnerait à être enrichi par des données complémentaires, notamment une étude des précipitations les jours précédents la mesure ou du mode de plantation.

Concernant l'intensité des impacts microclimatiques des travaux de transformation au sein des cours, le jeu de données de mesure fixe produit permet de valider expérimentalement, sur 10 types de cours OASIS, l'étude numérique conduite par Bernard et al. (2018) sur l'étendue de l'effet rafraîchissant des parcs, au vu des différentes fractions végétales au sein des cours et de la diversité de leur environnement urbain. Ainsi, les résultats du suivi microclimatique du projet FEDER OASIS constituent un premier retour d'expérience sur les méthodologies d'évaluation *in situ* des stratégies de rafraîchissement combinant à la fois solutions grises et solutions basées sur la nature (Bouzouidja et al., 2021a).

7.2.3 Au-delà de l'impact local

Nous avons discuté auparavant de la robustesse statistique de nos méthodologies d'évaluation en mettant l'accent sur le nombre de jours nécessaire pour effectuer l'évaluation. Nous avons de même fait la remarque que l'hypothèse d'une station fixe témoin non perturbée par les travaux OASIS était mise à mal sur le terrain parisien à cause de facteurs extérieurs (destruction de matériel des stations situées à proximité de la voirie, travaux privés à proximité des stations témoins ...) Le déploiement des stations météo a permis de mettre en œuvre la méthodologie BACI pour l'évaluation de l'impact des travaux OASIS, mais est aussi l'occasion de tester le dispositif MBACI qui propose de substituer à la station témoin le réseau de stations fixes installées autour de la station d'étude (Downes et al., 2002). Ainsi, nous pouvons espérer nous affranchir des problématiques liées à la modification de l'environnement immédiat de la station témoin.

Par analogie au dispositif MBACI, nous pourrions améliorer la robustesse et la répétabilité

des mesures mobiles en remplaçant la station fixe de référence par le réseau de stations entourant la cour d'étude. La comparaison des différentes campagnes de mesures au sein des différentes écoles entre elle serait pertinente et permettrait d'évaluer l'effet d'une même technique mise en œuvre au sein de plusieurs cours en fonction de la morphologie de la cour, du facteur de vue du ciel, etc. (Pigliautile and Pisello, 2020; Nice et al., 2022).

Le projet FEDER OASIS, au-delà de l'impact microclimatique à l'échelle du piéton, est une opportunité pour étudier l'impact de l'ensemble des cours rénovées sur le territoire parisien, en particulier sur l'îlot de chaleur urbain parisien et les différentes manières d'appréhender la création d'îlots de fraîcheurs et d'espaces verts dans des villes où la densité de construction et d'habitants est une contrainte foncière importante (Rosso et al., 2022; Haaland and van den Bosch, 2015). Les premiers résultats de l'évaluation du projet à l'échelle locale réalisée par Météo-France sont en accord avec les observations de terrain, notamment en ce qui concerne l'impact microclimatique de l'albédo des revêtements de sol sur le stress thermique des piétons et soulèvent la nécessité de raffiner les modèles numériques afin de tenir compte de la modélisation des arbres et de la végétation à l'échelle des cours (Goret and Lovat, 2022).

Les 19 stations météorologiques installées à l'été 2019 viennent densifier le réseau de stations météorologiques LUTECE, illustré à la figure 7.1 qui couvre une vaste étendue de la métropole parisienne. Ce réseau permet de constituer une base de données microclimatiques importante qui permettra de valider et de calibrer des modèles, ou de fournir des observations de terrain pour de futurs travaux scientifiques. Les données OASIS sont notamment utilisées dans des projets interdisciplinaires, à l'instar du projet PANAME 2022, qui couvre différentes thématiques telles que les liens entre santé publique et chaleur en ville, les dynamiques de pollution atmosphérique ou encore l'amélioration de la prédiction des événements extrêmes (CNRS et al., 2022).

7.3 Perspectives générales

Le projet FEDER UIA OASIS s'inscrit dans le cadre du Plan Climat de la [Ville de Paris \(2017a\)](#) et de sa stratégie de résilience ([Ville de Paris, 2017b](#)). Ce projet constitue un démonstrateur de services climatiques urbain dans la mesure où il contribue à la production de données climatiques et à l'évaluation d'une stratégie de rafraîchissement *in situ*, ainsi qu'à la création d'un outil SIG d'aide à la décision pour les collectivités [Grimmond et al. \(2020\)](#); [Dumas et al. \(2021\)](#).

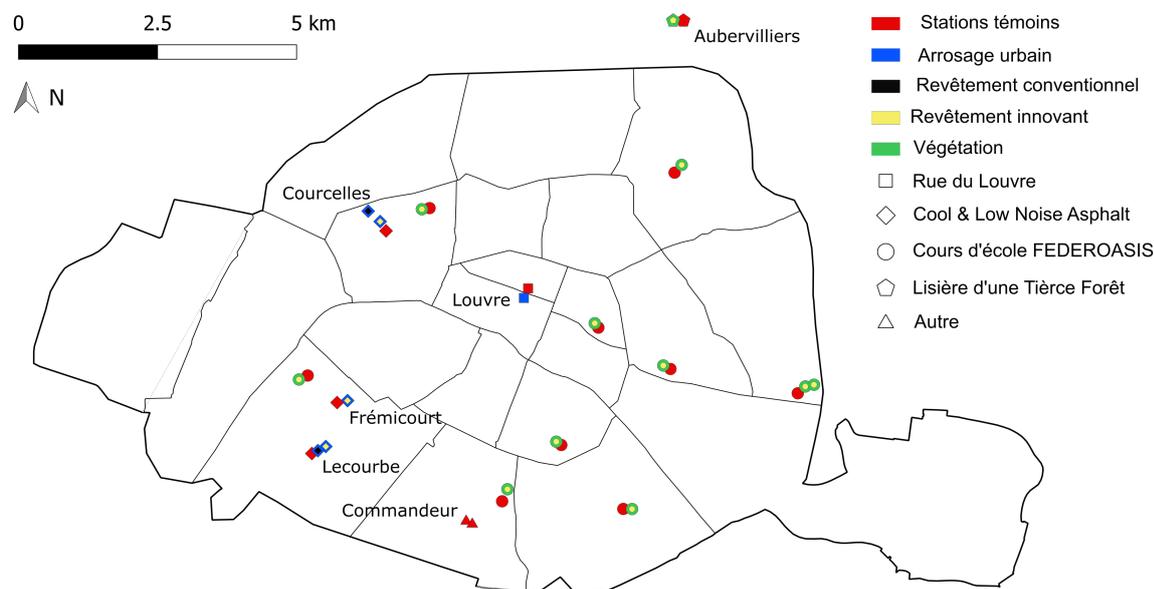


FIG. 7.1 – Emplacement des stations météo du réseau LUTECE à Paris. La couleur et la forme de chaque marqueur décrit le type de technique de rafraîchissement étudiée ainsi que le projet auquel la station est reliée. Les stations témoins sont en rouge.

7.3.1 Un nouveau paradigme pour les données du climat urbain

Le chapitre 6 a permis d'établir un indicateur du stress thermique à l'échelle du piéton basé sur l'information géographique. Cet indicateur constitue un outil de transfert de l'information climatologique aux décideurs et permet d'effectuer des diagnostics microclimatiques à l'aide de données facilement accessibles et de logiciels libres. Ce travail peut s'inscrire dans le domaine émergent de l'informatique pour le climat urbain ou UCI (Urban Climate Informatics) à la croisée de la climatologie urbaine et la science des données du climat (Middel et al., 2022). L'UCI appréhende les milieux urbains comme des systèmes complexes et vise à comprendre les interactions entre l'homme et environnement par le biais de nouvelles approches technologiques, méthodologiques et systémiques. Elle adopte des méthodes plus intégrées et centrées sur l'homme, fait appel à de nouvelles techniques de détection ainsi que des ensembles de données non traditionnelles, tels que les données opportunistes ou les stations météorologiques citoyennes (Apte et al., 2017; Madelin and Dupuis, 2020). De même, l'UCI a recours à la science des données et à l'intelligence artificielle afin de traiter ces volumes importants de données (Hart and Sailor, 2009)

Ce nouveau domaine soulève l'enjeu de la production, de l'acquisition et de l'utilisation

de ces données. La ville de Paris est un territoire très documenté et bénéficie d'infrastructures capables d'assimiler et de gérer un flux continu et croissant de données, ce qui n'est pas le cas de tous les milieux urbains. Un enjeu important des années à venir consistera à mettre en place des dispositifs d'accompagnement dans les pays les plus touchés par la crise climatique, mais aussi de développer des algorithmes de traitement de l'information afin d'éviter des biais statistiques et d'observation (Bigot et al., 2017). Enfin, un effort de régulation de l'utilisation des données opportunistes est attendu afin de ne pas porter atteinte à la vie privée des citoyens et citoyennes (Nazarian et al., 2017; Middel et al., 2022).

7.3.2 Les métadonnées du climat urbain : articulation techno-politique

Le projet FEDER UIA OASIS émane d'une volonté politique de la ville de Paris de favoriser la résilience du territoire (Ville de Paris, 2017b). Outre l'aspect microclimatique des travaux de transformation, le projet s'est penché sur les usages sociaux de l'espace public, dans une démarche participative visant à améliorer la cohésion sociale au sein d'un quartier et d'éveiller une conscience environnementale chez les enfants. Les résultats de l'évaluation sociologique du projet montrent les impacts bénéfiques de la végétalisation des cours sur plusieurs plans : les enfants sont moins enclins aux jeux violents et plus sensibilisés aux enjeux environnementaux (LIEPP, 2022a,b). Les travaux soulignent toutefois que l'expérimentation de l'ouverture des cours au public périscolaire n'a pas été concluante et souligne le rôle que jouent les institutions politiques dans les démarches d'implication des citoyens et de mise à disposition des infrastructures nécessaires (LIEPP, 2022c,d).

Ces résultats confirment une fois de plus les cobénéfices de la végétation en milieu urbain et soulèvent d'autres pistes de réflexions (Reid et al., 2022; Heckert and Bristowe, 2021) L'efficacité d'une stratégie de rafraîchissement tient autant à la mise en œuvre des différentes techniques de rafraîchissement qu'à l'usage que les citoyens en font (Taplin, 2012). Face à l'ampleur des défis climatiques, la vulnérabilité des populations les plus démunies est accrue et va souvent de pair avec une ségrégation spatiale urbaine (Abascal et al., 2022). De même, la mise en place de changement d'usage, à l'instar de la promotion des mobilités douces, est souvent entravée par l'absence d'infrastructure adaptée (Arellana et al., 2020). Les collectivités, outre la mise en place de stratégies d'adaptation, se doivent de réfléchir aux incitations économiques et sociales nécessaires afin de modifier les pratiques de consommation des citoyens et encourager une transition écologique et énergétique sans

perdre de vue les enjeux de justice sociale et climatique (Viguié and Hallegatte, 2012; Viguié et al., 2020).

Annexes

Annexe A

Impact microclimatique des travaux de rénovation au sein des cours pilotes OASIS

Site 2 : Pierre Alviset

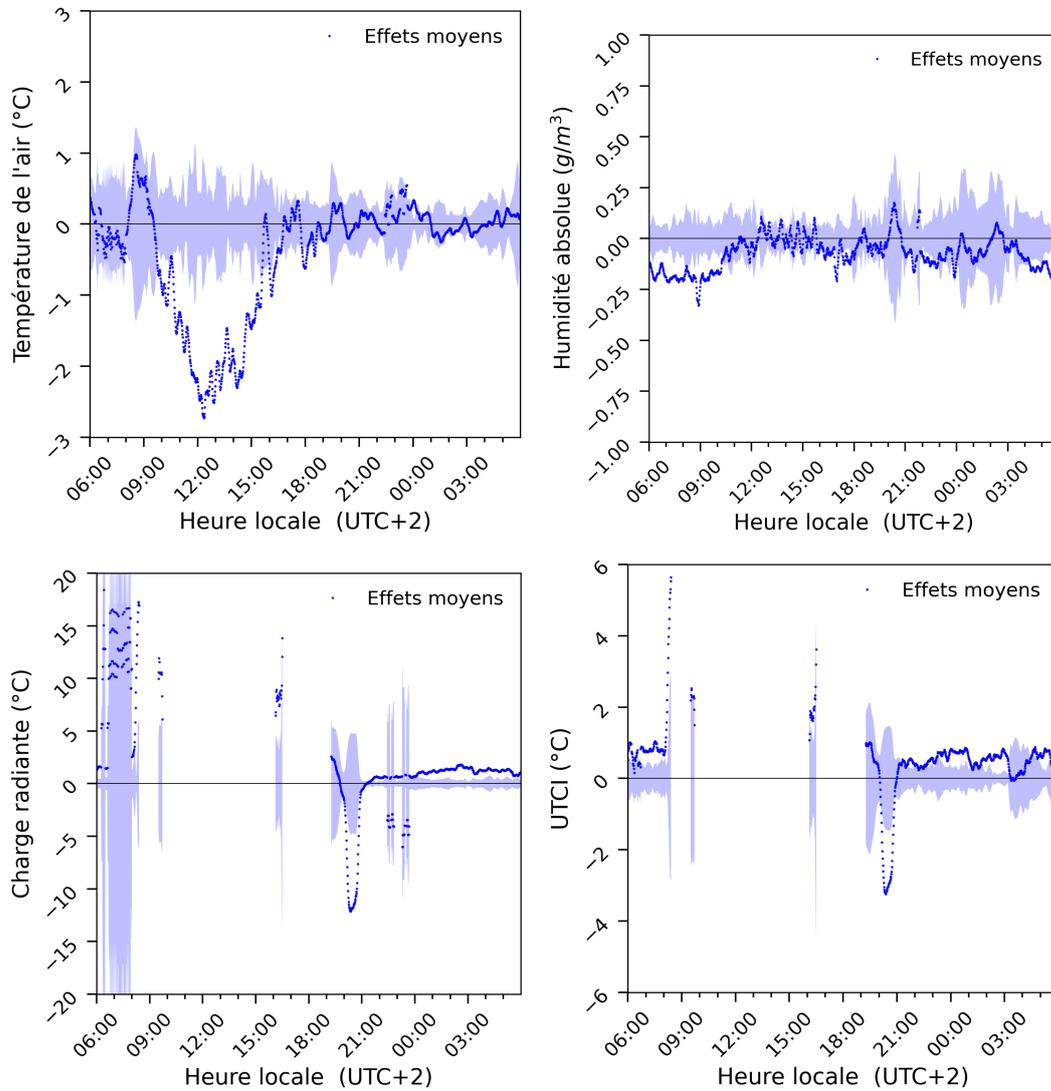


FIG. A.1 – Impact microclimatique des travaux OASIS sur la Température de l'air, l'humidité absolue, la charge radiante, et l'UTCI. Les points bleus représentent les effets moyens, l'enveloppe bleue transparente représente l'intervalle de confiance à 95 % des effets moyens. Les évènements en dehors de cet intervalle sont considérés comme statistiquement significatifs.

Site 3 : Octave Gréard

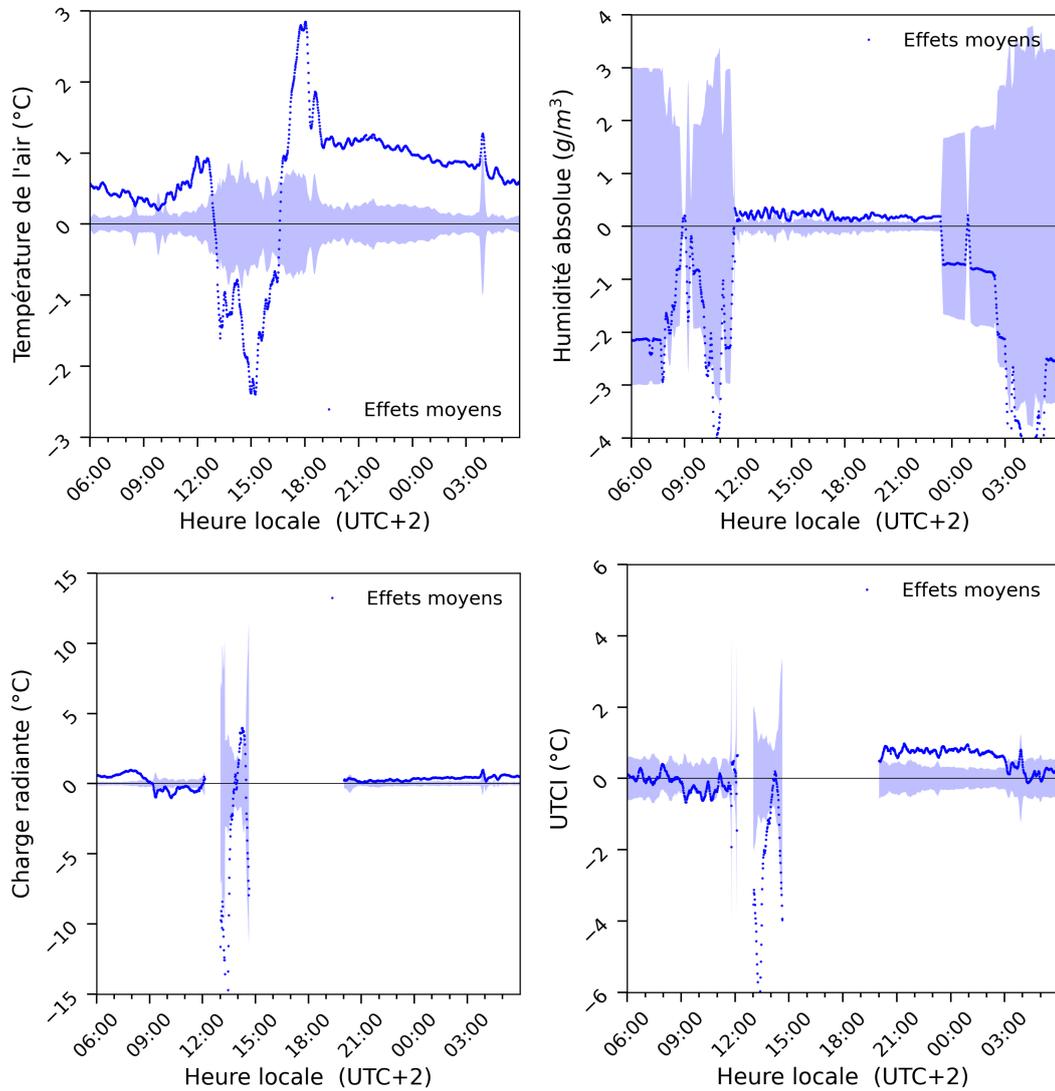


FIG. A.2 – Impact microclimatique des travaux OASIS sur la Température de l’air, l’humidité absolue, la charge radiante, et l’UTCI. Les points bleus représentent les effets moyens, l’enveloppe bleue transparente représente l’intervalle de confiance à 95 % des effets moyens. Les évènements en dehors de cet intervalle sont considérés comme statistiquement significatifs.

Site 4 : Keller

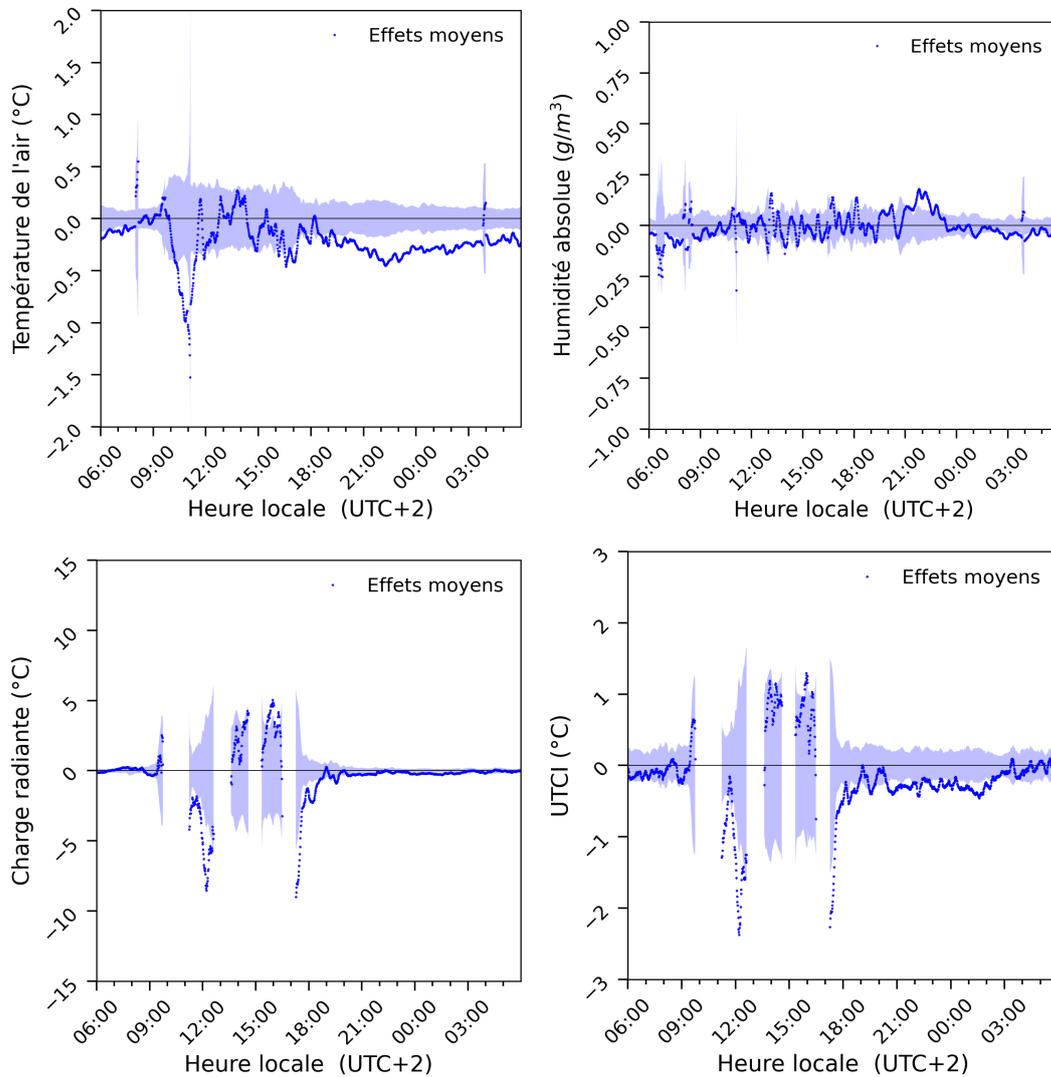


FIG. A.3 – Impact microclimatique des travaux OASIS sur la Température de l'air, l'humidité absolue, la charge radiante, et l'UTCI. Les points bleus représentent les effets moyens, l'enveloppe bleue transparente représente l'intervalle de confiance à 95 % des effets moyens. Les événements en dehors de cet intervalle sont considérés comme statistiquement significatifs.

Site 5 : Jeanne D'Arc

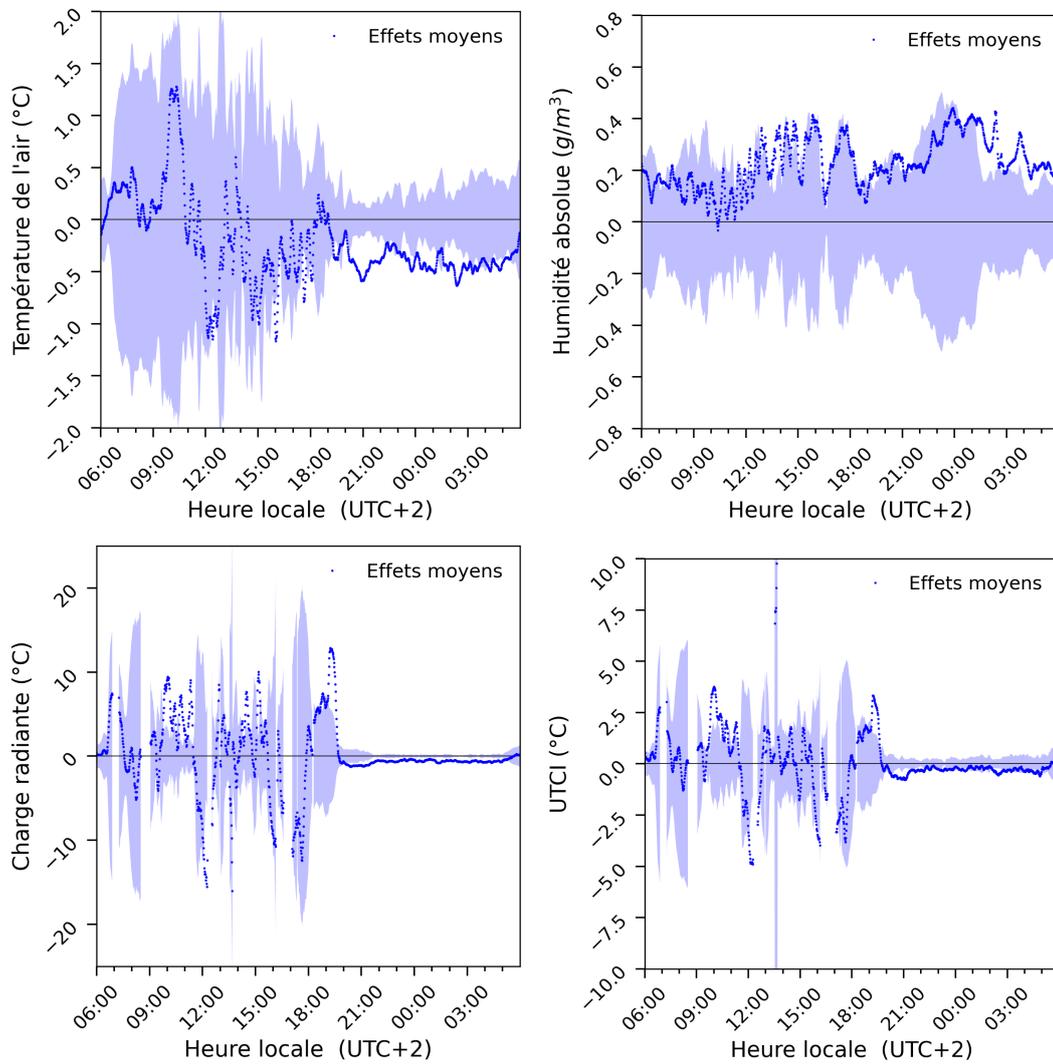


FIG. A.4 – Impact microclimatique des travaux OASIS sur la Température de l'air, l'humidité absolue, la charge radiante, et l'UTCI. Les points bleus représentent les effets moyens, l'enveloppe bleue transparente représente l'intervalle de confiance à 95 % des effets moyens. Les évènements en dehors de cet intervalle sont considérés comme statistiquement significatifs.

Site 6 : Jean Dolent

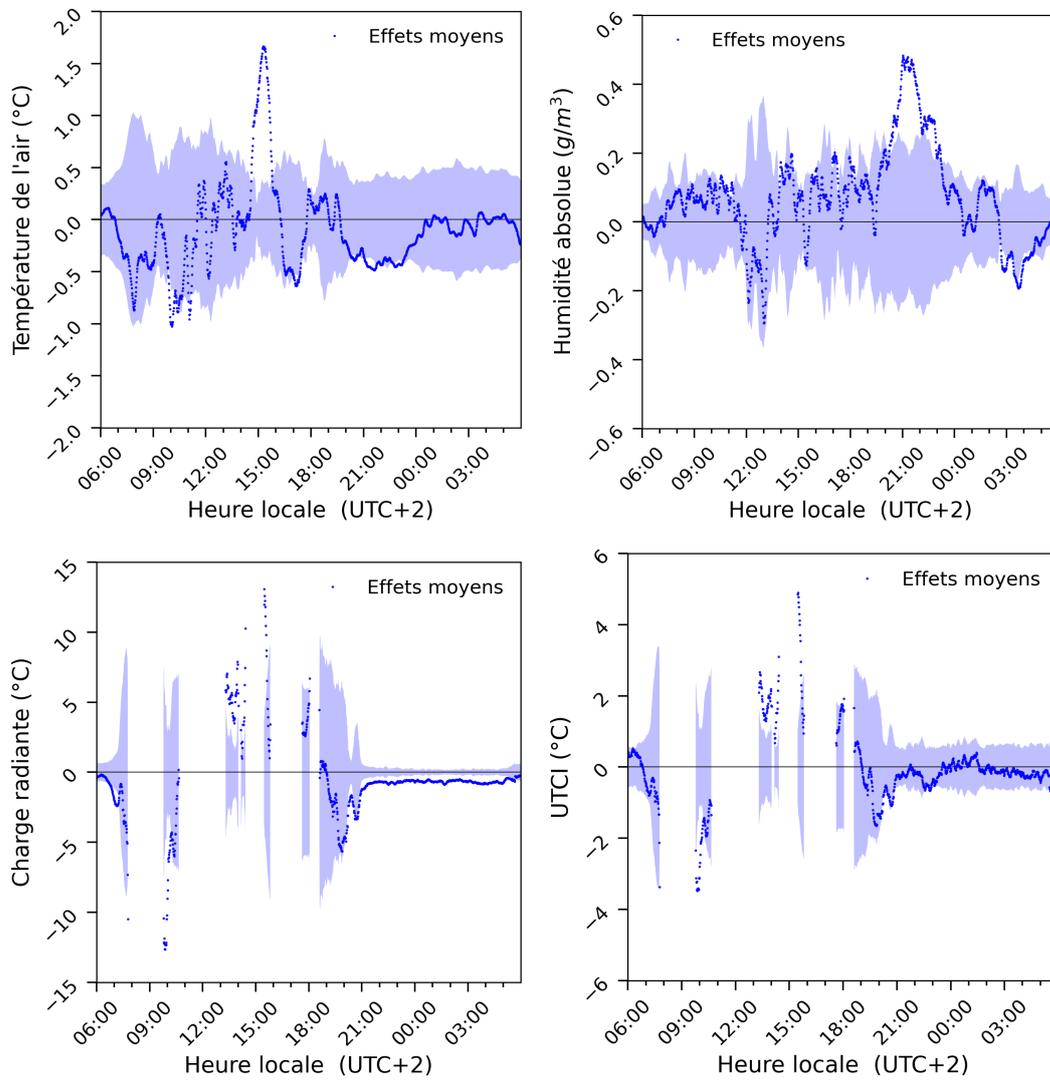


FIG. A.5 – Impact microclimatique des travaux OASIS sur la Température de l’air, l’humidité absolue, la charge radiante, et l’UTCI. Les points bleus représentent les effets moyens, l’enveloppe bleue transparente représente l’intervalle de confiance à 95 % des effets moyens. Les événements en dehors de cet intervalle sont considérés comme statistiquement significatifs.

Site 7 : Emériau

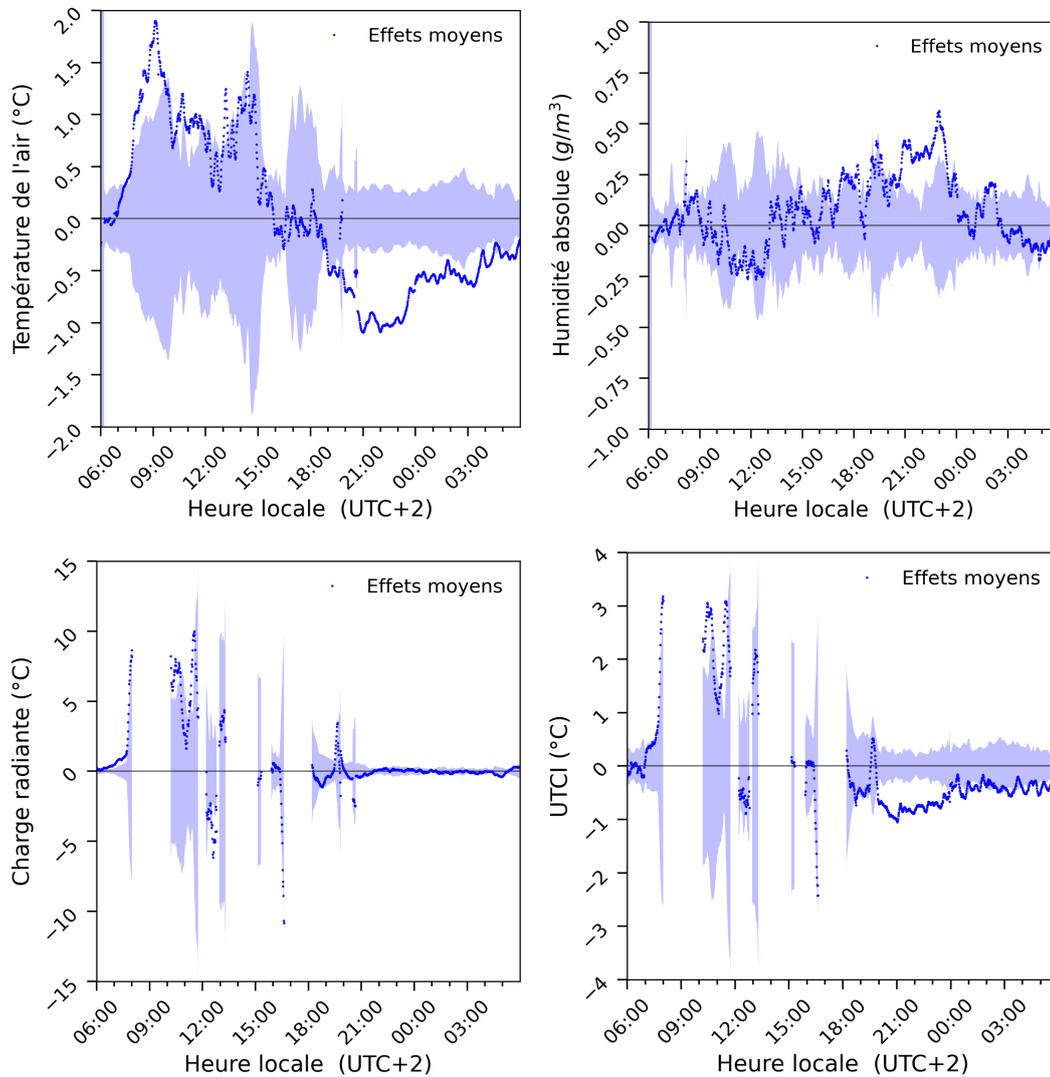


FIG. A.6 – Impact microclimatique des travaux OASIS sur la Température de l’air, l’humidité absolue, la charge radiante, et l’UTCI. Les points bleus représentent les effets moyens, l’enveloppe bleue transparente représente l’intervalle de confiance à 95 % des effets moyens. Les événements en dehors de cet intervalle sont considérés comme statistiquement significatifs.

Site 9 : EE Maryse Hilsz

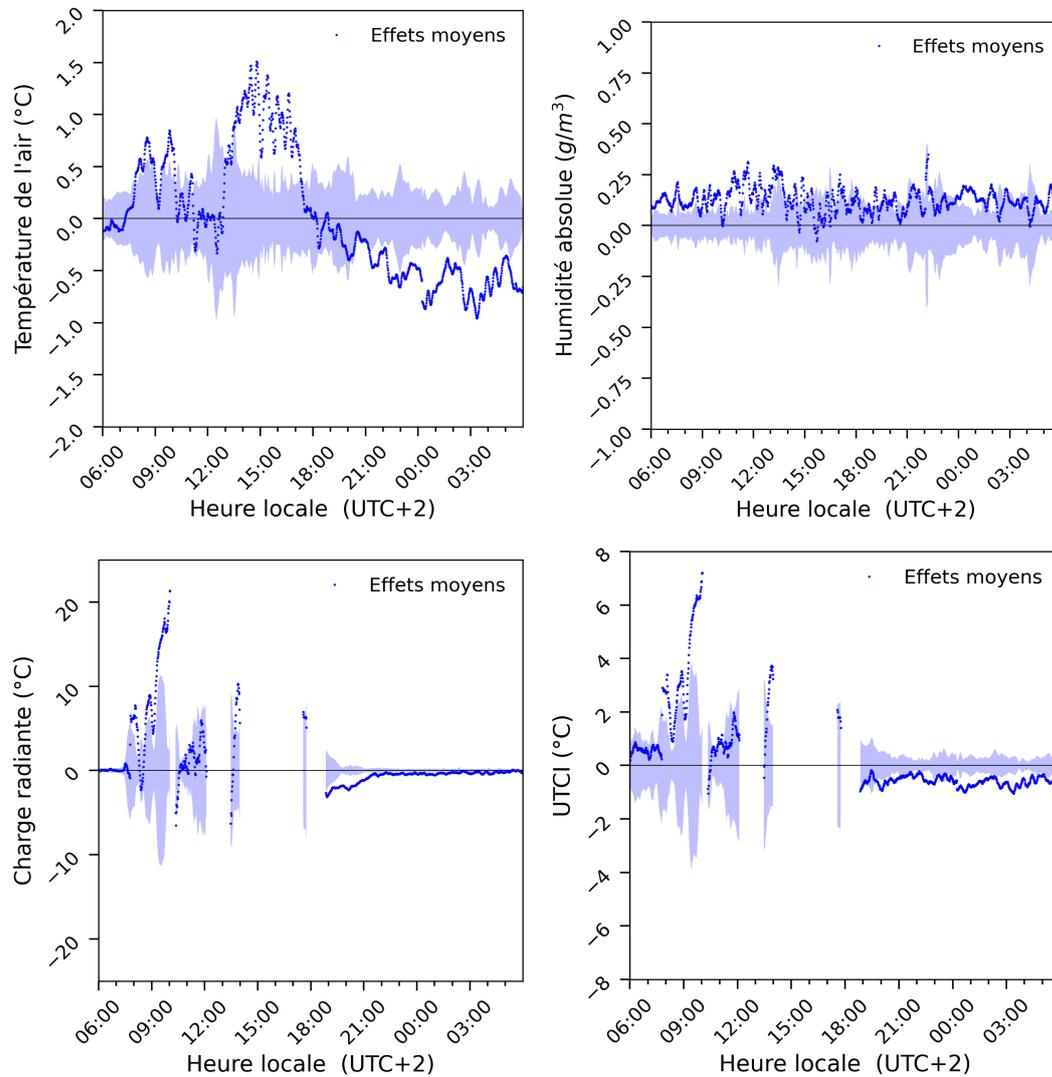


FIG. A.7 – Impact microclimatique des travaux OASIS sur la Température de l'air, l'humidité absolue, la charge radiante, et l'UTCI. Les points bleus représentent les effets moyens, l'enveloppe bleue transparente représente l'intervalle de confiance à 95 % des effets moyens. Les événements en dehors de cet intervalle sont considérés comme statistiquement significatifs.

Site 10 : EM Maryse Hilsz

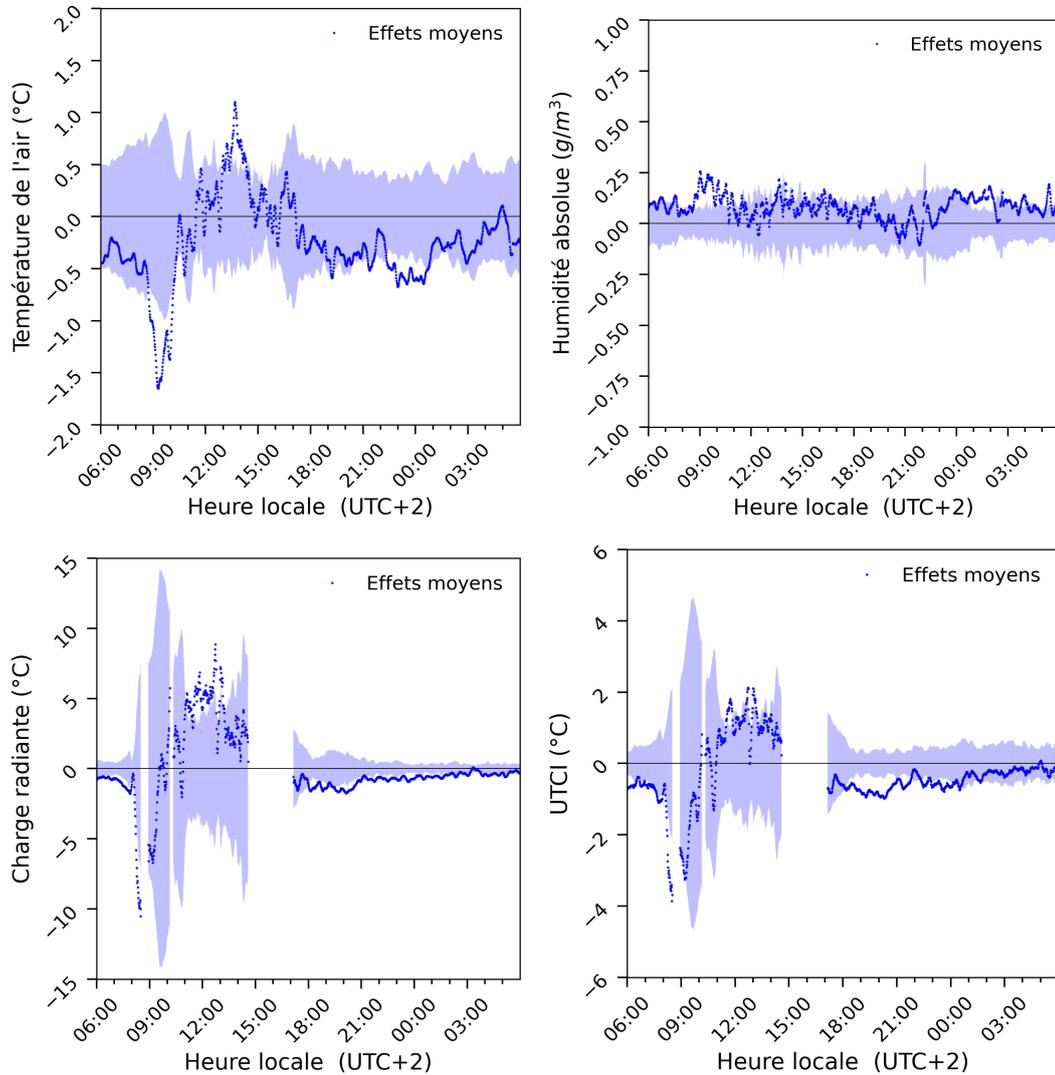


FIG. A.8 – Impact microclimatique des travaux OASIS sur la Température de l'air, l'humidité absolue, la charge radiante, et l'UTCI. Les points bleus représentent les effets moyens, l'enveloppe bleue transparente représente l'intervalle de confiance à 95 % des effets moyens. Les évènements en dehors de cet intervalle sont considérés comme statistiquement significatifs.

Bibliographie

- Abascal, A., Rothwell, N., Shonowo, A., Thomson, D. R., Elias, P., Elsey, H., Yeboah, G., and Kuffer, M. (2022). “Domains of deprivation framework” for mapping slums, informal settlements, and other deprived areas in LMICs to improve urban planning and policy : A scoping review. *Computers, Environment and Urban Systems*, 93 :101770.
- Akbari, H. and Kolokotsa, D. (2016). Three decades of urban heat islands and mitigation technologies research. *Energy Build.*, 133 :834–42.
- Allenvi (2014). Mise en oeuvre de la stratégie scientifique de développement des services climatiques. . *Alliance nationale de recherche pour l'environnement*, note stratégique(3).
- Andreou, E. (2013). Thermal comfort in outdoor spaces and urban canyon microclimate. *Renewable Energy*, 55 :182–188.
- Apte, J. S., Messier, K. P., Gani, S., Brauer, M., Kirchstetter, T. W., Lunden, M. M., Marshall, J. D., Portier, C. J., Vermeulen, R. C., and Hamburg, S. P. (2017). High-Resolution Air Pollution Mapping with Google Street View Cars : Exploiting Big Data. *Environmental Science & Technology*, 51(12) :6999–7008.
- Aram, F., Solgi, E., Higuera García, E., Mosavi, A., and R. Várkonyi-Kóczy, A. (2019). The Cooling Effect of Large-Scale Urban Parks on Surrounding Area Thermal Comfort. *Energies*, 12(20) :3904.
- Arellana, J., Saltaín, M., Larrañaga, A. M., González, V. I., and Henao, C. A. (2020). Developing an urban bikeability index for different types of cyclists as a tool to prioritise bicycle infrastructure investments. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 139 :310–334.
- Armson, D., Stringer, P., and Ennos, A. (2012). The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area. *Urban Forestry & Urban Greening*, 11(3) :245–255.

- ASHRAE (2001). *2001 ASHRAE handbook : fundamentals (SI edition)*, volume 1. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE (2017). Thermal Comfort. In *ASHRAE Handbook – Fundamentals*, chapter 9. ASHRAE Handbook.
- ASTM E1918-16 (2016). Standard Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-Sloped Surfaces in the Field. *ASTM International*, i(Reapproved 2015) :18–20.
- ASTM E903-12 (2004). Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres.
- Bador, M., Terray, L., Boé, J., Somot, S., Alias, A., Gibelin, A.-L., and Dubuisson, B. (2017). Future summer mega-heatwave and record-breaking temperatures in a warmer France climate. *Environmental Research Letters*, 12(7) :074025.
- Baklanov, A., Grimmond, C., Carlson, D., Terblanche, D., Tang, X., Bouchet, V., Lee, B., Langendijk, G., Kolli, R., and Hovsepyan, A. (2018). From urban meteorology, climate and environment research to integrated city services. *Urban Climate*, 23 :330–341.
- Bechtel, B., Alexander, P. J., Beck, C., Böhner, J., Brousse, O., Ching, J., Demuzere, M., Fonte, C., Gál, T., Hidalgo, J., Hoffmann, P., Middel, A., Mills, G., Ren, C., See, L., Sismanidis, P., Verdonck, M.-L., Xu, G., and Xu, Y. (2019). Generating WUDAPT Level 0 data – Current status of production and evaluation. *Urban Climate*, 27 :24–45.
- Bednar-Friedl, B., Biesbroek, R., Schmidt, D., Alexander, P., Børsheim, K., Carnicer, J., Georgopoulou, E., Haasnoot, M., Cozannet, G. L., Lionello, P., Lipka, O., Möllmann, C., Muccione, V., Mustonen, T., Piepenburg, D., and Whitmarsh, L. (2022). Europe. In Pörtner, H. O., Roberts, D. C., Tignor, M., Poloczanska, E. S., Mintenbeck, K., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V., Okem, A., and Rama, B., editors, *Climate Change 2022 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pages 1817–1927. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA.
- Bernard, E. (2021). *Réponse hydro-climatique de Paris et sa petite couronne au climat futur. Impacts de scénarios d ’ aménagement*. PhD thesis, Université Toulouse 3.
- Bernard, E., Munck, C. d., and Lemonsu, A. (2022). Detailed Mapping and Modeling of Urban Vegetation : What Are the Benefits for Microclimatic Simulations with Town Energy Balance (TEB) at Neighborhood Scale? *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 61(9) :1159–1178.

- Bernard, J., Kéravec, P., Morille, B., Bocher, E., Musy, M., and Calmet, I. (2019). Outdoor Air Temperature Measurement : A Semi-Empirical Model to Characterize Shelter Performance. *Climate*, 7(2) :26.
- Bernard, J., Rodler, A., Morille, B., and Zhang, X. (2018). How to Design a Park and Its Surrounding Urban Morphology to Optimize the Spreading of Cool Air? *Climate*, 6(1) :10.
- Bierwagen, B. G., Theobald, D. M., Pyke, C. R., Choate, A., Groth, P., Thomas, J. V., and Morefield, P. (2010). National housing and impervious surface scenarios for integrated climate impact assessments. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(49) :20887–20892.
- Bigot, S., Duché, S., Madelin, M., and Rome, S. (2017). Étude Du Climat Urbain : Pour Une Mise À Disposition De Nouveaux Services Climatiques. *BSGLg*, 68(1) :13–36.
- Błażejczyk, K., Broede, P., Fiala, D., Havenith, G., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., and Kunert, A. (2010). Principles of the New Universal Thermal Climate Index (UTCI) and its Application to Bioclimatic Research in European Scale. *Miscellanea Geographica*, 14(1) :91–102.
- Błażejczyk, K., Epstein, Y., Jendritzky, G., Staiger, H., and Tinz, B. (2012). Comparison of UTCI to selected thermal indices. *International Journal of Biometeorology*, 56(3) :515–535.
- Błażejczyk, K., Jendritzky, G., Bröde, P., Fiala, D., Havenith, G., Epstein, Y., Psikuta, A., and Kampmann, B. (2013). An introduction to the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *CBGiOS. IGiPZ PAN, call nos. : Cz.2085, Cz.2173, Cz.2406*, 86(1) :5–10.
- Botton Hugo (2020). Accès aux espaces verts : des inégalités révélées par la Covid-19. *The conversation*.
- Bouzouidja, R., Cannavo, P., Bodénan, P., Gulyás, , Kiss, M., Kovács, A., Béchet, B., Chancibault, K., Chantoiseau, E., Bournet, P.-E., Bouzidi, R., Guénon, R., Lebeau, T., Musy, M., and Rodriguez, F. (2021a). How to evaluate nature-based solutions performance for microclimate, water and soil management issues – Available tools and methods from Nature4Cities European project results. *Ecological Indicators*, 125 :107556.
- Bouzouidja, R., Leconte, F., Kiss, M., Pierret, M., Pruvot, C., Détriché, S., Louvel, B., Bertout, J., Aketouane, Z., Vogt Wu, T., Goiffon, R., Colin, B., Pétrissans, A., Lagièrre, P., and Pétrissans, M. (2021b). Experimental Comparative Study between Conventional and Green Parking Lots : Analysis of Subsurface Thermal Behavior under Warm and Dry Summer Conditions. *Atmosphere*, 12(8) :994.

- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., and Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities : A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3) :147–155.
- Brasseur, G. P. and Gallardo, L. (2016). Climate services : Lessons learned and future prospects. *Earth's Future*, 4(3) :79–89.
- Bretz, S. E. and Akbari, H. (1997). Long-term performance of high-albedo roof coatings. *Energy and Buildings*, 25(2) :159–167.
- Broadbent, A. M., Coutts, A. M., Tapper, N. J., and Demuzere, M. (2018). The cooling effect of irrigation on urban microclimate during heatwave conditions. *Urban Climate*, 23 :309–329.
- Bröde, P., Fiala, D., Błażejczyk, K., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Tinz, B., and Havenith, G. (2012). Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International Journal of Biometeorology*, 56(3) :481–494.
- Cadot, E. and Spira, A. (2006). Canicule et surmortalité à Paris en août 2003. *Espace populations sociétés*, (2006/2-3) :239–249.
- Canouï-Poitrine, F., Cadot, E., Spira, A., Gremy, I., Lefranc, A., Pépin, P., Isnard, H., and Mandereau-Bruno, L. (2006). Excess deaths during the August 2003 heat wave in Paris, France. *Revue d'Épidémiologie et de Santé Publique*, 54(2) :127–135.
- Cantat, O. (2004). L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. *Norois*, (191) :75–102.
- CAUE de Paris (2019). Ecole Maternelle Tandou.
- Centre National de Recherches Météorologiques (2012). EPICEA : Rapport final du projet. page 31.
- Chanial, M., Karam, G., Parison, S., Hendel, M., and Royon, L. (2022a). Analyse microclimatique d'une bouche de rafraîchissement expérimentale. In *XVème Colloque International Franco Québécois (CIFQ), Ville et transition*, pages 121–126, Paris.
- Chanial, M., Parison, S., Hendel, M., and Royon, L. (2022b). Microclimatic impact of Innovative Pavements for the Life Cool & Low Noise Asphalt Porject. In *Proceedings of the 5th International Conference on Building Energy and Environment*, Montreal.
- Chen, L. and Ng, E. (2012). Outdoor thermal comfort and outdoor activities : A review of research in the past decade. *Cities*, 29(2) :118–125.

- Chen, L., Ng, E., An, X., Ren, C., Lee, M., Wang, U., and He, Z. (2012a). Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong : a GIS-based simulation approach. *International Journal of Climatology*, 32(1) :121–136.
- Chen, L., Zhang, Z., and Ewers, B. E. (2012b). Urban Tree Species Show the Same Hydraulic Response to Vapor Pressure Deficit across Varying Tree Size and Environmental Conditions. *PLoS ONE*, 7(10) :e47882.
- Chen, Q., Yang, X., Ouyang, Z., Zhao, N., Jiang, Q., Ye, T., Qi, J., and Yue, W. (2020). Estimation of anthropogenic heat emissions in China using Cubist with points-of-interest and multisource remote sensing data. *Environmental Pollution*, 266 :115183.
- Ching, J., Mills, G., See, L., Bechtel, B., Feddema, J., Stewart, I., Wang, X., Ng, E., Ren, C., Brousse, O., Martilli, A., Neophytou, M., Milcinski, G., Foley, M., Alexander, P., Hidalgo, J., and Masson, V. (2016). Wudapt (World Urban Database and Access Portal Tools) : an International Collaborative Project for Climate Relevant Physical Geography Data for the World ' S Cities. pages 1–7.
- Chow, W. T., Salamanca, F., Georgescu, M., Mahalov, A., Milne, J. M., and Ruddell, B. L. (2014). A multi-method and multi-scale approach for estimating city-wide anthropogenic heat fluxes. *Atmospheric Environment*, 99 :64–76.
- Churkina, G., Grote, R., Butler, T., and Lawrence, M. (2015). Natural selection ? Picking the right trees for urban greening. *Environmental Science & Policy*, 47 :12–17.
- Cleugh, H. and Grimmond, S. (2012). Urban Climates and Global Climate Change. In *The Future of the World's Climate*, pages 47–76. Elsevier.
- CNRS, Météo-France, Université Paris Est Créteil, Sorbonne Université, Institut polytechnique de Paris, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, INRAE, LigAir, and Airparif (2022). PANAME – Paris region urbaN Atmospheric observations and models for Multidisciplinary rEsearch.
- Coccolo, S., Kämpf, J., Scartezzini, J.-L., and Pearlmutter, D. (2016). Outdoor human comfort and thermal stress : A comprehensive review on models and standards. *Urban Climate*, 18 :33–57.
- Cohen, P., Potchter, O., and Matzarakis, A. (2012). Daily and seasonal climatic conditions of green urban open spaces in the Mediterranean climate and their impact on human comfort. *Building and Environment*, 51 :285–295.

- Commission, E., for Research, D.-G., Innovation, Jacob, D., Runge, T., Street, R., Parry, M., and Scott, J. (2015). *A European research and innovation roadmap for climate services*. Publications Office.
- Cordeau, E., Boucher, J., Carrage, S., Mauclair, C., Medic, M., and Pigato, L. (2015). Classification des îlots morphologiques urbains en zones Climatiques Locales.
- Coutts, A. M., Harris, R. J., Phan, T., Livesley, S. J., Williams, N. S., and Tapper, N. J. (2016a). Thermal infrared remote sensing of urban heat : Hotspots, vegetation, and an assessment of techniques for use in urban planning. *Remote Sensing of Environment*, 186 :637–651.
- Coutts, A. M., White, E. C., Tapper, N. J., Beringer, J., and Livesley, S. J. (2016b). Temperature and human thermal comfort effects of street trees across three contrasting street canyon environments. *Theoretical and Applied Climatology*, 124(1-2) :55–68.
- Crank, P. J., Sailor, D. J., Ban-Weiss, G., and Taleghani, M. (2018). Evaluating the ENVI-met microscale model for suitability in analysis of targeted urban heat mitigation strategies. *Urban Climate*, 26 :188–197.
- de Munck, C., Lemonsu, A., Masson, V., Le Bras, J., and Bonhomme, M. (2018). Evaluating the impacts of greening scenarios on thermal comfort and energy and water consumptions for adapting Paris city to climate change. *Urban Climate*, 23 :260–286.
- de Munck, C., Pigeon, G., Masson, V., Meunier, F., Bousquet, P., Tréméac, B., Merchat, M., Poeuf, P., and Marchadier, C. (2013). How much can air conditioning increase air temperatures for a city like Paris, France? *International Journal of Climatology*, 33(1) :210–227.
- Demuzere, M., Bechtel, B., Middel, A., and Mills, G. (2019). Mapping Europe into local climate zones. *PLOS ONE*, 14(4) :e0214474.
- Demuzere, M., Kittner, J., Martilli, A., Mills, G., Moede, C., Stewart, I. D., van Vliet, J., and Bechtel, B. (2022). A global map of local climate zones to support earth system modelling and urban-scale environmental science. *Earth System Science Data*, 14(8) :3835–3873.
- Dirksen, M., Ronda, R., Theeuwes, N., and Pagani, G. (2019). Sky view factor calculations and its application in urban heat island studies. *Urban Climate*, 30 :100498.
- Dorst, H., van der Jagt, A., Raven, R., and Runhaar, H. (2019). Urban greening through nature-based solutions – Key characteristics of an emerging concept. *Sustainable Cities and Society*, 49 :101620.

- Downes, B. J., Barmuta, L. A., Fairweather, P. G., Faith, D. P., Keough, M. J., Lake, P. S., Mapstone, B. D., and Quinn, G. P. (2002). *Monitoring ecological impacts : concepts and practice in flowing waters*. Cambridge University Press.
- Dumas, G., Masson, V., Hidalgo, J., Edouart, V., Hanna, A., and Poujol, G. (2021). Co-construction of climate services based on a weather stations network : Application in Toulouse agglomeration local authority. *Climate Services*, 24 :100274.
- E6 consulting (2016). Score ICU : un outil simple pour anticiper les ilots de chaleur urbains.
- Elbaz-Poulichet, F., Guédron, S., Anne-Lise, D., Freydier, R., Perrot, V., Rossi, M., Piot, C., Delpoux, S., and Sabatier, P. (2020). A 10,000-year record of trace metal and metalloid (Cu, Hg, Sb, Pb) deposition in a western Alpine lake (Lake Robert, France) : Deciphering local and regional mining contamination. *Quaternary Science Reviews*, 228 :106076.
- Eliasson, I. (2000). The use of climate knowledge in urban planning. *Landscape and Urban Planning*, 48(1-2) :31–44.
- elioth (2021). ICE / ICEtool - Public - Documentation.
- 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(P2) :367–386.
- Erell, E., Pearlmutter, D., and Williamson, T. (2012). *Urban Microclimate*. Routledge.
- Ernst, M., Le Mentec, S., Louvrier, M., Loubet, B., Personne, E., and Stella, P. (2022). Impact of urban greening on microclimate and air quality in the urban canopy layer : Identification of knowledge gaps and challenges. *Frontiers in Environmental Science*, 10 :1604.
- Fanger, P. O. (1972). Thermal Comfort.
- Ferrier Jacques (2020). La ville dense a trahi ses habitants . *Métropolitiques*.
- Ferrini, F., Fini, A., Mori, J., and Gori, A. (2020). Role of Vegetation as a Mitigating Factor in the Urban Context. *Sustainability*, 12(10) :4247.
- 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) :429–441.
- Firozjahi, M. K., Weng, Q., Zhao, C., Kiavarz, M., Lu, L., and Alavipanah, S. K. (2020). Surface anthropogenic heat islands in six megacities : An assessment based on a triple-source surface energy balance model. *Remote Sensing of Environment*, 242 :111751.
- Fleckenstein, C., Dervishi, V., Rahman, M. A., Rötzer, T., Pauleit, S., and Ludwig, F. (2022). Trees in Planters—A Case Study of Time-Related Aspects. *Land*, 11(8) :1289.

- Founda, D. and Santamouris, M. (2017). Synergies between Urban Heat Island and Heat Waves in Athens (Greece), during an extremely hot summer (2012). *Scientific Reports*, 7(1) :10973.
- Gaitani, N., Spanou, A., Saliari, M., Synnefa, A., Vassilakopoulou, K., Papadopoulou, K., Pavlou, K., Santamouris, M., Papaioannou, M., and Lagoudaki, A. (2011). Improving the microclimate in urban areas : a case study in the centre of Athens. *Building Services Engineering Research and Technology*, 32(1) :53–71.
- Gál, C. V. and Kántor, N. (2020). Modeling mean radiant temperature in outdoor spaces, A comparative numerical simulation and validation study. *Urban Climate*, 32(November 2019) :100571.
- Gebert, L., Coutts, A., and Tapper, N. (2019). The influence of urban canyon microclimate and contrasting photoperiod on the physiological response of street trees and the potential benefits of water sensitive urban design. *Urban Forestry & Urban Greening*, 40 :152–164.
- Geng, X., Yu, Z., Zhang, D., Li, C., Yuan, Y., and Wang, X. (2022). The influence of local background climate on the dominant factors and threshold-size of the cooling effect of urban parks. *Science of The Total Environment*, 823 :153806.
- Gill, S., Rahman, M., Handley, J., and Ennos, A. (2013). Modelling water stress to urban amenity grass in Manchester UK under climate change and its potential impacts in reducing urban cooling. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12(3) :350–358.
- Gillner, S., Vogt, J., Tharang, A., Dettmann, S., and Roloff, A. (2015). Role of street trees in mitigating effects of heat and drought at highly sealed urban sites. *Landscape and Urban Planning*, 143 :33–42.
- Givoni, b. (1963). *Estimation of the effect of climate on man : Development of a new thermal index*. PhD thesis, Hebrew University, Jerusalem.
- Gómez-Muñoz, V., Porta-Gándara, M., and Fernández, J. (2010). Effect of tree shades in urban planning in hot-arid climatic regions. *Landscape and Urban Planning*, 94(3-4) :149–157.
- Goret, M. and Lovat, A. (2022). Projet FEDER OASIS - WP7 07.1.2 : Comparaison de l'exposition à la chaleur avant et après travaux. Technical report, Météo France, Paris.
- Gräf, M., Immitzer, M., Hietz, P., and Stangl, R. (2021). Water-Stressed Plants Do Not Cool : Leaf Surface Temperature of Living Wall Plants under Drought Stress. *Sustainability*, 13(7) :3910.

- Grimmond, C. S. B., Ward, H. C., and Kotthaus, S. (2016). How is urbanization altering local and regional climate? *The Routledge Handbook of Urbanization and Global Environmental Change*, (October) :1–10.
- Grimmond, S., Bouchet, V., Molina, L. T., Baklanov, A., Tan, J., Schlünzen, K. H., Mills, G., Golding, B., Masson, V., Ren, C., Voogt, J., Miao, S., Lean, H., Heusinkveld, B., Hovespyan, A., Teruggi, G., Parrish, P., and Joe, P. (2020). Integrated urban hydrometeorological, climate and environmental services : Concept, methodology and key messages. *Urban Climate*, 33(January) :100623.
- Guerreiro, S. B., Dawson, R. J., Kilsby, C., Lewis, E., and Ford, A. (2018). Future heat-waves, droughts and floods in 571 European cities. *Environmental Research Letters*, 13(3) :034009.
- Guo, H., Aviv, D., Loyola, M., Teitelbaum, E., Houchois, N., and Meggers, F. (2020). On the understanding of the mean radiant temperature within both the indoor and outdoor environment, a critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117(December 2018) :109207.
- Guo, L. and Lu, Q. (2017). Potentials of piezoelectric and thermoelectric technologies for harvesting energy from pavements. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72 :761–773.
- Haaland, C. and van den Bosch, C. K. (2015). Challenges and strategies for urban green-space planning in cities undergoing densification : A review. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14(4) :760–771.
- Hüb, K., Ruddell, B. L., and Middel, A. (2015). Sensor lag correction for mobile urban microclimate measurements. *Urban Climate*, 14 :622–635.
- Hart, M. A. and Sailor, D. J. (2009). Quantifying the influence of land-use and surface characteristics on spatial variability in the urban heat island. *Theoretical and Applied Climatology*, 95(3-4) :397–406.
- Havenith, G. (1999). Heat balance when wearing protective clothing. *The Annals of Occupational Hygiene*, 43(5) :289–296.
- Havenith, G. and Fiala, D. (2015). Thermal Indices and Thermophysiological Modeling for Heat Stress. In *Comprehensive Physiology*, volume 6, pages 255–302. Wiley.
- Havenith, G., Fiala, D., Błazejczyk, K., Richards, M., Bröde, P., Holmér, I., Rintamaki, H., Benschabat, Y., and Jendritzky, G. (2012). The UTCI-clothing model. *International Journal of Biometeorology*, 56(3) :461–470.

- Hebbert, M. (2014). Climatology for city planning in historical perspective. *Urban Climate*, 10(P2) :204–215.
- Heckert, M. and Bristowe, A. (2021). Parks and the Pandemic : A Scoping Review of Research on Green Infrastructure Use and Health Outcomes during COVID-19. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(24) :13096.
- Heisler, G. M. (1986). Effects of individual trees on the solar radiation climate of small buildings. *Urban Ecology*, 9(3-4) :337–359.
- Hémon, D. and Jouglu, E. (2003). Estimation de la surmortalité et principales caractéristiques épidémiologiques . Surmortalité liée à la canicule d ’ août 2003 : rapport d ’ étape. Technical report, Institut national de la santé et de la recherche médicale(INSERM).
- Hendel, M. (2016). *Pavement-Watering in Cities for Urban Heat Island Mitigation and Climate Change Adaptation*. PhD thesis, Université Paris Diderot Sorbonne Paris Cité, Paris.
- Hendel, M. (2020). Cool Pavements. In Pacheco-Torgal, F., Amirkhanian, S., Wang, H., and Schlangen, E., editors, *Eco-efficient Pavement Construction Materials*, pages 96–125. Woodhead Publishing, 1st edition.
- Hendel, M., Bobée, C., Karam, G., Parison, S., Berthe, A., and Bordin, P. (2020). Developing a GIS tool for emergency urban cooling in case of heat-waves. *Urban Climate*, 33 :100646.
- Hendel, M., Gutierrez, P., Colombert, M., Diab, Y., and Royon, L. (2016). Measuring the effects of urban heat island mitigation techniques in the field : Application to the case of pavement-watering in Paris. *Urban Climate*, 16 :43–58.
- Hendel, M., Parison, S., Grados, A., and Royon, L. (2018). Which pavement structures are best suited to limiting the UHI effect? A laboratory-scale study of Parisian pavement structures. *Building and Environment*, 144 :216–229.
- Hidalgo, J., Lemonsu, A., and Masson, V. (2019). Between progress and obstacles in urban climate interdisciplinary studies and knowledge transfer to society. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1436(1) :5–18.
- Ho, H. C., Knudby, A., Chi, G., Aminipouri, M., and Lai, D. Y.-F. (2018). Spatiotemporal analysis of regional socio-economic vulnerability change associated with heat risks in Canada. *Applied Geography*, 95(June 2017) :61–70.
- Höppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43(2) :71–75.

- Höppe, P. (2002). Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. *Energy and Buildings*, 34(6) :661–665.
- Höppe, P. R. (1993). Heat balance modelling. *Experientia*, 49(9) :741–746.
- Howard, L. (1820). *A companion to the thermometer, for the climate of London*. Darton & Company.
- Howard, L. (1833). *The climate of London : deduced from meteorological observations made in the metropolis and at various places around it*, volume 3. Harvey and Darton, London.
- Huang, J., Kong, F., Yin, H., Middel, A., Liu, H., Zheng, X., Wen, Z., and Wang, D. (2022). Transpirational cooling and physiological responses of trees to heat. *Agricultural and Forest Meteorology*, 320 :108940.
- Hurlbert, S. H. (1984). Pseudoreplication and the Design of Ecological Field Experiments. *Ecological Monographs*, 54(2) :187–211.
- ISO 7726 (2001). *Ergonomics of the thermal environment — Instruments for measuring physical quantities*. Number 1.
- ISO 7730 (2005). *Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*.
- Jacob, D., Teichmann, C., Sobolowski, S., Katragkou, E., Anders, I., Belda, M., Benestad, R., Boberg, F., Buonomo, E., Cardoso, R. M., Casanueva, A., Christensen, O. B., Christensen, J. H., Coppola, E., De Cruz, L., Davin, E. L., Dobler, A., Domínguez, M., Fealy, R., Fernandez, J., Gaertner, M. A., García-Díez, M., Giorgi, F., Gobiet, A., Goergen, K., Gómez-Navarro, J. J., Alemán, J. J. G., Gutiérrez, C., Gutiérrez, J. M., Güttler, I., Haensler, A., Halenka, T., Jerez, S., Jiménez-Guerrero, P., Jones, R. G., Keuler, K., Kjellström, E., Knist, S., Kotlarski, S., Maraun, D., van Meijgaard, E., Mercogliano, P., Montávez, J. P., Navarra, A., Nikulin, G., de Noblet-Ducoudré, N., Panitz, H.-J., Pfeifer, S., Piazza, M., Pichelli, E., Pietikäinen, J.-P., Prein, A. F., Preuschmann, S., Rechid, D., Rockel, B., Romera, R., Sánchez, E., Sieck, K., Soares, P. M. M., Somot, S., Srnec, L., Sørland, S. L., Termonia, P., Truhetz, H., Vautard, R., Warrach-Sagi, K., and Wulfmeyer, V. (2020). Regional climate downscaling over Europe : perspectives from the EURO-CORDEX community. *Regional Environmental Change*, 20(2) :51.
- Jin, L., Schubert, S., Hefny Salim, M., and Schneider, C. (2020). Impact of Air Conditioning Systems on the Outdoor Thermal Environment during Summer in Berlin, Germany. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(13) :4645.

- Johansson, E., Thorsson, S., Emmanuel, R., and Krüger, E. (2014). Instruments and methods in outdoor thermal comfort studies – The need for standardization. *Urban Climate*, 10(P2) :346–366.
- Johnson, G. T. and Watson, I. D. (1984). The Determination of View-Factors in Urban Canyons. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(2) :329–335.
- Jürges, W. (1924). The heat transfer at a flat wall (Der Wärmeübergang an einer ebenen Wand), Beihefte zum Gesundh. *Beihefte zum Gesundheits-Ingenieur*, 19 :1227–1249.
- Kaloustian, N., Aouad, D., Battista, G., and Zinzi, M. (2018). Leftover Spaces for the Mitigation of Urban Overheating in Municipal Beirut. *Climate*, 6(3) :68.
- Kántor, N., Chen, L., and Gál, C. V. (2018). Human-biometeorological significance of shading in urban public spaces—Summertime measurements in Pécs, Hungary. *Landscape and Urban Planning*, 170 :241–255.
- 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) :90–100.
- Kántor, N., Unger, J., and Gulyás, A. (2012). Subjective estimations of thermal environment in recreational urban spaces—Part 2 : international comparison. *International Journal of Biometeorology*, 56(6) :1089–1101.
- Karam, G., Chaniel, M., Hendel, M., Royon, L., and Parison, S. (2022). Spatial Microclimatic Characterization of an OASIS Schoolyard. In Liangzhu Leon Wang, Hua Ge, Zhiqiang John Zhai, Dahai Qi, Mohamed Ouf, Chanjuan Sun, and Dengjia Wang, editors, *Proceedings of the 5th International Conference on Building Energy and Environment*, Montreal.
- Karam, G., Hendel, M., Bobée, C., Berthe, A., Bordin, P., and Royon, L. (2019). The OASIS Project : UHI mitigation strategies applied to Parisian schoolyards. In Akbari, H., Garg, V., Jyotirmay, M., and Vaibhav, R. K., editors, *5th International Conference on Countermeasures to Urban Heat Island*, pages 303–311, Hyderabad.
- Kjelgren, R. and Montague, T. (1998). Urban tree transpiration over turf and asphalt surfaces. *Atmospheric Environment*, 32(1) :35–41.
- Kłysik, K. and Fortuniak, K. (1999). Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Łódź, Poland. *Atmospheric Environment*, 33(24-25) :3885–3895.

- Konarska, J., Lindberg, F., Larsson, A., Thorsson, S., and Holmer, B. (2014). Transmissivity of solar radiation through crowns of single urban trees—application for outdoor thermal comfort modelling. *Theoretical and Applied Climatology*, 117(3-4) :363–376.
- Konarska, J., Uddling, J., Holmer, B., Lutz, M., Lindberg, F., Pleijel, H., and Thorsson, S. (2016). Transpiration of urban trees and its cooling effect in a high latitude city. *International Journal of Biometeorology*, 60(1) :159–172.
- Kousis, I., Manni, M., and Pisello, A. (2022). Environmental mobile monitoring of urban microclimates : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 169 :112847.
- Kousis, I., Pigliautile, I., and Pisello, A. L. (2021). Intra-urban microclimate investigation in urban heat island through a novel mobile monitoring system. *Scientific Reports*, 11(1).
- Kratzer, A. (1956). *Das stadtklima*, volume 90. F. Vieweg.
- Krayenhoff, E. S., Broadbent, A. M., Zhao, L., Georgescu, M., Middel, A., Voogt, J. A., Martilli, A., Sailor, D. J., and Erell, E. (2021). Cooling hot cities : a systematic and critical review of the numerical modelling literature. *Environmental Research Letters*, 16(5) :053007.
- Krstic, N., Yuchi, W., Ho, H. C., Walker, B. B., Knudby, A. J., and Henderson, S. B. (2017). The Heat Exposure Integrated Deprivation Index (HEIDI) : A data-driven approach to quantifying neighborhood risk during extreme hot weather. *Environment International*, 109(July) :42–52.
- Kubo, K., Kido, H., and Ito, M. (2006). Study on Pavement Technologies to Mitigate the Heat Island effect and Their Effectiveness.
- Kyriakodis, G.-E. and Santamouris, M. (2018). Using reflective pavements to mitigate urban heat island in warm climates - Results from a large scale urban mitigation project. *Urban Climate*, 24 :326–339.
- Labib, S., Lindley, S., and Huck, J. J. (2020). Spatial dimensions of the influence of urban green-blue spaces on human health : A systematic review. *Environmental Research*, 180 :108869.
- Lacombes, M., Bousri, D., Leroy, M., and Mezred, M. (2011). WMO Field Intercomparison of Thermometer Screens/Shields and Humidity Measuring Instruments. Technical report, World Meteorological Organization.
- Landsberg, H. (1981). The Urban Climate, Volume 28 - 1st Edition. *The Urban Climate*, page 275.

- Langenheim, N., White, M., Tapper, N., Livesley, S. J., and Ramirez-Lovering, D. (2020). Right tree, right place, right time : A visual-functional design approach to select and place trees for optimal shade benefit to commuting pedestrians. *Sustainable Cities and Society*, 52 :101816.
- Le Mentec, S., Stella, P., Najjar, G., Kastendeuch, P., Saudreau, M., Ngao, J., Améglio, T., Colin, J., Flick, D., and Personne, E. (2022). Coupling the TEB and Surfatm Models for Heat Flux Modelling in Urban Area : Comparison With Flux Measurements in Strasbourg (France). *Frontiers in Environmental Science*, 10 :205.
- Leconte, F., Bouyer, J., Claverie, R., and Pétrissans, M. (2015a). Estimation of spatial air temperature distribution at sub-mesoclimatic scale using the LCZ scheme and mobile measurements. *9th International Conference on Urban Climate & 12th Symposium on Urban Environment*, (July) :1–12.
- Leconte, F., Bouyer, J., Claverie, R., and Pétrissans, M. (2015b). Using Local Climate Zone scheme for UHI assessment : Evaluation of the method using mobile measurements. *Building and Environment*, 83 :39–49.
- Lefebvre, F., De Ridder, K., Jupova, K., Köberl, J., Lauwaet, D., Passani, A., Remund, J., Willems, P., and Witpas, K. (2022). Climate-Fit.City : Urban Climate Data and Services. In *Springer Climate*, pages 105–113. Springer Science and Business Media B.V.
- Lemonsu, A., Masson, V., Shashua-Bar, L., Erell, E., and Pearlmutter, D. (2012). Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modelling urban green areas. *Geoscientific Model Development*, 5(6) :1377–1393.
- Leroy, M., Marie, H., Lapray, K., Musy, M., Rodler, A., and Guernouti, S. (2021). *Rafraîchir les villes, des solutions variées. Ils l’ont fait.* ADEME, Angers.
- Leroyer, S. (2006). *Simulations numériques de l’atmosphère urbaine avec le modèle SUBMESO : Application à la campagne CLU-ESCOMPTE sur l’agglomération de Marseille.* PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes.
- Leuzinger, S., Vogt, R., and Körner, C. (2010). Tree surface temperature in an urban environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(1) :56–62.
- Levinger, P., Cerin, E., Milner, C., and Hill, K. D. (2022). Older people and nature : the benefits of outdoors, parks and nature in light of COVID-19 and beyond– where to from here? *International Journal of Environmental Health Research*, 32(6) :1329–1336.
- Li, C., Wang, Z., Li, B., Peng, Z.-R., and Fu, Q. (2019). Investigating the relationship between air pollution variation and urban form. *Building and Environment*, 147 :559–568.

- LIEPP (2022a). projet FEDER OASIS - WP7 07.3.1 Rapport Evaluation de la sensibilisation au changement climatique . Technical report, SciencesPo, Paris.
- LIEPP (2022b). Projet FEDER OASIS - WP7 07.3.1 Rapport sur l'évolution des usages des cours. Technical report, SciencesPo, Paris.
- LIEPP (2022c). Projet FEDER OASIS - WP7 07.4.1 Rapport d'évaluation de l'approche participative des élèves et de la communauté éducative au projet Oasis. Technical report, SciencesPo, Paris.
- LIEPP (2022d). Projet FEDER OASIS - WP7 07.4.1 Rapport sur l'approche participative pour l'ouverture des cours Oasis. Technical report, SciencesPo, Paris.
- Lin, B.-S. and Lin, Y.-J. (2010). Cooling Effect of Shade Trees with Different Characteristics in a Subtropical Urban Park. *HortScience*, 45(1) :83–86.
- Lin, T.-P. and Matzarakis, A. (2008). Tourism climate and thermal comfort in Sun Moon Lake, Taiwan. *International Journal of Biometeorology*, 52(4) :281–290.
- Lindberg, F., Grimmond, C., Gabey, A., Huang, B., Kent, C. W., Sun, T., Theeuwes, N. E., Järvi, L., Ward, H. C., Capel-Timms, I., Chang, Y., Jonsson, P., Krave, N., Liu, D., Meyer, D., Olofson, K. F. G., Tan, J., Wästberg, D., Xue, L., and Zhang, Z. (2018). Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP) : An integrated tool for city-based climate services. *Environmental Modelling & Software*, 99 :70–87.
- Lindberg, F. and Grimmond, C. S. B. (2011a). Nature of vegetation and building morphology characteristics across a city : Influence on shadow patterns and mean radiant temperatures in London. *Urban Ecosystems*, 14(4) :617–634.
- Lindberg, F. and Grimmond, C. S. B. (2011b). The influence of vegetation and building morphology on shadow patterns and mean radiant temperatures in urban areas : model development and evaluation. *Theoretical and Applied Climatology*, 105(3-4) :311–323.
- 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) :697–713.
- Lindberg, F., Onomura, S., and Grimmond, C. S. B. (2016). Influence of ground surface characteristics on the mean radiant temperature in urban areas. *International Journal of Biometeorology*, 60(9) :1439–1452.
- Lopez-Cabeza, V. P., Alzate-Gaviria, S., Diz-Mellado, E., Rivera-Gomez, C., and Galan-Marin, C. (2022). Albedo influence on the microclimate and thermal comfort of courtyards

- under Mediterranean hot summer climate conditions. *Sustainable Cities and Society*, 81 :103872.
- Lowry, W. P. (1977). Empirical Estimation of Urban Effects on Climate : A Problem Analysis. *Journal of Applied Meteorology*, 16(2) :129–135.
- Lwasa, S., K.C. Seto, X. Bai, H. Blanco, K.R. Gurney, Ş. Kılıkış, O. Lucon, J. Murakami, J. Pan, A. Sharifi, and Y. Yamagata (2022). Urban systems and other settlements. In Shukla, P., Skea, J., Slade, R., Al Khouradje, A., van Diemen, R., McCollum, D., Pathak, M., Some, S., Vyas, P., Fradera, R., Belkacemi, M., Hasija, A., Lisboa, G., Luz, S., and malley, J., editors, *IPCC, 2022 : Climate Change 2022 : Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, chapter 8. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Macintyre, H., Heaviside, C., Taylor, J., Picetti, R., Symonds, P., Cai, X.-M., and Vardoulakis, S. (2018). Assessing urban population vulnerability and environmental risks across an urban area during heatwaves – Implications for health protection. *Science of The Total Environment*, 610-611 :678–690.
- Madelin, M. and Dupuis, V. (2020). Intensité et spatialisation de l’îlot de chaleur urbain parisien à partir de données participatives. *Climatologie*, 17 :9.
- Manley, G. (1958). On the frequency of snowfall in metropolitan England. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 84(359) :70–72.
- Manoli, G., Fatichi, S., Schläpfer, M., Yu, K., Crowther, T. W., Meili, N., Burlando, P., Katul, G. G., and Bou-Zeid, E. (2019). Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population. *Nature*, 573(7772) :55–60.
- Marando, F., Heris, M. P., Zulian, G., Udías, A., Mentaschi, L., Chrysoulakis, N., Parastatidis, D., and Maes, J. (2022). Urban heat island mitigation by green infrastructure in European Functional Urban Areas. *Sustainable Cities and Society*, 77 :103564.
- Martilli, A., Krayenhoff, E. S., and Nazarian, N. (2020). Is the Urban Heat Island intensity relevant for heat mitigation studies? *Urban Climate*, 31 :100541.
- Masson, V. (2000). A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models. *Boundary-Layer Meteorology*, 94(3) :357–397.
- Masson, V., Gomes, L., Pigeon, G., Lioussé, C., Pont, V., Lagouarde, J.-P., Voogt, J., Salmond, J., Oke, T. R., Hidalgo, J., Legain, D., Garrouste, O., Lac, C., Connan, O., Briottet, X.,

- Lachérade, S., and Tulet, P. (2008). The Canopy and Aerosol Particles Interactions in Toulouse Urban Layer (CAPITOUL) experiment. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 102(3-4) :135–157.
- Masson, V., Heldens, W., Bocher, E., Bonhomme, M., Bucher, B., Burmeister, C., de Munck, C., Esch, T., Hidalgo, J., Kanani-Sühring, F., Kwok, Y.-T., Lemonsu, A., Lévy, J.-P., Maronga, B., Pavlik, D., Petit, G., See, L., Schoetter, R., Tornay, N., Votsis, A., and Zeidler, J. (2020). City-descriptive input data for urban climate models : Model requirements, data sources and challenges. *Urban Climate*, 31 :100536.
- Masterton, J. M. and Richardson, F. (1979). *Humidex : a method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity*. Environment Canada, Atmospheric Environment.
- Matzarakis, A. and Rutz, F. (2007). Rayman : A tool for tourism and applied climatology. *3rd International Workshop on Climate, Tourism and Recreat*, (January 2007) :129–138.
- Matzarakis, A., Rutz, F., and Mayer, H. (2007). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments—application of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology*, 51(4) :323–334.
- Mauree, D., Naboni, E., Coccolo, S., Perera, A., Nik, V. M., and Scartezzini, J.-L. (2019). A review of assessment methods for the urban environment and its energy sustainability to guarantee climate adaptation of future cities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112 :733–746.
- Mayer, H. and Hoppe, P. (1987). Thermal comfort of man in different urban environments. *Theoretical and Applied Climatology*, 38(1) :43–49.
- Mballo, S., Herpin, S., Manteau, M., Demotes-Mainard, S., and Bournet, P. (2021). Impact of well-watered trees on the microclimate inside a canyon street scale model in outdoor environment. *Urban Climate*, 37 :100844.
- McDonald, T. L., Erickson, W. P., and McDonald, L. L. (2000). Analysis of Count Data from Before-after Control-Impact Studies. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*, 5(3) :262.
- McMichael, A. J. and Lindgren, E. (2011). Climate change : present and future risks to health, and necessary responses. *Journal of Internal Medicine*, 270(5) :401–413.
- Mei, S.-J. and Yuan, C. (2021). Analytical and numerical study on transient urban street air warming induced by anthropogenic heat emission. *Energy and Buildings*, 231 :110613.

- Météo-France and Cstb (2012). EPICEA - Rapport de synthèse. Technical report.
- Michau, Y., Lemonsu, A., Lucas-Picher, P., and Caillaud, C. (2023). Evaluation of the Urban Heat Island of 12 cities of France in a high-resolution regional climate model simulation. *Urban Climate*, 47 :101386.
- Middel, A., Alkhaled, S., Schneider, F. A., Hagen, B., and Coseo, P. (2021). 50 Grades of Shade. *Bulletin of the American Meteorological Society*, -1(aop) :1–35.
- Middel, A. and Krayenhoff, E. S. (2019). Micrometeorological determinants of pedestrian thermal exposure during record-breaking heat in Tempe, Arizona : Introducing the MaRTy observational platform. *Science of The Total Environment*, 687 :137–151.
- Middel, A., Nazarian, N., Demuzere, M., and Bechtel, B. (2022). Urban Climate Informatics : An Emerging Research Field. *Frontiers in Environmental Science*, 10 :532.
- Mills, G. (2014). Urban climatology : History, status and prospects. *Urban Climate*, 10(P3) :479–489.
- Mohajerani, A., Bakaric, J., and Jeffrey-Bailey, T. (2017). The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *Journal of Environmental Management*, 197 :522–538.
- Mohegh, A., Levinson, R., Taha, H., Gilbert, H., Zhang, J., Li, Y., Tang, T., and Ban-Weiss, G. (2018). Observational Evidence of Neighborhood Scale Reductions in Air Temperature Associated with Increases in Roof Albedo. *Climate*, 6(4) :98.
- Mora, R. and Bean, R. (2018). Thermal Comfort : Designing for People. *Ashrae Journal*, page 28.
- Morabito, M., Crisci, A., Gioli, B., Gualtieri, G., Toscano, P., Di Stefano, V., Orlandini, S., and Gensini, G. F. (2015). Urban-Hazard Risk Analysis : Mapping of Heat-Related Risks in the Elderly in Major Italian Cities. *PLOS ONE*, 10(5) :e0127277.
- Morakinyo, T. E., Ouyang, W., Lau, K. K.-L., Ren, C., and Ng, E. (2020). Right tree, right place (urban canyon) : Tree species selection approach for optimum urban heat mitigation - development and evaluation. *Science of The Total Environment*, 719 :137461.
- Morille, B. and Musy, M. (2017). Comparison of the Impact of Three Climate Adaptation Strategies on Summer Thermal Comfort – Cases Study in Lyon, France. *Procedia Environmental Sciences*, 38 :619–626.
- Morini, E., Touchaei, A. G., Rossi, F., Cotana, F., and Akbari, H. (2018). Evaluation of albedo

- enhancement to mitigate impacts of urban heat island in Rome (Italy) using WRF meteorological model. *Urban Climate*, 24 :551–566.
- Muller, C. L., Chapman, L., Grimmond, C. S. B., Young, D. T., and Cai, X. (2013). Sensors and the city : a review of urban meteorological networks. *International Journal of Climatology*, 33(7) :1585–1600.
- Musy, M., Malys, L., Morille, B., Szucs, A., Inard, C., Bozonnet, E., Djedjig, R., Belarbi, R., Lemonsu, A., and De Munck, C. (2014). Impact of vegetation on urban climate, thermal comfort and building energy consumption – Overview of VegDUD project results. In *Third International Conference on Countermeasures to Urban Heat*, Venice.
- Musy, M., Rodriguez, F., Gutleben, C., Rosant, J. M., Mestayer, P., Inard, C., Long, N., Musy, M., Rodriguez, F., Gutleben, C., Rosant, J. M., and Mestayer, P. (2012). VegDUD project : Role of vegetation in sustainable urban development. In *ICUC : 8th International Conference on Urban Climates*, Dublin.
- Nazarian, N., Fan, J., Sin, T., Norford, L., and Kleissl, J. (2017). Predicting outdoor thermal comfort in urban environments : A 3D numerical model for standard effective temperature. *Urban Climate*, 20 :251–267.
- Nazarian, N., Krayenhoff, E. S., Bechtel, B., Hondula, D. M., Paolini, R., Vanos, J., Cheung, T., Chow, W. T. L., de Dear, R., Jay, O., Lee, J. K. W., Martilli, A., Middel, A., Norford, L. K., Sadeghi, M., Schiavon, S., and Santamouris, M. (2022). Integrated Assessment of Urban Overheating Impacts on Human Life. *Earth's Future*, 10(8).
- Nazarian, N. and Lee, J. K. (2021). Personal assessment of urban heat exposure : a systematic review. *Environmental Research Letters*, 16(3) :033005.
- Nemirovsky, E. M., Welker, A. L., and Lee, R. (2013). Quantifying Evaporation from Pervious Concrete Systems : Methodology and Hydrologic Perspective. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(4) :271–277.
- Nice, K. A., Nazarian, N., Lipson, M. J., Hart, M. A., Seneviratne, S., Thompson, J., Naserikia, M., Godic, B., and Stevenson, M. (2022). Isolating the impacts of urban form and fabric from geography on urban heat and human thermal comfort. *Building and Environment*, 224(September) :109502.
- Nichols, W. E. and Cuenca, R. H. (1993). Evaluation of the evaporative fraction for parameterization of the surface energy balance. *Water Resources Research*, 29(11) :3681–3690.
- Nikolopoulou, M. and Lykoudis, S. (2006). Thermal comfort in outdoor urban spaces :

- Analysis across different European countries. *Building and Environment*, 41(11) :1455–1470.
- Norton, B. A., Coutts, A. M., Livesley, S. J., Harris, R. J., Hunter, A. M., and Williams, N. S. (2015). Planning for cooler cities : A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 134 :127–138.
- OCDE and European Commission (2020). *Cities in the World*. OECD Urban Studies. OECD.
- Oke, T. (1988). Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*, 11(1-3) :103–113.
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455) :1–24.
- Oke, T. R. (1997). Urban Environments. In Bailey, W. G., Oke, T., and Rouse, W., editors, *The surface Climates of Canada*, chapter CHAPTER TH, pages 303–327. McGill–Queen’s University Press.
- Oke, T. R. (2002). *Boundary Layer Climates*. Routledge, Cambridge.
- Oke, T. R. and Cleugh, H. A. (1987). Urban heat storage derived as energy balance residuals. *Boundary-Layer Meteorology*, 39(3) :233–245.
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., and Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates*. Cambridge University Press.
- Osczevski, R. and Bluestein, M. (2005). The new wind chill equivalent temperature chart. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(10) :1453–1458.
- Parison, S. (2020). *Urban Materials and Evaporative Cooling for Heat Mitigation in Cities : Adapting Pavement-Watering to Different Parisian Pavements*. PhD thesis, Université Paris Cité, Paris.
- Parison, S., Chaniel, M., Filaine, F., and Hendel, M. (2022). Surface heat budget of sixteen pavement samples on an experimental test site in the Parisian region. In *9th Symposium on Pavement Surface Characteristics*, Milan.
- Parison, S., Hendel, M., Grados, A., and Royon, L. (2020a). Analysis of the heat budget of standard, cool and watered pavements under lab heat-wave conditions. *Energy and Buildings*, 228 :110455.
- Parison, S., Hendel, M., and Royon, L. (2020b). A statistical method for quantifying the field effects of urban heat island mitigation techniques. *Urban Climate*, 33(April 2019) :100651.

- Park, C., Ha, J., and Lee, S. (2017). Association between Three-Dimensional Built Environment and Urban Air Temperature : Seasonal and Temporal Differences. *Sustainability*, 9(8) :1338.
- Pasquill, F. (1961). The estimation of the dispersion of windborne material. *The Meteorological Magazine*, 90(1063) :33–49.
- Paulina, W., Poh-Chin, L., and Melissa, H. (2015). Temporal Statistical Analysis of Urban Heat Islands at the Microclimate Level. *Procedia Environmental Sciences*, 26 :91–94.
- Pearlmutter, D., Jiao, D., and Garb, Y. (2014). The relationship between bioclimatic thermal stress and subjective thermal sensation in pedestrian spaces. *International Journal of Biometeorology*, 58(10) :2111–2127.
- Perkins-Kirkpatrick, S. E. and Lewis, S. C. (2020). Increasing trends in regional heatwaves. *Nature Communications*, 11(1) :3357.
- Petralli, M., Massetti, L., and Orlandini, S. (2009). Solar radiation exposure of shielded air temperature sensors and measurement error evaluation in an urban environment : a preliminary study in Florence, Italy. *Advances in Science and Research*, 3(1) :9–12.
- Pigeon, G., LEMONSU, A., MASSON, V., and HIDALGO, J. (2008). De l'observation du microclimat urbain à la modélisation intégrée de la ville. *La Météorologie*, 8(62) :39.
- Pigliautile, I. and Pisello, A. (2020). Environmental data clustering analysis through wearable sensing techniques : New bottom-up process aimed to identify intra-urban granular morphologies from pedestrian transects. *Building and Environment*, 171 :106641.
- Pigliautile, I. and Pisello, A. L. (2018). A new wearable monitoring system for investigating pedestrians' environmental conditions : Development of the experimental tool and start-up findings. *Science of The Total Environment*, 630 :690–706.
- Pinson, L., Ruas, A., Masson, V., and Chancibault, K. (2016). Acteurs et mesures préventives à différentes échelles territoriales pour la création d'indices de dangerosité sur le risque caniculaire : Du plan national canicule à un indice de dangerosité à échelle fine. page 7p.
- Pioppi, B., Pigliautile, I., and Pisello, A. L. (2020). Data collected by coupling fix and wearable sensors for addressing urban microclimate variability in an historical Italian city. *Data in Brief*, 29 :105322.
- Pitarma, R. and Crisóstomo, J. (2019). An Approach Method to Evaluate Wood Emissivity. *Journal of Engineering*, 2019 :1–9.

- Potchter, O., Cohen, P., Lin, T.-P., and Matzarakis, A. (2018). Outdoor human thermal perception in various climates : A comprehensive review of approaches, methods and quantification. *Science of The Total Environment*, 631-632 :390–406.
- Qi, Q., Meng, Q., Wang, J., and Ren, P. (2021). Developing an optimized method for the ‘stop-and-go’ strategy in mobile measurements for characterizing outdoor thermal environments. *Sustainable Cities and Society*, 69 :102837.
- Qian, Y., Chakraborty, T. C., Li, J., Li, D., He, C., Sarangi, C., Chen, F., Yang, X., and Leung, L. R. (2022). Urbanization Impact on Regional Climate and Extreme Weather : Current Understanding, Uncertainties, and Future Research Directions. *Advances in Atmospheric Sciences*, 39(6) :819–860.
- Qin, Y. (2015). A review on the development of cool pavements to mitigate urban heat island effect. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52 :445–459.
- Qin, Y., He, Y., Hiller, J. E., and Mei, G. (2018). A new water-retaining paver block for reducing runoff and cooling pavement. *Journal of Cleaner Production*, 199 :948–956.
- Quah, A. K. and Roth, M. (2012). Diurnal and weekly variation of anthropogenic heat emissions in a tropical city, Singapore. *Atmospheric Environment*, 46 :92–103.
- Rahman, M. A., Dervishi, V., Moser-Reischl, A., Ludwig, F., Pretzsch, H., Rötzer, T., and Pauleit, S. (2021). Comparative analysis of shade and underlying surfaces on cooling effect. *Urban Forestry & Urban Greening*, 63 :127223.
- Rahman, M. A., Moser, A., Rötzer, T., and Pauleit, S. (2017). Microclimatic differences and their influence on transpirational cooling of *Tilia cordata* in two contrasting street canyons in Munich, Germany. *Agricultural and Forest Meteorology*, 232 :443–456.
- Rahman, M. A., Stratopoulos, L. M., Moser-Reischl, A., Zölch, T., Häberle, K.-H., Rötzer, T., Pretzsch, H., and Pauleit, S. (2020). Traits of trees for cooling urban heat islands : A meta-analysis. *Building and Environment*, 170(September 2019) :106606.
- Ramamurthy, P. and Bou-Zeid, E. (2017). Heatwaves and urban heat islands : A comparative analysis of multiple cities. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 122(1) :168–178.
- Reid, C. E., O’Neill, M. S., Gronlund, C. J., Brines, S. J., Brown, D. G., Diez-Roux, A. V., and Schwartz, J. (2009). Mapping Community Determinants of Heat Vulnerability. *Environmental Health Perspectives*, 117(11) :1730–1736.

- Reid, C. E., Rieves, E. S., and Carlson, K. (2022). Perceptions of green space usage, abundance, and quality of green space were associated with better mental health during the COVID-19 pandemic among residents of Denver. *PLOS ONE*, 17(3) :e0263779.
- Ren, C., Ng, E. Y.-y., and Katzschner, L. (2011). Urban climatic map studies : a review. *International Journal of Climatology*, 31(15) :2213–2233.
- Renou, E. J. (1858). *Instructions meteorologiques, et Tables usuelles*, volume 22. Mallet-Bachelier.
- Ribes, A., Bo  , J., Qasmi, S., Dubuisson, B., Douville, H., and Terray, L. (2022). An updated assessment of past and future warming over France based on a regional observational constraint. *Earth System Dynamics*, 13(4) :1397–1415.
- Robine, J.-M., Cheung, S. L. K., Le Roy, S., Van Oyen, H., Griffiths, C., Michel, J.-P., and Herrmann, F. R. (2008). Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *Comptes Rendus Biologies*, 331(2) :171–178.
- Robineau, T., Rodler, A., Morille, B., Ramier, D., Sage, J., Musy, M., Graffin, V., and Berthier, E. (2022). Coupling hydrological and microclimate models to simulate evapotranspiration from urban green areas and air temperature at the district scale. *Urban Climate*, 44 :101179.
- Robitu, M., Musy, M., Inard, C., and Groleau, D. (2006). Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate. *Solar Energy*, 80(4) :435–447.
- Rosso, F., Pioppi, B., and Pisello, A. L. (2022). Pocket parks for human-centered urban climate change resilience : Microclimate field tests and multi-domain comfort analysis through portable sensing techniques and citizens’ science. *Energy and Buildings*, 260 :111918.
- Royon, L., Karim, L., and Bontemps, A. (2014). Optimization of PCM embedded in a floor panel developed for thermal management of the lightweight envelope of buildings. *Energy and Buildings*, 82 :385–390.
- Sailor, D. J., Georgescu, M., Milne, J. M., and Hart, M. A. (2015). Development of a national anthropogenic heating database with an extrapolation for international cities. *Atmospheric Environment*, 118 :7–18.
- Salamanca, F., Georgescu, M., Mahalov, A., Moustou, M., and Wang, M. (2014). Anthropogenic heating of the urban environment due to air conditioning. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 119(10) :5949–5965.
- Saneinejad, S., Moonen, P., and Carmeliet, J. (2014). Comparative assessment of various heat island mitigation measures. *Building and Environment*, 73 :162–170.

- Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island—A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26 :224–240.
- Santamouris, M. (2015). Regulating the damaged thermostat of the cities—Status, impacts and mitigation challenges. *Energy and Buildings*, 91 :43–56.
- Santamouris, M. (2020). Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change. *Energy and Buildings*, 207 :109482.
- Santamouris, M., Ding, L., Fiorito, F., Oldfield, P., Osmond, P., Paolini, R., Prasad, D., and Synnefa, A. (2017). Passive and active cooling for the outdoor built environment – Analysis and assessment of the cooling potential of mitigation technologies using performance data from 220 large scale projects. *Solar Energy*, 154 :14–33.
- Santamouris, M. and Kolokotsa, D. (2016). *Urban Climate Mitigation Techniques*. Routledge.
- Schmidt, W. (1917). Zum einfluss grosser städte auf das klima. *Die Naturwissenschaften*, 5(30) :494–495.
- Schrijvers, P., Jonker, H., de Roode, S., and Kenjereš, S. (2016). The effect of using a high-albedo material on the Universal Temperature Climate Index within a street canyon. *Urban Climate*, 17 :284–303.
- Seidel, J., Ketzler, G., Bechtel, B., Thies, B., Philipp, A., Böhner, J., Egli, S., Eisele, M., Herma, F., Langkamp, T., Petersen, E., Sachsen, T., Schlabing, D., and Schneider, C. (2016). Mobile measurement techniques for local and micro-scale studies in urban and topoclimatology. *Die Erde*, 147(1) :15–39.
- Shashua-Bar, L. and Hoffman, M. E. (2004). Quantitative evaluation of passive cooling of the UCL microclimate in hot regions in summer, case study : urban streets and courtyards with trees. *Building and Environment*, 39(9) :1087–1099.
- Shashua-Bar, L., Pearlmutter, D., and Erell, E. (2009). The cooling efficiency of urban landscape strategies in a hot dry climate. *Landscape and Urban Planning*, 92(3-4) :179–186.
- Shashua-Bar, L., Pearlmutter, D., and Erell, E. (2011). The influence of trees and grass on outdoor thermal comfort in a hot-arid environment. *International Journal of Climatology*, 31(10) :1498–1506.
- Shashua-Bar, L., Tsiros, I. X., and Hoffman, M. E. (2010). A modeling study for evaluating passive cooling scenarios in urban streets with trees. Case study : Athens, Greece. *Building and Environment*, 45(12) :2798–2807.

- Skoulika, F., Santamouris, M., Kolokotsa, D., and Boemi, N. (2014). On the thermal characteristics and the mitigation potential of a medium size urban park in Athens, Greece. *Landscape and Urban Planning*, 123 :73–86.
- Smith, E. P. (2012). BACI Design. In *Encyclopedia of Environmetrics*, volume 1, pages 141–148. Wiley.
- Smoliak, B. V., Snyder, P. K., Twine, T. E., Mykleby, P. M., and Hertel, W. F. (2015). Dense Network Observations of the Twin Cities Canopy-Layer Urban Heat Island. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 54(9) :1899–1917.
- Spronken-Smith, R. A. and Oke, T. R. (1998). The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates. *International Journal of Remote Sensing*, 19(11) :2085–2104.
- Spronken-Smith, R. A. and Oke, T. R. (1999). Scale Modelling of Nocturnal Cooling in Urban Parks. *Boundary-Layer Meteorology*, 93(2) :287–312.
- Stark da Silva, P. W., Duarte, D., and Pauleit, S. (2023). The Role of the Design of Public Squares and Vegetation Composition on Human Thermal Comfort in Different Seasons a Quantitative Assessment. *Land*, 12(2) :427.
- Stewart, I. D. (2011). A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *International Journal of Climatology*, 31(2) :200–217.
- Stewart, I. D. and Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12) :1879–1900.
- Stewart-Oaten, A., Murdoch, W. W., and Parker, K. R. (1986). Environmental Impact Assessment : "Pseudoreplication" in Time? *Ecology*, 67(4) :929–940.
- Sun, C.-Y. (2011). A street thermal environment study in summer by the mobile transect technique. *Theoretical and Applied Climatology*, 106(3-4) :433–442.
- Svensson, M. K. (2004). Sky view factor analysis – implications for urban air temperature differences. *Meteorological Applications*, 11(3) :201–211.
- Synowiecki, J. (2020). « Rendez-nous nos jardins! ». Du bon usage de la nature en ville au XVIIIe siècle. *Echo des Lumières*.
- Taha, H. (1997). Urban climates and heat islands : albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings*, 25(2) :99–103.

- Takebayashi, H. and Moriyama, M. (2012). Study on Surface Heat Budget of Various Pavements for Urban Heat Island Mitigation. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2012 :1–11.
- Taleghani, M. (2018a). Outdoor thermal comfort by different heat mitigation strategies- A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81 :2011–2018.
- Taleghani, M. (2018b). The impact of increasing urban surface albedo on outdoor summer thermal comfort within a university campus. *Urban Climate*, 24 :175–184.
- Taleghani, M. and Berardi, U. (2018). The effect of pavement characteristics on pedestrians' thermal comfort in Toronto. *Urban Climate*, 24 :449–459.
- Taleghani, M., Sailor, D. J., Tenpierik, M., and van den Dobbelaars, A. (2014a). Thermal assessment of heat mitigation strategies : The case of Portland State University, Oregon, USA. *Building and Environment*, 73 :138–150.
- Taleghani, M., Tenpierik, M., van den Dobbelaars, A., and Sailor, D. J. (2014b). Heat in courtyards : A validated and calibrated parametric study of heat mitigation strategies for urban courtyards in the Netherlands. *Solar Energy*, 103 :108–124.
- Taplin, R. (2012). People, Policy and Politics in Future Climates. In *The Future of the World's Climate*, pages 29–46. Elsevier.
- Thorsson, S., Lindberg, F., Eliasson, I., and Holmér, B. (2007). Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. *International Journal of Climatology*, 27(14) :1983–1993.
- Touati, N., Gardes, T., and Hidalgo, J. (2020). A GIS plugin to model the near surface air temperature from urban meteorological networks. *Urban Climate*, 34 :100692.
- Tremeac, B., Bousquet, P., de Munck, C., Pigeon, G., Masson, V., Marchadier, C., Merchat, M., Poeuf, P., and Meunier, F. (2012). Influence of air conditioning management on heat island in Paris air street temperatures. *Applied Energy*, 95 :102–110.
- Tsin, P. K., Knudby, A., Krayenhoff, E. S., Ho, H. C., Brauer, M., and Henderson, S. B. (2016). Microscale mobile monitoring of urban air temperature. *Urban Climate*, 18 :58–72.
- UN-Habitat (2022). World Cities Report 2022. Technical report, United Nations Settlements Programme, Nairobi.
- Underwood, A. (1992). Beyond BACI : the detection of environmental impacts on populations in the real, but variable, world. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 161(2) :145–178.

- Vardoulakis, S. and Kinney, P. (2019). Grand Challenges in Sustainable Cities and Health. *Frontiers in Sustainable Cities*, 1.
- Vial, A. (2007). Quelques idées reçues sur la position du Soleil. *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, 101 :959–980.
- Viguié, V. and Hallegatte, S. (2012). Trade-offs and synergies in urban climate policies. *Nature Climate Change*, 2(5) :334–337.
- Viguié, V., Lemonsu, A., Hallegatte, S., Beaulant, A.-L., Marchadier, C., Masson, V., Pigeon, G., and Salagnac, J.-L. (2020). Early adaptation to heat waves and future reduction of air-conditioning energy use in Paris. *Environmental Research Letters*, 15(7) :075006.
- Ville de Paris (2017a). Plan Climat de Paris.
- Ville de Paris (2017b). Stratégie de Résilience de Paris.
- Villefranche, N., Hourdin, F., d’Alençon, L., Blanco, S., Boucher, O., Caliot, C., Coustet, C., Dauchet, J., El Hafi, M., Eymet, V., Farges, O., Forest, V., Fournier, R., Gautrais, J., Masson, V., Piaud, B., and Schoetter, R. (2022). The “teapot in a city” : A paradigm shift in urban climate modeling. *Science Advances*, 8(27) :8934.
- Voogt, J. and Oke, T. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3) :370–384.
- WMO (2019). *Guidance on Integrated Urban Hydro-Meteorological, Climate and Environmental Services*, volume I.
- Yaghoobian, N. and Kleissl, J. (2012). Effect of reflective pavements on building energy use. *Urban Climate*, 2 :25–42.
- Yang, J., Wang, Z.-H., and Kaloush, K. E. (2015). Environmental impacts of reflective materials : Is high albedo a ‘silver bullet’ for mitigating urban heat island? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47 :830–843.
- Yoshino, M. (1975). Climate in a small area : an introduction to local meteorology. page 549.
- Yu, C. and Hien, W. N. (2006). Thermal benefits of city parks. *Energy and Buildings*, 38(2) :105–120.
- Yuan, C., Adelia, A. S., Mei, S., He, W., Li, X.-X., and Norford, L. (2020). Mitigating intensity of urban heat island by better understanding on urban morphology and anthropogenic heat dispersion. *Building and Environment*, 176 :106876.
- Zask, K. (2022). *Se réunir-Du rôle des places dans la cité.* . Premier Parallèle.

- Zhang, J., Gou, Z., and Shutter, L. (2019). Effects of internal and external planning factors on park cooling intensity : field measurement of urban parks in Gold Coast, Australia. *AIMS Environmental Science*, 6(6) :417–434.
- Zhang, Q., Zhou, D., Xu, D., and Rogora, A. (2022). Correlation between cooling effect of green space and surrounding urban spatial form : Evidence from 36 urban green spaces. *Building and Environment*, 222 :109375.