



HAL
open science

Contribution de différentes typologies de toiture au climat urbain en période caniculaire

Maxime Chaumont

► **To cite this version:**

Maxime Chaumont. Contribution de différentes typologies de toiture au climat urbain en période caniculaire. Physique [physics]. Université Paris Cité, 2023. Français. NNT : 2023UNIP7126 . tel-04574041

HAL Id: tel-04574041

<https://theses.hal.science/tel-04574041v1>

Submitted on 13 May 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

École Doctorale 564 Physique en Île-de-France

Laboratoire Interdisciplinaire des Énergies de Demain

Contribution de différentes typologies de toiture au climat urbain en période caniculaire

par Maxime Chaumont

Thèse de doctorat de Physique spécialité génie des procédés

dirigée par Laurent Royon

Présentée et soutenue publiquement le

11 décembre 2023 devant un jury composé de :

Mme Laurence Fournaison	Directrice de recherche, INRAE	Présidente
Mme Marion Bonhomme	Maîtresse de Conférences, INSA Toulouse	Examinatrice
M. Emmanuel Bozonnet	Maître de Conférences, La Rochelle Université	Rapporteur
M. Jean-Felix Durastanti	Professeur, Université Paris-Est Créteil	Rapporteur
M. Laurent Royon	Professeur, Université Paris Cité	Directeur de thèse
M. Martin Hendel	Assistant professeur, Université Gustave Eiffel	Invité, Encadrant

Remerciements

Je voudrais d'abord remercier l'ensemble des membres du jury qui ont accepté de lire mon travail et d'assister à la soutenance de cette thèse de doctorat. Leurs remarques m'ont permis de rendre ce manuscrit plus clair et plus juste sur certains points. Je suis aussi très satisfait de la discussion lors de la soutenance qui fut très enrichissante pour moi. Leurs suggestions me permettent d'ores et déjà de penser la suite de mes travaux.

Je remercie chaleureusement Frédéric Filaine qui le premier a eu le courage de me prendre en stage de L3 lorsque j'avais encore quelques cheveux sur la tête. Il m'a transmis différentes compétences très utiles pour la suite. Frédéric est rapidement devenu un ami autant qu'un encadrant. Cet enrichissement de notre relation a été possible grâce à sa grande gentillesse et surtout à sa modestie qui le rend très accessible. Je le remercie aussi pour son aide considérable et précieuse lors des nombreux montages expérimentaux que j'ai dû réaliser pendant mes stages de M1 et de M2 ainsi que pendant mon doctorat. Je suis ravi de continuer à travailler avec lui encore un temps.

Je tiens à remercier sincèrement Eric Herbert et Christophe Goupil qui ont accepté de me prendre en stage pendant 4 mois en fin de M1. J'ai énormément appris à leurs côtés : programmation, fabrication et conception d'un dispositif expérimental, traitement de données, rédaction d'un rapport de stage. Je tiens à souligner leur qualité de pédagogue. Aussi, je les remercie pour leur soutien important au moment de m'inscrire en doctorat. Enfin, je remercie Eric d'avoir accepté de participer à mon comité de suivi de thèse. Ses conseils m'auront été utiles à plusieurs reprises, tout comme son écoute pendant les périodes tourmentées.

Je remercie l'ensemble des membres de l'équipe Climat et Énergie en Milieu

Urbain (CEMU) et en particulier mon directeur de thèse Laurent Royon et mon encadrant Martin Hendel qui ont accepté de me prendre en stage pendant 5 mois à la fin de mon M2 puis en doctorat. Ils m'ont laissé une grande liberté durant ces années ce qui m'a permis de réaliser et de vivre une multitude de choses : montage de plusieurs dispositifs expérimentaux, participation aux différents projets de l'équipe, participation à l'organisation de conférences et de séminaires, encadrement de stages, participation à des conférences internationales, participation à la vie du laboratoire, implication dans des enseignements, etc. Les conditions dans lesquelles j'ai réalisé mon doctorat ont été idéales et ce en grande partie grâce à eux. Je leur dois aussi les énormes progrès que j'ai faits durant ces dernières années. Ils sont tous les deux très compétents et surtout complémentaires ce qui m'a permis de monter en compétence dans de nombreux domaines. Enfin, je les remercie pour leur patience et leur écoute, y compris dans les moments difficiles de cette aventure. Je suis honoré de continuer en post-doctorat à leurs côtés. Je remercie aussi chaleureusement Xiaofeng Guo avec qui j'ai pu avoir de nombreuses discussions sur mon dispositif expérimental et sur les résultats obtenus. Il a accepté de se gratter la tête avec moi à plusieurs reprises sur ces histoires de conduction/convection/rayonnement, ce qui m'a permis de beaucoup progresser.

Merci à l'ensemble des docs et post-docs de l'équipe avec qui j'ai partagé de superbes moments. Beaucoup d'entre eux/elles sont devenu.es des ami.es proches. Je pense en particulier à Sophie Parison qui était déjà en doctorat lorsque je suis arrivé dans l'équipe. Notre passion pour les bons petits plats et le vin nous a tout de suite rapprochés. Cette complicité a été précieuse pendant ce projet. Je suis très heureux de cette rencontre et ravi de continuer à travailler avec elle. Merci aussi à Mailys Chaniel, devenue également une amie proche, pour ces magnifiques vacances d'hiver passées ensemble et toutes ces discussions de fin de journée, à Maxence Thorey pour ces innombrables bières partagées devant des matchs de foot et de rugby, à Maxime Frère pour ce beau weekend passé à Hyères, à Ghid Karam et encore Sophie pour ce merveilleux voyage en Inde. Merci aussi à Pengfei Cao pour ces discussions passionnantes sur l'actualité internationale et sur l'histoire. Enfin, je salue Charbel Abboud, James Kamara et Nassim Fillaoui pour leur aide et leur soutien pendant cette fin de projet intense. Charbel et James, qui viennent tous les deux de commencer leur doctorat, sont deux personnes de grande qualité, je suis ravi de travailler avec eux pendant encore un certain

temps.

Je dois aussi beaucoup à Catherine Jacquard, la responsable administrative du laboratoire, qui m'a accompagné pendant toute cette aventure aussi bien d'un point de vue personnel que professionnel. Son aide pour les démarches administratives a été considérable. Aussi, je suis très heureux d'avoir avec elle et Frédéric organisé à deux reprises les journées du laboratoire : ce fut de très belles expériences qui m'ont permis d'acquérir de nouvelles compétences. Je la remercie infiniment pour tout cela et pour son soutien sans faille.

Je souhaite aussi remercier de nombreux techniciens et ingénieurs de l'UFR de Physique qui auront largement contribué à ma formation et à la construction du dispositif expérimental. En particulier, merci à Wladimir Toutain pour son aide importante dans la conception et l'usinage de certaines pièces du dispositif expérimental. Grâce à lui et à Jean-Yves Radenac, j'ai pu apprendre, dès mes stages de M1 et de M2 à me servir de certaines machines-outil, ce qui m'a été très utile pour la suite. Merci aussi à Jérôme Jovet pour ses conseils précieux en optique ou encore à Alexandre Di Palma et Yann Le Goas pour l'usinage de l'une des pièces maîtresses du dispositif. Enfin je remercie Arnaud Grados pour ces nombreuses discussions portant sur divers sujets. Quelques-unes ont porté sur le dispositif expérimental monté pendant ce doctorat mais davantage ont porté sur le fumage du saumon ou sur le brassage de la bière. Merci à lui et Catherine pour leur invitation annuelle à leur barbecue de fin d'année.

Bien évidemment, de nombreuses autres personnes ont participé de près ou de loin à cette aventure et je les remercie tout autant. Je pense par exemple à Mathieu Arnoux pour son implication lors de mon inscription en doctorat ou encore à Valérie Gautier, Eva Cabet, Delphine Bonnin et François Bouteau pour leur soutien constant et leur bienveillance. Merci également à Florence Leclerc, Gwenaël Ruprich-Robert et Roselyne Ferrari pour les échanges que nous avons eu concernant le fromage et le vin nature aussi bien pendant les journées du LIED que pendant le pot de thèse, c'est un sujet qui me tient particulièrement à cœur.

Je remercie chaleureusement Delphine Tessier, ma professeure de Science et Vie de la Terre au lycée, qui a été d'une grande aide pendant cette partie un peu chaotique

de ma scolarité. Ses qualités humaines et sa pédagogie me servent de modèle pour les enseignements que je dispense.

Je remercie du fond du cœur mes quatre parents Annie/Pascal et François/Catherine ainsi que mes trois frères et sœurs Mickaël, Paul et Léa qui m'ont tous apporté beaucoup d'attention à différents moments de vie et aussi beaucoup de soutien dans mes choix professionnels et personnels. Cette grande famille me rend pleinement heureux. J'ai une pensée émue pour Pascal parti avant la fin de cette aventure. Je garde précieusement en mémoire ses encouragements permanents et sa confiance absolue dans ma capacité à aller jusqu'au bout de ce travail. Merci aussi à Jean-Claude et feu Seda devenus au fur et à mesure des années une deuxième famille avec qui j'ai partagé de magnifiques moments.

Enfin, j'aimerais témoigner à ma coéquipière de vie Camille toute l'affection et la reconnaissance que j'ai pour elle. Notre rencontre a eu lieu à un moment de vie personnel délicat et au moment où mon travail de thèse s'intensifiait. Elle m'a porté, supporté et soutenu ces deux dernières années sans jamais me reprocher quoique ce soit. Je suis ravi de partager ma vie avec Camille et j'espère que nous ne sommes qu'au début de cette magnifique aventure. J'ai confiance. Vive Camille !

Résumé

Contribution de différentes typologies de toiture au climat urbain en période caniculaire

Le climat des villes se caractérise entre autres par des températures d'air plus importantes comparées au milieu rural environnant, notamment la nuit. Ce phénomène, appelé îlot de chaleur urbain (ICU), est dû à plusieurs facteurs inhérents aux villes tels que la concentration des activités humaines, le manque de végétation, leur morphologie ou encore les matériaux qui y sont utilisés. Pendant la saison estivale et en particulier en période de forte chaleur, il entraîne une augmentation importante de la consommation énergétique notamment pour les besoins de froid et pose des enjeux sanitaires. Effectivement, lorsque ce phénomène est important la nuit, l'organisme humain ne récupère pas convenablement, ce qui entraîne des problèmes de santé notamment chez les personnes les plus fragiles.

Diverses solutions sont donc étudiées pour modérer l'échauffement des villes lors des canicules. Elles peuvent porter sur la végétalisation et/ou l'arrosage des différentes facettes urbaines, sur la création d'espaces ombragés ou encore sur l'utilisation de matériaux perméables, hautement réfléchissants ou hautement émissifs. Parmi les surfaces qui peuvent être ciblées pour la mise en œuvre de ces techniques, les toits présentent un potentiel intéressant de par leur surface importante et parce qu'ils sont majoritairement inoccupés, ne posant ainsi pas de conflit d'usage comme cela peut-être le cas avec la mise en place de certaines techniques de rafraîchissement dans l'espace public. Aussi, les toitures présentent un double intérêt puisqu'elles constituent une interface entre l'atmosphère et le bâtiment. Elles participent donc à l'échauffement urbain et influent sur

la consommation énergétique des bâtiments. Ce travail a pour objectif de quantifier la contribution à l'échauffement urbain des toitures en période caniculaire dépendamment de leurs propriétés radiatives et thermiques, de la nature et de l'agencement des couches qui les composent ou encore des techniques de rafraîchissement qu'il est possible d'y déployer.

Cette étude est réalisée en laboratoire à l'aide d'un dispositif expérimental permettant de soumettre des échantillons de toiture à des conditions caniculaires. Le dispositif expérimental est composé d'une enceinte climatique programmable en température et en humidité, d'un simulateur solaire et d'un mécanisme d'aspersion. Deux configurations de toiture sont étudiées : les toitures isolées thermiquement par l'extérieur (**ITE**) et les toitures isolées thermiquement par l'intérieur (**ITI**). Chacune des configurations est étudiée pour deux types de toiture : standard (faible albédo), et réfléchissante (albédo élevé). La modification du comportement thermique des différentes structures, lorsque leur surface est arrosée, est aussi observée. Il apparaît que les structures **ITE** échauffent l'air extérieur en journée mais pas la nuit. Si les structures **ITI** échauffent moins l'air ambiant en journée, elles restituent une partie de la chaleur emmagasinée la nuit. Peu importe la structure, l'augmentation de la réflectivité solaire permet de diminuer sensiblement la contribution des toitures à l'échauffement urbain, bien que l'impact soit plus marqué pour les toitures **ITI** puisqu'elles permettent de diminuer la quantité de chaleur restituée. L'arrosage de la couche superficielle permet pour l'ensemble des structures étudiées de réduire considérablement les échanges convectifs pendant la phase diurne. Si le débit est suffisamment important, aucune des quatre toitures n'échauffe l'air ambiant en journée. Au-delà d'un certain débit les échanges convectifs deviennent même négatifs, c'est-à-dire que la toiture rafraîchit l'air ambiant proche de la surface. L'arrosage permet de réduire la contribution nocturne à l'ICU des toitures **ITI**. Pour chacune des structures, un débit optimal est déterminé minimisant la consommation d'eau tout en maximisant les effets rafraîchissants.

Mots-clés : Climat urbain; isolation thermique; toiture fraîche; arrosage urbain; îlot de chaleur urbain; canicule

Abstract

Contribution of different roof typologies to the urban climate during heatwaves

Urban climate is characterized by higher air temperatures compared to rural climates, especially at night. This phenomenon, known as the urban heat island effect (UHI), is due to several factors inherent to cities, such as the concentration of human activities, the lack of vegetation, their morphology and the materials used. During the summer season, and particularly during extreme heat, it leads to a significant increase in energy consumption, particularly for cooling needs, and poses health risks. Indeed, during hot nights, the human body cannot recover properly from heat exposure, leading to health problems, particularly for the most vulnerable populations.

Various solutions are therefore being studied to moderate urban heat during heatwaves. They can involve the greening and/or watering of various urban facets, the creation of shaded areas or the use of permeable, highly reflective or highly emissive materials. Among the surfaces that can be targeted for the implementation of these techniques, roofs present an interesting potential due to their large surface area and because they are mostly unoccupied, thus presenting no conflict of use as may be the case in public spaces. Roofs also have a dual role to play as they act as an interface between the atmosphere and the inside of buildings. They therefore contribute to urban heating and influence building energy consumption. The aim of this study is to quantify the contribution of roofs to urban heating during heatwaves, depending on their radiative and thermal properties, the nature and arrangement of their constitutive layers, and the cooling techniques that can be deployed.

This study is carried out in the laboratory, using an experimental set-up to submit roof samples to heatwave conditions. The experimental set-up includes a temperature- and humidity-controlled climate chamber with a solar simulator and sprinkler mechanism. Two roofing configurations are studied: roofs insulated from the outside and roofs insulated from the inside. Each configuration is studied for two types of roof: standard (low albedo), and reflective (high albedo). Changes in the thermal behavior of the various structures when their surfaces are sprayed with water are also observed. It appears that externally-insulated structures heat the outside air during the day, but not at night. While internally-insulated structures heat the ambient air less during the day, they release some of the stored daytime heat during the night. Whatever the structure, increasing solar reflectivity significantly reduces the contribution of roofs to urban heating, although the impact is stronger for internally-insulated roofs, since it reduces the amount of heat released. For all the structures studied, watering the surface layer considerably reduces convective exchanges during the daytime. If the watering rate is high enough, none of the four roofs heat-up the ambient air during the day. Above a certain watering rate, convective exchanges even become negative, i.e. the roof cools the ambient air close to the surface. Watering reduces the night-time contribution to the UHI of internally-insulated roofs. For each structure, an optimum flow rate is determined to minimize water consumption while maximizing cooling effects.

Keywords: Urban climate; thermal insulation; cool roof; urban watering; urban heat island; heatwave

Table des matières

Table des matières	xi
Liste des figures	xvi
Liste des tableaux	xvii
Acronymes et abréviations	xix
Nomenclature	xxii
1 Introduction	1
2 État de l’art	6
2.1 Composition des toitures	6
2.2 Bilan thermique de surface d’une toiture	8
2.3 L’isolation thermique	10
2.4 Les techniques de rafraîchissement appliquées aux toitures	14
2.4.1 Les toitures fraîches	15
2.4.2 Les toitures végétalisées	19
2.4.3 Les toitures arrosées	23
2.5 Conclusion	26
3 Matériels et méthodes	28
3.1 Dispositif expérimental	29
3.2 Structures de toiture étudiées	32

3.3	Cycle climatique	34
3.3.1	Température et humidité relative	34
3.3.2	Ensoleillement	35
3.4	Bilan thermique de surface	37
3.4.1	Sans arrosage	37
3.4.2	Avec arrosage	41
4	Cas d'étude sans arrosage	44
4.1	Résultats expérimentaux	44
4.1.1	Température et densité de flux de chaleur	44
4.1.2	Bilan thermique de surface	48
4.1.3	Bilan énergétique	56
4.2	Discussion	58
4.3	Conclusion	59
5	Comportement thermoclimatique de différentes toitures sèches	61
5.1	Résultats expérimentaux	62
5.1.1	Température et densité de flux de chaleur	62
5.1.2	Coefficient de convection thermique	68
5.1.3	Bilan thermique de surface	70
5.1.4	Bilan énergétique	73
5.2	Discussion	77
5.3	Conclusion	79
6	Cas d'étude avec arrosage	82
6.1	Résultats expérimentaux	83
6.1.1	Température et densité de flux de chaleur	83
6.1.2	Bilan thermique de surface	89
6.1.3	Bilan énergétique	101
6.1.4	Débit optimal	103
6.2	Discussion	106
6.3	Conclusion	107
7	Comportement thermoclimatique de différentes toitures arrosées	109

7.1	Résultats expérimentaux	109
7.1.1	Température et densité de flux de chaleur	109
7.1.2	Conductance effective moyenne	115
7.1.3	Bilan thermique de surface	117
7.1.4	Bilan énergétique	122
7.1.5	Débit optimal	126
7.2	Conclusion	127
8	Conclusions et perspectives	129
A	Caractérisation du flux radiatif incident	136
A.1	Répartition énergétique du flux radiatif incident	136
A.2	Correctifs appliqués	140
A.2.1	Uniformisation de la température de surface	140
A.2.2	Calcul du rayonnement net	143
B	La méthode	144
C	Mesures complémentaires	147

Table des figures

2.1	À gauche, composition d'une toiture en pente et à droite celle d'une toiture plate.	7
2.2	Bilan thermique de surface.	8
2.3	Différentes positions de la couche isolante dans une toiture.	11
2.4	À gauche, toiture végétalisée de type intensive et à droite de type extensive.	20
3.1	Dispositif expérimental.	29
3.2	Parabole non traitée (à gauche), parabole "polie miroir" avec dépôt multicouche (à droite).	30
3.3	Spectre solaire AM 1.5 comparé à celui du xénon, avec et sans filtrage.	30
3.4	Photographie illustrant l'hétérogénéité de l'éclairement de surface.	31
3.5	Composition et instrumentation des quatre échantillons de toiture étudiés.	32
3.6	Température de l'air (en rouge) et humidité relative (en bleu) imposées dans l'enceinte climatique.	35
3.7	Flux radiatif incident, avec la répartition courte (CLO) et grande (GLO) longueur d'onde, mesuré à l'intérieur du dispositif expérimental et comparé à celui mesuré en conditions réelles.	36
3.8	Bilan thermique de la surface supérieure des échantillons de toiture et son instrumentation.	38
3.9	Bilan thermique de la surface supérieure des échantillons de toiture lorsqu'elle est arrosée et son instrumentation.	41

4.1	Températures mesurées par les thermofluxmètres aux différentes profondeurs.	45
4.2	Densités de flux de chaleur mesurées par les thermofluxmètres aux différentes profondeurs.	46
4.3	Évolution du rayonnement net pour l'échantillon de toiture ITI.	49
4.4	Densité de flux convectif mesurée en fonction du temps.	51
4.5	Densité de flux convectif moyennée sur 5 minutes et son incertitude.	52
4.6	Densité de flux convectif mesurée en fonction de la différence de température entre la surface et l'air au cours d'un cycle jour-nuit.	53
4.7	Évolution de la densité de flux conduit par la surface de l'échantillon de toiture déduite du bilan thermique.	54
4.8	Densité de flux en fonction du temps.	55
4.9	Bilan énergétique pour l'échantillon de toiture standard ITI.	57
5.1	Températures et densités de flux de chaleur mesurées à différentes profondeurs dans les deux échantillons de toiture standard, ITE à gauche et ITI à droite.	64
5.2	Températures et densités de flux de chaleur mesurées à différentes profondeurs dans les deux échantillons de toiture réfléchissante, ITE à gauche et ITI à droite.	67
5.3	Densité de flux convectif mesurée en fonction de la différence de température entre la surface et l'air pour les quatre structures étudiées.	69
5.4	Bilan thermique en surface des quatre structures de toiture. En rouge, le rayonnement net, en bleu les échanges convectifs et en vert le flux de chaleur conductif.	71
5.5	Bilan énergétique pour les deux échantillons standards.	74
5.6	Bilan énergétique pour les deux échantillons réfléchissants.	75
6.1	Évolution temporelle de la température de surface pour différents débits d'arrosage.	83
6.2	Évolution temporelle de la température de surface au début de la phase nocturne.	85

6.3	Évolution temporelle des températures (à gauche) et des densités de flux de chaleur (à droite) mesurées à 2 cm de profondeur (en haut), à l'interface béton/isolant (au milieu) et à 26 cm de profondeur (en bas) pour différents débits d'arrosage.	87
6.4	Évolution temporelle du rayonnement net reçu par l'échantillon de toiture ITI standard pour différents débits d'arrosage.	89
6.5	Densité de flux convectif mesurée pendant les quatre expérimentations sans arrosage avec les capteurs de surface en fonction de la différence de température entre la surface et l'air.	91
6.6	Évolution temporelle de la densité de flux convectif pour différents débits d'arrosage pour l'échantillon de toiture ITI standard.	92
6.7	Densité de flux conductif de surface en fonction de la différence entre la température de surface et celle mesurée à 2 cm de profondeur pour l'échantillon de toiture ITI standard sans arrosage.	94
6.8	Évolution temporelle de la densité de flux conductif au niveau de la surface de l'échantillon de toiture ITI standard pour différents débits d'arrosage.	95
6.9	Évolution temporelle de la densité de flux rafraîchissant en fonction du débit d'arrosage pour l'échantillon de toiture ITI standard.	97
6.10	Bilan thermique de surface en fonction du débit d'arrosage pour l'échantillon de toiture ITI standard.	100
6.11	Bilan énergétique en fonction du débit pour la toiture ITI standard.	102
6.12	Méthode pour estimer le débit optimal.	104
6.13	Estimation du débit optimal pour l'échantillon de toiture ITI standard.	105
7.1	Évolution temporelle de la température de surface pour les quatre structures de toiture pour différents débits d'arrosage.	110
7.2	Évolution temporelle des températures (à gauche) et des densité de flux de chaleur (à droite) mesurées à 2 cm de profondeur en fonction du débit d'arrosage pour les quatre configurations de toiture.	113
7.3	Densité de flux conductif en fonction de la différence entre la température mesurée en surface et celle mesurée à 2 cm de profondeur pour les quatre échantillons de toiture lors des expérimentations sans arrosage.	116

7.4	Évolution temporelle du bilan thermique de surface pour l'échantillon de toiture ITE standard pour différents débits d'arrosage.	117
7.5	Évolution temporelle du bilan thermique de surface pour l'échantillon de toiture ITI standard pour différents débits d'arrosage.	119
7.6	Évolution temporelle du bilan thermique de surface pour l'échantillon de toiture ITE réfléchissant pour différents débits d'arrosage.	120
7.7	Évolution temporelle du bilan thermique de surface pour l'échantillon de toiture ITI réfléchissant pour différents débits d'arrosage.	121
7.8	Bilan énergétique pour les deux toitures standards en fonction du débit d'arrosage.	123
7.9	Bilan énergétique pour les deux toitures réfléchissantes en fonction du débit d'arrosage.	124
7.10	Estimation du débit optimal pour les quatre échantillons de toiture. . . .	126
A.1	Photo de la surface supérieure des échantillons éclairée par le simulateur solaire.	137
A.2	Emplacement des capteurs radiatifs pour les quatre directions étudiées. .	138
A.3	Variation de l'éclairement en fonction de la distance au centre pour quatre directions.	139
A.4	Photographies infrarouge de la surface supérieure de l'échantillon ITE après une heure de chauffe sans la plaque en aluminium sous la membrane d'étanchéité (gauche) et avec (droite).	140
A.5	Évolution de la température de surface en trois points de mesure, sans (gauche) et avec la plaque (droite) pour l'échantillon de toiture ITE standard.	141
A.6	Évolution de la différence de température de surface entre le point le plus chaud de la surface et le point le moins chaud, sans (à gauche) et avec la plaque (à droite).	142
A.7	Température moyenne de la zone centrale (E11) par rapport à la surface totale (E12), sans (à gauche) et avec la plaque (à droite).	142
A.8	Capteur radiatif de 16 cm de diamètre utilisé pour mesurer le flux radiatif incident moyen.	143

B.1	Comparaison des deux méthodes permettant de calculer les quatre termes du bilan thermique lorsque le débit est faible (Q_1) pour les quatre échantillons de toiture.	145
C.1	Température (à gauche) et densité de flux de chaleur (à droite) à 8 cm de profondeur en fonction du débit d'arrosage pour les quatre configurations de toiture.	148
C.2	Température (à gauche) et densité de flux de chaleur (à droite) à 12 cm (ITI) et à 16 cm (ITE) de profondeur en fonction du débit d'arrosage pour les quatre configurations de toiture.	149
C.3	Température (à gauche) et densité de flux de chaleur (à droite) à 20 cm de profondeur en fonction du débit d'arrosage pour les quatre configurations de toiture.	150
C.4	Température (à gauche) et densité de flux de chaleur (à droite) à 26 cm de profondeur en fonction du débit d'arrosage pour les quatre configurations de toiture.	151

Liste des tableaux

2.1	Impact de la mise en place d'une toiture fraîche sur les températures de surface de la toiture (extérieure et intérieure) et sur le confort intérieur du bâtiment.	16
2.2	Impact de la mise en place d'une toiture végétalisée sur la températures de la surface extérieure de la toiture, sur la température à l'intérieur du bâtiment et la consommation énergétique de ce dernier.	21
3.1	Propriétés des capteurs.	33
3.2	Propriétés des différentes couches de matériaux avec e l'épaisseur, λ la conductivité thermique, ρ la masse volumique, c_p la capacité thermique massique et R_{th} la résistance thermique.	33
3.3	Albédo (α) et émissivité hémisphérique (ϵ) des deux membranes d'étanchéité sèches et arrosées.	34
3.4	Éclairement cumulé sur 24h.	37
5.1	Comparaison des échanges convectifs diurnes et nocturnes des quatre toitures.	76
6.1	Réduction et fluctuation maximale ($F_{T_s}^{max}$) de la température de surface en fonction du débit d'arrosage.	84
7.1	Réduction et fluctuation maximales ($F_{T_s}^{max}$) de la température de surface en fonction du débit d'arrosage pour les quatre échantillons de toiture.	111

Acronymes et abréviations

Apur	Atelier parisien d'urbanisme. 4
BBC	Bâtiment basse consommation. 3
CLO	Courte longueur d'onde. xii, 36, 37, 39, 48–50, 56, 77, 78, 90, 101
EPDM	Éthylène-propylène-diène monomère. 8, 32, 33
ETFE	Éthylène tétrafluoroéthylène. 25
GLO	Grande longueur d'onde. xii, 8, 9, 35–37, 39, 48–50, 56, 71, 78, 90, 101, 118
ICU	Îlot de chaleur urbain. v, vi, 1–4, 60, 80, 127, 129, 130, 132, 133
Inserm	Institut national de la santé et de la recherche médicale. 3
ISGlobal	Institut de Barcelone pour la santé globale. 3
ITE	Isolation thermique extérieure. vi, xiii, xv, xvi, 11, 12, 28, 32, 33, 61–68, 70–73, 77–81, 110–112, 114, 115, 117–120, 122, 125, 127, 128, 130–132, 140, 141, 147, 149
ITI	Isolation thermique intérieure. vi, xiii–xvi, 11, 28, 32, 33, 44, 48, 49, 56, 57, 61–68, 70–73, 76–80, 82, 83, 86, 89, 92, 94, 95, 97, 100–102, 105, 106, 110, 111, 114, 115, 118, 119, 121–125, 127, 129–132, 147, 149
PET	Physiological Equivalent Temperature. 22

PVC Polychlorure de vinyle. [8](#)

RT Réglementation thermique. [2, 3](#)

Nomenclature

- E Débit d'évaporation, [kg.s⁻¹]. 9, 23, 43
- $F_{T_s}^{max}$ Fluctuation maximale de la température de surface, [°C]. xvii, 84, 111
- H Densité de flux convectif, [W.m⁻²]. 9, 10, 23, 37, 39, 40, 42
- L Rayonnement incident grande longueur d'onde, [W.m⁻²]. 8, 37
- L_{up} Radiosité grande longueur d'onde de la surface extérieure de la toiture, [W.m⁻²]. 8, 37
- Q Débit d'arrosage, [m³.s⁻¹]. 10
- R_n Rayonnement net, [W.m⁻²]. 38, 39, 42
- R_{th} Résistance thermique, [K.W⁻¹]. xvii, 33
- S Rayonnement incident courte longueur d'onde, [W.m⁻²]. 8, 37
- S_{ref} Rayonnement réfléchi courte longueur d'onde, [W.m⁻²]. 8, 37
- T_{2cm} Température à 2 cm de profondeur, [°C]. 43
- T_a Température de l'air, [°C]. 43
- T_a^{int} Température de l'air à l'intérieur du bâtiment, [°C]. 16, 21
- T_c Température du capteur, [°C]. 39

- T_e Température de l'eau pulvérisée, [°C]. 10, 43
- T_{op} Température opérative, [°C]. 15, 16
- T_s Température de surface, [°C]. 9, 10, 38, 40, 43
- T_s^a Température de la surface arrosée, [°C]. 43
- T_s^{ext} Température de la surface extérieure de la toiture, [°C]. 15, 16, 21
- T_s^{int} Température de la surface intérieure de la toiture, [°C]. 15, 16
- T_z Température à la profondeur z , [°C]. 33
- U_{sec} Conductance effective de la structure sans arrosage, [W.m⁻².K⁻¹]. 43
- V_e Quantité d'eau pulvérisée par aspersion, [L.m⁻²]. 43
- V_0 Densité de flux conductif absorbée par la surface, [W.m⁻²]. 9, 10, 19, 23, 37, 39, 40, 42
- V_z Densité de flux conductif mesurée à la profondeur z , [W.m⁻²]. 10, 33
- α Albédo, [-]. xvii, 8–10, 15, 16, 34, 38, 39
- ϵ Émissivité hémisphérique, [-]. xvii, 9, 10, 15, 16, 34, 38, 39
- λ Conductivité thermique, [W.m⁻¹.K⁻¹]. xvii, 33
- ρ Masse volumique [kg.m⁻³]. xvii, 33
- ρ_e Masse volumique de l'eau, [kg.m⁻³]. 9, 43
- σ Constante de Stefan-Boltzmann, [W.m⁻².K⁻⁴]. 38
- Φ Densité de flux rafraîchissant, [W.m⁻²]. 9, 42, 43
- c_p Capacité thermique massique à pression constante, [J.K⁻¹]. xvii, 33
- c_e Chaleur spécifique de l'eau, [kJ.kg⁻¹.K⁻¹]. 9, 43
- e Épaisseur, [m]. xvii, 33

- h Coefficient de convection thermique, $[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$. 40, 42
- l Chaleur latente de vaporisation de l'eau, $[\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}]$. 9, 23, 43
- t_0 Durée entre deux aspersions, [s]. 43

Chapitre 1

Introduction

Au milieu du XVII^e siècle, des savants florentins dirigés par Ferdinand II de Médicis inventent le premier thermomètre scellé [1]. Cette invention se diffuse rapidement en Italie puis en Europe si bien qu'en 1658 l'astronome français Ismaël Boulliau en reçoit un exemplaire et commence ainsi à réaliser des mesures de température de l'air à Paris, rue des Poitevins [2].

Deux siècles plus tard, un pharmacien et chimiste anglais du nom de Luke Howard met en évidence la particularité du climat en milieu urbain. À l'aide de mesures de température de l'air, dans la ville de Londres et sa périphérie, il observe pour la première fois l'existence du phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU). Il montre que la température de l'air mesurée au centre de Londres est plus importante que celle mesurée au même moment en divers endroits de sa périphérie, notamment la nuit. Il publie ses travaux en 1818 et 1820 dans un livre en deux volumes intitulé *The climate of London: deduced from meteorological observations made in the metropolis and at various places around* [3].

Depuis, l'intérêt de la communauté scientifique pour le phénomène d'îlot de chaleur urbain n'a cessé de croître si bien que les causes qui l'engendrent sont maintenant bien identifiées. Outre l'influence du climat régional [4], différents facteurs ont une incidence sur les températures en milieu urbain. Par exemple, la concentration des activités humaines au sein des villes occasionne des rejets de chaleur importants qui sont dif-

ficilement évacués puisque l'architecture des villes et en particulier la hauteur du bâti perturbe l'écoulement des vents. Le manque de végétation et de points d'eau participent aussi à intensifier l'ICU. Effectivement, l'eau contenue dans les sols naturels s'évapore et les végétaux transpirent. Ce processus biophysique appelé évapotranspiration nécessite une quantité d'énergie importante qui est, en partie, prélevée à l'air ambiant, ce qui contribue à diminuer sa température. En plus de perturber l'écoulement des vents, la géométrie des villes est aussi responsable d'un autre phénomène appelé piégeage radiatif. En journée, le rayonnement solaire subit de nombreuses réflexions sur les différentes facettes urbaines (toiture, façade, voirie) entraînant une absorption plus importante de ce rayonnement comparé à une surface plane. La nuit, le même phénomène ralentit l'évacuation de la chaleur par rayonnement thermique vers la voûte céleste. Enfin, les matériaux utilisés en ville contribuent également à l'élévation des températures. Leur capacité à réfléchir le rayonnement solaire est souvent faible et leur capacité à stocker la chaleur est importante. Ils absorbent donc une grande quantité d'énergie la journée qu'ils restituent lentement la nuit.

Durant la saison hivernale, l'ICU peut être bénéfique puisqu'il permet de limiter les consommations d'énergie liées au chauffage. En revanche, pendant la saison estivale et en particulier en période de forte chaleur, il entraîne une augmentation importante de la consommation énergétique notamment pour les besoins de froid [5, 6]. Or, cette augmentation est contradictoire avec les objectifs fixés par les différentes réglementations thermiques et environnementales en vigueur depuis les années 1970. Effectivement, suite au premier choc pétrolier de 1973, la première réglementation thermique est instaurée en 1974 (RT 1974) afin de réduire la dépendance de la France aux énergies fossiles. Elle prévoit une réduction de la consommation énergétique des bâtiments neufs de 25 % en imposant notamment la mise en place d'une couche d'isolation. Les deux RT suivantes de 1982 et 1988 exigent une nouvelle baisse de la consommation énergétique des bâtiments de 20 % par rapport à la RT de 1974 et étend la réglementation aux bâtiments non résidentiels. Si ces exigences permettent de réduire la consommation énergétique annuelle, principalement déterminée par la saison de chauffe, plusieurs situations d'inconfort estival important ont amené à intégrer la notion de confort d'été à partir de la RT 2000. Les RT suivantes ont renforcé et accru les exigences concernant la réduction de la consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment. Par exemple, la

RT 2012 prévoit de limiter la consommation d'énergie primaire des nouvelles constructions à un maximum de $50 \text{ kWh}_{ep} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$ qui est la valeur moyenne du label bâtiment basse consommation (BBC) [7]. La loi n° 2015-992 du 17 août 2015 renforce cet objectif puisqu'elle prévoit qu'à l'horizon 2050 tous les bâtiments français atteignent le niveau BBC. Plus récemment, la loi énergie-climat n° 2019-1147 du 8 novembre 2019 prévoit de lutter activement contre les passoires thermiques [8] en interdisant notamment aux propriétaires de biens considérés comme telles de les louer. Enfin, la dernière réglementation entrée en vigueur début 2022 (RE 2020) prend en compte le confort thermique intérieur lors des épisodes caniculaires et soutient la construction de bâtiments à énergie positive et bas carbone. Pourtant, d'après le ministère de la Transition Énergétique, en 2022 le secteur du bâtiment représentait encore 43 % de l'énergie consommée en France et était responsable de 23 % des émissions de gaz à effet de serre français [9].

Aussi, l'ICU pose des enjeux sanitaires puisqu'il accentue les impacts sanitaires des canicules [10]. Effectivement, lorsque ce phénomène est important la nuit, l'organisme humain ne récupère pas convenablement, ce qui entraîne des problèmes de santé notamment chez les personnes les plus fragiles. D'après un rapport de l'Inserm publié en 2007 portant sur la canicule de l'été 2003, environ 15 000 décès en excès ont été constatés en France métropolitaine entre le 1^{er} et le 20 août comparé à la même période des années antérieures. Les personnes de plus de 75 ans ont été les plus touchées et l'Île-de-France, région la plus artificialisée de la métropole, a été la plus affectée, comptabilisant à elle seule 33 % des morts en excès [11]. Durant l'été 2022, considéré comme le plus chaud jamais enregistré en Europe, l'Inserm et l'Institut de Barcelone pour la Santé Globale (ISGlobal) ont montré que 61 672 décès sont attribuables à la chaleur en Europe entre le 30 mai et le 4 septembre 2022 [12]. Or, d'après Météo France, du fait du changement climatique, le nombre de vagues de chaleur devrait doubler d'ici à 2050, et leur intensité ainsi que leur durée devrait augmenter sensiblement [13].

Diverses solutions sont donc étudiées pour modérer l'intensité de ce phénomène et ainsi minimiser ses conséquences sur la santé des citoyens et sur la consommation énergétique des villes. Ces solutions peuvent porter sur la végétalisation et/ou l'arrosage des différentes facettes urbaines, sur la création d'espaces ombragés ou encore sur l'utilisation de matériaux perméables, hautement réfléchissants ou hautement émissifs. Parmi les surfaces qui peuvent être ciblées pour la mise en œuvre de ces techniques de

rafraîchissement, les toits présentent un potentiel intéressant de par leur surface importante, notamment en milieu urbain dense. Effectivement, d'après un rapport de l'Atelier parisien d'urbanisme (Apur), les toitures représentent à elles seules environ un tiers de la surface totale de Paris intra-muros (environ 32,2 km²) [14]. Elles ont aussi l'avantage d'être majoritairement inoccupées, ne présentant ainsi pas de conflit d'usage comme cela peut-être le cas avec la mise en place de certaines techniques de rafraîchissement. Par exemple, l'application de matériaux réfléchissants sur la chaussée n'est pas forcément adaptée puisqu'elle peut entraîner un éblouissement des automobilistes. Sur les trottoirs, ces mêmes matériaux peuvent entraîner une dégradation du confort thermique des piétons à cause du rayonnement réfléchi. Enfin, les toitures présentent un double intérêt puisqu'elles constituent une interface entre l'atmosphère et le bâtiment. Dépendamment de leurs propriétés optiques et thermiques, elles impactent à la fois l'échauffement urbain via les échanges convectifs entre la surface extérieure de la toiture et l'air ambiant et à la fois la consommation énergétique ou le confort thermique des bâtiments via le flux de chaleur qui pénètre par la toiture jusqu'à l'intérieur du bâtiment. Pour ces raisons, le déploiement sur ces surfaces de solutions pour modérer la chaleur en ville en période caniculaire présente un fort potentiel et semble particulièrement adapté.

Actuellement, des solutions déjà mises en œuvre contribuent à limiter certains effets négatifs de l'ICU. Par exemple, l'isolation thermique constitue une solution efficace pour réduire les pertes ou les gains énergétiques d'un bâtiment et ainsi réduire sa consommation énergétique ou améliorer le confort thermique intérieur aussi bien pendant la saison hivernale que pendant les périodes de forte chaleur. Mais, du fait de son rôle prépondérant dans le comportement thermique des toitures, cette couche risque également d'impacter les échanges convectifs entre la surface extérieure de la toiture et l'atmosphère, et donc, d'impacter la contribution de la toiture à l'échauffement urbain. Il en va de même pour certaines des techniques de rafraîchissement évoquées précédemment. Bien que leur objectif premier soit le même que celui de l'isolation thermique, c'est-à-dire limiter le flux de chaleur qui pénètre dans le bâtiment, leur mise en place va également affecter les échanges convectifs entre la toiture et l'air ambiant. Ces enjeux nous amènent à la problématique suivante : comment les toitures contribuent-elles à l'échauffement urbain lors de vagues de chaleur et comment cette contribution est-elle affectée par les propriétés de l'isolation thermique et/ou par la mise œuvre de techniques

de rafraîchissement ?

Ce travail débute par une étude bibliographique afin de présenter un panorama non exhaustif des études déjà entreprises sur le sujet ainsi que les investigations à poursuivre. Les questions scientifiques auxquelles ce travail tente de répondre seront donc présentées à la suite de ce chapitre bibliographique.

Chapitre 2

État de l'art

Ce chapitre propose de faire un tour d'horizon des différentes études qui s'intéressent au comportement thermoclimatique des toitures, c'est-à-dire qui s'intéressent soit à l'impact de la toiture sur le comportement thermique du bâtiment, soit à l'impact de la toiture sur le climat local, soit aux deux.

La première section présente, de manière non exhaustive, la composition des deux types de toiture les plus répandus, à savoir, les toitures en pente et les toitures plates. Afin d'identifier clairement les grandeurs physiques pertinentes pour quantifier la contribution des toitures à l'échauffement urbain, on s'intéresse ensuite au bilan thermique de la surface extérieure d'une toiture. La troisième section de ce chapitre est dédiée à une étude bibliographique portant sur le rôle de l'isolant dans le comportement thermique des toitures tandis que la dernière section se focalise sur les différents travaux qui étudient l'impact des techniques de rafraîchissement sur le comportement thermoclimatique des toitures.

2.1 Composition des toitures

Il existe deux grands types de toiture : les toitures en pente et les toitures plates (pente comprise entre 2 % et 5 %), appelées aussi toitures-terrasses. En général, les toitures avec une pente importante concernent les habitations individuelles. Elles sont

moins chères à la construction, permettent une plus grande diversité architecturale et procurent un espace habitable supplémentaire lorsque les combles sont aménagés. Pour ce type de toiture, l'évacuation des eaux pluviales est plus simple et plus rapide. En revanche, elles sont davantage exposées aux intempéries, elles nécessitent donc un entretien plus important. Les toitures plates sont largement répandues sur les bâtiments commerciaux, industriels, administratifs et parfois résidentiels. Ce type de toiture est plus cher à la construction notamment parce qu'il nécessite plus de matière première pour la couche structurelle (souvent en béton) et pour l'étanchéité qui se doit d'être parfaitement réalisée puisque ce type de toiture est plus exposé à l'eau stagnante et donc aux fuites. En revanche, ces toitures permettent de bénéficier d'un espace extérieur supplémentaire lorsqu'elles sont accessibles aux usagers ou habitants. Il est alors possible d'aménager cet espace pour les occupants du bâti sous-jacent ou bien d'y déployer relativement facilement des systèmes de production d'électricité comme par exemple des panneaux solaires. La composition de ces deux types de toiture est décrite Figure 2.1.

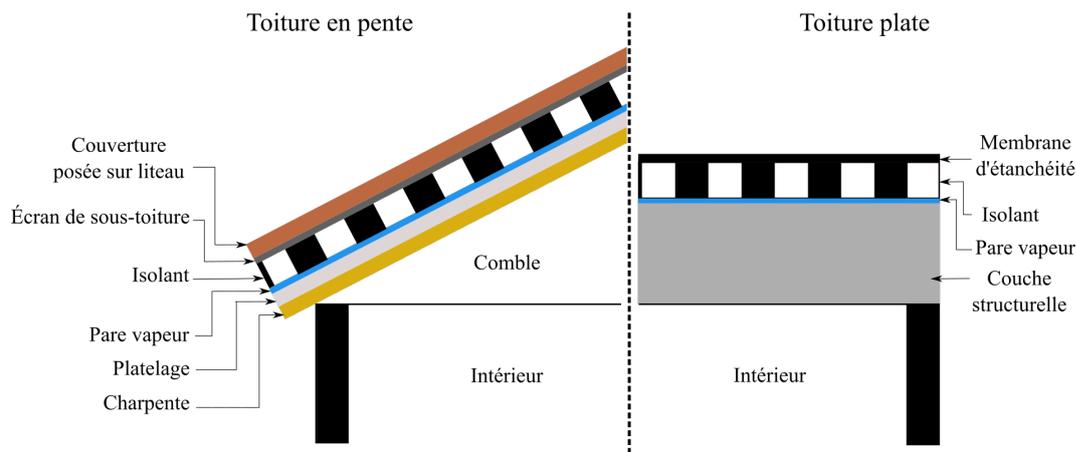


FIGURE 2.1 – À gauche, composition d'une toiture en pente et à droite celle d'une toiture plate.

Bien que la composition de ces deux types de toitures soit semblable, on note quelques dissemblances importantes, à savoir, la nature de la couche superficielle en contact avec l'atmosphère et celle de la couche structurelle. Dans le cas d'une toiture en pente, la couverture peut être composée d'une grande diversité de matériaux (tuiles en argile, couverture en zinc ou en ardoise, en lauze, etc.) alors que dans le cas des toitures

plates la couche en contact avec l'atmosphère est souvent la membrane d'étanchéité en Polychlorure de vinyle **PVC** ou en Ethylène-propylène-diène monomère **EPDM** pour les constructions relativement récentes et en bitume pour les constructions anciennes. On notera que la membrane d'étanchéité en bitume est de moins en moins utilisée puisqu'elle est moins durable et moins respectueuse de l'environnement que celle en PVC ou en **EPDM**. En ce qui concerne la couche structurelle, elle est souvent fabriquée avec du béton pour les toitures plates alors que dans le cas d'une toiture en pente les différentes couches de la toiture reposent généralement sur une charpente en bois. Enfin, contrairement aux toitures plates, il n'est pas possible de mettre en place n'importe quelle technique de rafraîchissement sur une toiture en pente. Par exemple, l'installation d'une toiture végétalisée n'est réalisable que sur des toitures plates.

2.2 Bilan thermique de surface d'une toiture

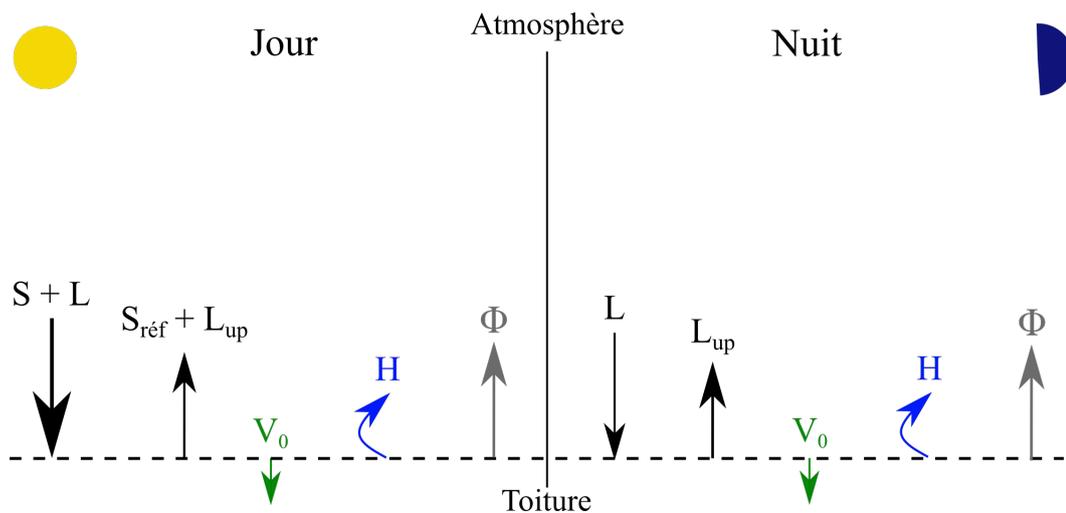


FIGURE 2.2 – Bilan thermique de surface.

La Figure 2.2 illustre un bilan thermique de la surface extérieure d'une toiture. En journée, la majorité des apports énergétiques proviennent du rayonnement solaire (S) et du rayonnement **GLO** ambiant (L). La surface extérieure de la toiture réfléchit une partie des apports solaires $S_{réf}$ et elle réfléchit et émet du rayonnement **GLO** (L_{up}). On note que le rapport entre le rayonnement réfléchi et le rayonnement incident dans la gamme de longueur d'onde $0,3-3 \mu\text{m}$ s'appelle l'albédo et est noté α . L'énergie restante, c'est-

à-dire qui n'est ni réfléchi, ni émise, est absorbée par la surface. L'énergie absorbée est soit transmise à l'air ambiant via les échanges convectifs atmosphériques (H) soit conduite (V_0) dans les couches profondes de la toiture dont une partie est stockée tandis que le reste est conduit jusqu'à l'intérieur du bâtiment. Lorsque la toiture est arrosée, qu'elle soit végétalisée ou non, un flux rafraîchissant Φ est créé. La nuit, la surface ne reçoit et n'émet plus que du rayonnement GLO. En revanche, une partie de l'énergie stockée dans la toiture est restituée soit vers l'atmosphère soit vers le bâtiment. Le bilan thermique s'écrit donc à chaque instant de la manière suivante :

Avec :

$$L_{up} = (1 - \epsilon)L + \epsilon\sigma T_s^4 \text{ et } S_{ref} = \alpha S \quad (2.1)$$

On a :

$$(S + L) - (\alpha S + (1 - \epsilon)L + \epsilon\sigma T_s^4) = H + V_0 + \Phi \quad (2.2)$$

avec T_s la température de surface, α l'albédo et ϵ l'émissivité de la surface.

Les effets rafraîchissant de l'arrosage peuvent être décomposés en deux parties. La première imputable à l'évaporation de l'eau (chaleur latente) et la seconde à la différence de température entre l'eau et la surface de la toiture ou le substrat dans le cas d'une toiture végétalisée (chaleur sensible). Le flux rafraîchissant Φ s'écrit donc de la façon suivante :

$$\Phi = lE + c_e \rho_e Q (T_s - T_e) \quad (2.3)$$

avec l la chaleur latente de vaporisation de l'eau (2260 kJ.kg^{-1}), E le débit d'évaporation, c_e chaleur spécifique de l'eau ($4,18 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$), ρ_e la masse volumique de

l'eau (1000 kg.m^{-3}), Q le débit d'arrosage, T_s la température de surface lorsqu'elle est arrosée et T_e la température de l'eau aspergée sur la surface.

Finalement, pour évaluer la contribution des toitures à l'échauffement urbain au cours d'une journée caniculaire, il est nécessaire de quantifier les échanges convectifs atmosphériques H aussi bien pendant la phase diurne que pendant la phase nocturne. En fonction de la composition de la toiture et des techniques de rafraîchissement mises en œuvre, les termes du bilan ne vont pas être impactés de la même façon tout comme les propriétés optiques α et ϵ de la surface ce qui aura une incidence sur les échanges convectifs. L'objectif de ce travail est donc de quantifier à chaque instant l'ensemble des termes du bilan thermique de surface afin de comprendre précisément leur influence sur H et donc sur la contribution de la toiture à l'échauffement urbain. Bien que cela ne soit pas l'objectif principal de ce travail, l'étude du flux conductif en surface V_0 ou en profondeur (V_z) renseignera sur le flux de chaleur qui pénètre par la surface extérieure de la toiture jusqu'au bâtiment sous-jacent selon les propriétés thermiques et optiques de la toiture étudiée.

En particulier, la couche isolante joue un rôle majeur dans le comportement thermique des toitures. En fonction de sa position dans la structure ou de ses propriétés thermiques, cette couche va largement impacter les différents termes du bilan thermique et notamment V_0 . La section suivante se focalise donc sur les différents travaux qui s'intéressent au rôle de la couche isolante dans le comportement thermique des toitures.

2.3 L'isolation thermique

Suite au choc pétrolier de 1973, la première réglementation concernant l'isolation thermique dans le secteur du bâtiment est créée en France. L'article 5-1 de la loi du 29 octobre 1974 relative aux économies d'énergie permet au gouvernement de fixer par décret les caractéristiques de l'isolation thermique des locaux de toute nature. Dix ans plus tard, les premiers labels font leur apparition comme le label "Haute Performance Énergétique". Il faudra attendre les années 2000 pour que le confort thermique d'été soit pris en compte. Les réglementations thermiques suivantes ont imposé des isolations thermiques de plus en plus performantes et depuis le décret de 2016, une isolation per-

formante n'est plus seulement obligatoire pour les nouvelles constructions mais aussi en cas de travaux de ravalement de façade, de réfection de toiture ou d'aménagement de locaux en vue de les rendre habitables. Ces diverses réglementations devraient conduire à un parc immobilier plus performant sur le plan des déperditions thermiques. Néanmoins, cela reste très hétérogène en raison du choix de l'isolant. Effectivement, plusieurs paramètres influencent sa performance tels que son épaisseur ou encore les propriétés thermiques des matériaux qui le constitue (conductivité thermique, capacité calorifique, etc.). Sa position dans la structure est aussi un paramètre qui affecte sa performance. Les deux types d'isolation les plus répandus sont l'isolation thermique par l'extérieur (ITE) et l'isolation thermique par l'intérieur (ITI) comme illustré Figure 2.3. Ces deux configurations ne présentent pas les mêmes avantages. Par exemple, l'ITE permet de traiter efficacement les ponts thermiques tandis que l'ITI ne nécessite pas d'intervenir sur l'extérieur du bâtiment. L'isolation thermique a donc fait l'objet de nombreuses études et demeure encore un sujet de recherche d'actualité. On s'intéressera ici à la portion de cette bibliographie qui s'intéresse au comportement estival de l'isolation thermique de toiture-terrasse.

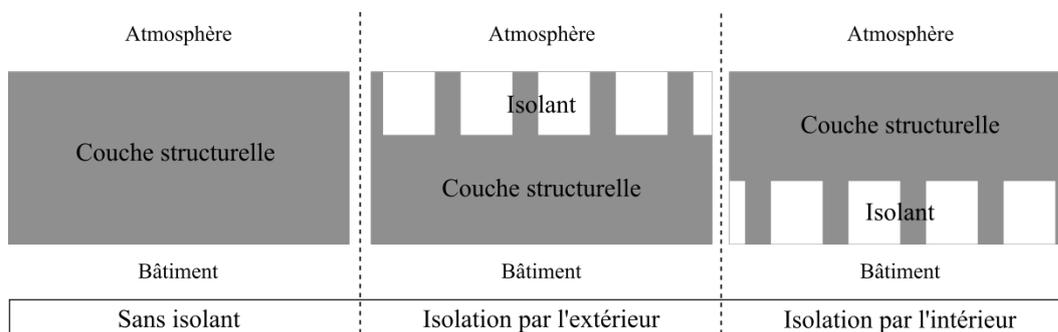


FIGURE 2.3 – Différentes positions de la couche isolante dans une toiture.

Par exemple, Choidis et al. [15] s'intéressent à la différence de comportement thermique de deux toitures plates en fonction de l'émissivité de la surface. Les conditions climatiques dans lesquelles sont réalisées l'étude sont celles rencontrées pendant la saison estivale à Thessalonique en Grèce. L'une des deux toitures est composée d'une couche de béton seule et l'autre, d'une couche de béton et d'une couche isolante. La toiture est isolée par l'extérieur comme illustré au centre de la Figure 2.3. Ils montrent numériquement que, pour un albédo de 0,5 et une émissivité de 0,95, la température

de surface de la toiture isolée par l'extérieur est de 9 °C plus importante aux alentours de 14 h comparée à celle de la toiture sans isolant. Plus l'émissivité de la toiture est faible et plus cette différence est importante. À l'aide d'une simulation numérique, Ozel [16] étudie les performances thermiques de trois murs composés des mêmes matériaux (isolant, brique, et ciment) mais dont l'emplacement de l'isolation dans la paroi varie. Le mur est isolé soit par l'extérieur, soit par l'intérieur, soit l'isolant se trouve au milieu de la paroi. Il montre que, la configuration qui réduit le plus les gains ou les pertes thermiques (selon la saison), est celle dont la paroi est isolée par l'extérieur. Kossekca et al. [17] trouvent des résultats semblables. Ils étudient, entre autres, les besoins énergétiques annuels d'une maison de plain-pied possédant un système de climatisation pour six différents scénarios d'isolation des murs. L'étude est réalisée à l'aide de DOE-2.1E (le prédecesseur d'EnergyPlus) et pour six différents types de climats rencontrés en Amérique du Nord. L'une des conclusions est que la configuration qui minimise la consommation annuelle d'énergie de la maison est celle avec l'isolation l'extérieure. Celle qui la maximise est celle avec l'isolation intérieure, et la différence de consommation énergétique entre les deux configurations peut dépasser les 11 %. Al-Regib et al. [18] montrent à l'aide d'une étude numérique, qu'en régime transitoire, un mur isolé par l'extérieur permet de faire des économies d'énergie importantes pour les besoins de climatisation comparé à un mur isolé par l'intérieur (ou lorsque la couche isolante se situe au milieu du mur).

Bien que plusieurs études tendent vers la même conclusion, à savoir que les parois isolées par l'extérieur minimisent la consommation d'énergie annuelle d'un bâtiment, il semblerait que cela ne soit pas systématiquement le cas. Par exemple, Al-Sanea [19] montre à l'aide d'un modèle numérique que, parmi six toitures dont certaines ne sont pas isolées et d'autres le sont à différents endroits de la paroi, celle isolée par l'intérieur permet la meilleure réduction du flux de chaleur vers l'intérieur du bâtiment comparé à une ITE, mais pour un gain de seulement 3 %. En revanche, la quantité de chaleur qui pénètre dans le bâtiment pendant une journée entière est équivalente. D'autres études qui s'intéressent au comportement thermique des façades trouvent aussi des résultats différents de ceux présentés dans le paragraphe précédent. Dans une seconde étude, Ozel et al. [20] étudient le comportement thermique de douze configurations d'isolation de façade. Pour l'ensemble des configurations étudiées, la façade est composée de 20 cm de

brique et de 6 cm de laine de verre. L'épaisseur d'isolant est donc constante (6 cm) entre les différents scénarios mais sa position au sein de la façade varie et dans certains cas, la couche isolante peut être scindée en deux ou trois couches de même épaisseur réparties à divers endroits de la façade. Ils montrent que, du point de vue de l'amortissement et du déphasage de l'onde de chaleur qui pénètre dans le bâtiment, la configuration qui minimise l'un et maximise l'autre est celle pour laquelle la toiture est composée de trois couches isolantes de même taille (2 cm chacune) placées à l'extérieur, au milieu et à l'intérieur de la façade. Dans une étude similaire, Asan [21] confirme ces résultats.

D'autres paramètres tels que l'épaisseur de la couche isolante sont étudiés dans la littérature. Il paraît évident que plus l'épaisseur de l'isolation est importante plus le flux de chaleur qui pénètre dans le bâtiment est réduit, et par conséquent, plus les économies d'énergie sont importantes. En revanche, comme la fabrication et la mise en place de ce type de matériaux peuvent s'avérer coûteuses du point de vue énergétique, plusieurs études cherchent à déterminer une épaisseur d'isolation optimale. L'objectif est de maximiser les économies d'énergie réalisées grâce à l'isolation tout en minimisant le coût énergétique lié à sa fabrication et à sa mise en place. D'autres critères peuvent être pris en compte dans l'estimation de cette épaisseur optimale comme par exemple le coût financier de production ou encore d'autres critères environnementaux. Par exemple, Bolatturk [22] montre que l'épaisseur optimale d'isolant dépend du type de besoin (chauffage ou refroidissement) et du climat dans lequel l'étude est réalisée. Dombayci et al. [23] s'intéressent à l'épaisseur optimale d'isolant qui permet de maximiser les économies d'énergie tout en minimisant le coût financier lié à sa mise en place et sa fabrication. Les paramètres de l'étude sont la source d'énergie utilisée (gaz naturel, charbon, électricité, etc.) et le type d'isolant (polystyrène expansé ou laine de roche). Cette épaisseur est systématiquement moins importante lorsque la laine de roche est employée et, pour les deux types d'isolant, lorsque le gaz naturel est utilisé. L'épaisseur optimale de cette couche isolante dépend donc de nombreux paramètres (mix énergétique, climat local, coût de l'isolation) et diffère d'une situation à l'autre.

La nature de l'isolant (et donc les propriétés thermiques de ce dernier) a également un rôle important dans le comportement thermique des parois. Il existe une grande diversité d'isolants et de systèmes d'isolation que Papadopoulos [24] propose de classer en quatre catégories : organique, inorganique, mélange organique/inorganique et autres

technologies comme par exemple l'utilisation de matériaux à changement de phase ou d'une couche de vide. Les propriétés thermiques de ces différents types d'isolation, leur impact sur la consommation énergétique du bâtiment ou encore l'analyse de leur cycle de vie sont résumés par plusieurs auteurs [25], [26], [27], [28]. On note que dans la catégorie des isolants organiques, il existe des isolants dits biosourcés c'est-à-dire issus de matières recyclées ou de matières renouvelables comme la biomasse végétale ou animale. Comparés aux autres isolants, leur bilan environnemental est bien meilleur. Un label "Bâtiment biosourcé" a d'ailleurs été créé en 2012 afin de valoriser l'utilisation de tels matériaux.

L'impact de la couche isolante de la toiture sur le bâtiment sous-jacent est effectivement bien documenté. En revanche, l'influence de la position de l'isolant au sein de la toiture sur l'échauffement local de l'air extérieur en période caniculaire par l'intermédiaire des échanges convectifs n'a pas été étudié en détail. Cette constatation constitue le point départ de ce travail de thèse. La suite de ce chapitre bibliographique se concentre sur les différentes techniques de rafraîchissement qu'il est possible de mettre en œuvre sur les toitures.

2.4 Les techniques de rafraîchissement appliquées aux toitures

En fonction des techniques de rafraîchissement qui sont mises en œuvre, certaines propriétés optiques ou thermiques de la toiture vont être affectées, ce qui impactera ensuite l'ensemble des termes du bilan thermique de la surface extérieure de la toiture et donc son comportement thermoclimatique. Ces techniques sont déployées avant tout pour réduire la consommation énergétique du bâtiment ou améliorer le confort thermique intérieur mais cela n'est pas sans conséquence sur les échanges convectifs entre la surface extérieure de la toiture et l'air ambiant, donc sur la contribution des toitures à l'échauffement urbain. Cette section s'intéresse aux études qui portent sur l'impact de la mise en place de ces techniques de rafraîchissement sur le comportement thermoclimatique des toitures.

2.4.1 Les toitures fraîches

Lorsqu'une toiture fraîche (cool roof) est mise en place, les propriétés optiques α et ϵ de la toiture sont modifiées. Le bilan radiatif de la toiture est alors largement affecté.

En effet, les toitures fraîches sont des toitures dont la surface extérieure réfléchit une part importante du rayonnement solaire incident et possède une émissivité dans la gamme infrarouge thermique élevée. Il existe différentes solutions pour obtenir de telles caractéristiques comme par exemple des matériaux ou des peintures réfléchissantes, des peintures thermochromiques (peinture dont la couleur change selon la température), des peintures phosphorescentes ou fluorescentes, etc. L'objectif de ces revêtements est d'éviter une surchauffe trop importante de la toiture pendant la saison estivale. La dilatation thermique des matériaux qui constituent la toiture est alors moins importante, ce qui permet d'allonger leur durée de vie [29]. Ces toitures présentent aussi divers bénéfices d'un point de vue thermique.

Effectivement, de nombreux auteurs ont montré que la mise en place de revêtement réfléchissants et fortement émissifs permettait de réduire considérablement la température de la surface extérieure d'une toiture conventionnelle dont la réflectivité solaire est faible (Table 2.1). Une étude menée en Italie par Pisello et al. [30] montre qu'en remplaçant les tuiles d'un bâtiment résidentiel de faible albédo (0,19) par des tuiles réfléchissantes dont l'albédo est élevé (0,77), la température de la surface extérieure de la toiture (T_s^{ext}) est abaissée au maximum de 18 °C pendant la saison estivale. L'étude s'intéresse ensuite aux conséquences sur le bâtiment sous-jacent non-climatisé et montre que la température de la surface interne de la toiture (T_s^{int}) est également fortement abaissée (entre 6 °C et 9 °C au maximum) tout comme la température opérative à l'intérieur du bâtiment ($T_{op} = 4,7$ °C au maximum). Les mêmes auteurs montrent dans une seconde étude [31] que la température de la surface extérieure de la toiture est réduite au maximum de 20 °C pendant les heures les plus chaudes de la journée. Dans cette seconde étude, la toiture n'est pas isolée et la réflectivité solaire du revêtement bitumineux est de 0,07. Une fois peint en blanc, l'albédo du revêtement est de 0,75. Bozonnet et al. [32] trouvent également des résultats similaires dans une étude menée à Poitiers en France sur la toiture d'un bâtiment commercial. Avant l'application d'une peinture blanche d'albédo 0,88, la température de la surface extérieure de la toiture at-

teint 70 °C alors qu'après, la température maximale atteinte par la surface est légèrement inférieure à 40 °C soit une différence de plus de 30 °C. En revanche, les auteurs précisent que, pour la partie du bâtiment bien isolée, l'impact de la peinture réfléchissante sur la température opérative (T_{op}) n'est pas très important. Enfin, dans le cas de Zingre et al. [33], l'application d'un revêtement réfléchissant sur une toiture en béton permet de diminuer la température de surface de 14,1 °C. Sans revêtement, le béton à nu de la toiture possède un albédo de 0,30 et une émissivité de 0,84 alors qu'avec le revêtement de couleur blanche, l'albédo est de 0,74 et l'émissivité de 0,90.

TABLE 2.1 – Impact de la mise en place d'une toiture fraîche sur les températures de surface de la toiture (extérieure et intérieure) et sur le confort intérieur du bâtiment.

Auteurs	Propriétés radiatives		Impact maximal				
			Toiture		Confort intérieur		
	Avant	Après	T_s^{ext}	T_s^{int}	T_a^{int}	T_{op}	
Pisello et al. 2014 [30]	$\alpha = 0,19$	$\alpha = 0,77$	-18 °C	-9 °C		-4,7 °C	
Pisello et al. 2013 [31]	$\alpha = 0,07$	$\alpha = 0,75$	-20 °C	-10 °C	-4 °C		
Bozonnet et al. 2011 [32]		$\alpha = 0,88$ $\epsilon = 0,90$	-35 °C			-9,7 °C ^b	
Zingre et al. 2015 [33]	$\alpha = 0,30$ $\epsilon = 0,84$	$\alpha = 0,74$ $\epsilon = 0,90$	-14,1 °C	-8,3 °C	-2,4 °C		
Roméo et al. 2013 [34]		$\alpha = 0,88$	-20 °C			-2,3 °C ^a	
Garg et al. 2016 [35]	Cas 1	$\alpha = 0,40$	$\alpha = 0,60$	-21,7 °C	-10,2 °C	-4,3 °C	
	Cas 2	$\alpha = 0,20$	$\alpha = 0,60$	-25,2 °C	-4,2 °C	-3,3 °C	
Kolokotsa et al. 2012 [36]	$\alpha = 0,20$ $\epsilon = 0,80$	$\alpha = 0,89$ $\epsilon = 0,89$	-35 °C		-1,5 °C		
Kolokotroni et al. 2013 [37]	$\alpha = 0,09$	$\alpha = 0,53$	-7,7 °C	-3,1 °C	-1,7 °C		

^a moyenne saisonnière

^b sans isolation sinon réduction de la température opérative de 1 °C au maximum

Certaines études s'intéressent aussi à l'impact de ces revêtements sur le confort thermique intérieur. Synnefa et al. [38] estiment grâce à une simulation numérique que l'application d'un revêtement réfléchissant permet de réduire la température de l'air intérieur de 1,2 °C à 3,7 °C au maximum lorsque le bâtiment est faiblement isolé et

non climatisé. À Singapour, Zingre et al. [39] ont constaté que la mise en place d'un revêtement réfléchissant sur une toiture double peau (double-skin roof) réduit le gain de chaleur journalier de 51 % et abaisse la température maximale de l'air à l'intérieur du bâtiment de 2,4 °C lors de journées ensoleillées. D'autres auteurs trouvent des résultats du même ordre de grandeur [37, 40, 35].

D'autres auteurs se sont intéressés plus spécifiquement aux gains énergétiques réalisés grâce à l'application de revêtements réfléchissants sur des toitures conventionnelles. Dans une étude réalisée à Sacramento en Californie, Akbari et al. [29] montrent que l'application d'une peinture réfléchissante dont l'albédo est de 0,79 sur la toiture d'une maison individuelle entraîne des économies d'énergie saisonnières d'environ 80 % par rapport à la situation initiale où l'albédo est de 0,18. Ils constatent également que le pic de puissance appelée est réduit de 0,6 kW. Les mêmes auteurs [41] trouvent dans une seconde étude des résultats similaires bien que l'impact de la mise en place du revêtement réfléchissant semble être moins important. Pour un magasin de vente au détail situé à Sacramento, la quantité d'énergie utilisée pour la climatisation est réduite de 52% lorsque l'albédo augmente de 0,21 à 0,83. Cette réduction est d'environ 17 % pour un bâtiment scolaire situé à San Marcos (Californie) qui présentait un albédo de 0,25 avant la mise en place du revêtement réfléchissant et de 0,79 après. Dans une autre étude réalisée en Inde à Hyderabad par Xu et al. [42], les économies d'énergie annuelles atteignent au maximum 22 kWh.m⁻² lorsqu'un revêtement blanc d'albédo 0,7 est appliqué sur une toiture en béton avec un revêtement noir d'albédo 0,1. Lorsque la toiture initiale est en béton mais ne possède aucun revêtement (béton à nu d'albédo 0,3), les économies annuelles sont d'environ 14 kWh.m⁻². En Grèce, Kolokotsa et al. [40] observent que l'application d'une toiture réfléchissante sur un bâtiment municipal entraîne une réduction de 17 % de la demande annuelle de refroidissement.

Si les toitures réfléchissantes peuvent réduire la consommation énergétique en été, elles peuvent entraîner une augmentation des besoins énergétiques durant la saison hivernale. Effectivement, He et al. [43] estiment à l'aide d'une simulation numérique que la mise en place d'une toiture réfléchissante pouvait réduire les besoins de climatisation de 3,6 % mais augmentait de 10,4 % les besoins de chauffage. Finalement, peu importe le bâtiment ou l'utilisation qui en est faite, la mise en place d'une toiture fraîche entraîne systématiquement des gains énergétiques annuels lorsque le climat est chaud

et que les besoins de refroidissement sont plus importants que les besoins de chauffage (climat désertique, tropical ou équatorial). En revanche, lorsque le climat est tempéré ou froid ces gains ne sont pas systématiques et dans certains cas la mise en place d'un toit réfléchissant peut entraîner une augmentation des besoins énergétiques.

Certains auteurs s'intéressent aussi à l'impact des toitures sur l'échauffement urbain durant la saison estivale. Par exemple, dans une étude numérique dont les conditions climatiques imposées sont celles de différentes villes d'Italie, Costanzo et al. [44] mettent en avant le fait qu'en été, les toitures réfléchissantes permettent de réduire les échanges convectifs de 75 % lorsque la réflectivité solaire augmente de 0,25 à 0,65. Yang et al. [45] s'intéressent également au flux de chaleur sensible libéré par une toiture dépendamment de sa réflectivité solaire et de l'épaisseur de son isolation. Ils montrent entre autres que le flux de chaleur sensible est réduit de plus de 250 W.m^{-2} lorsque la réflectivité de la toiture passe de 0,3 à 0,9. Baik et al. [46] trouvent des résultats similaires dans une étude réalisée à Seoul en Corée du Sud. La réduction du flux de chaleur sensible est d'environ 190 W.m^{-2} lorsque l'albédo augmente de 0,2 à 0,7. Takebayashi et al. [47], étudient entre autres le bilan thermique de surface d'une toiture composée d'une unique couche de béton d'albédo 0,37 et celui d'une toiture dont la couche superficielle a été recouverte d'une peinture blanche réfléchissante d'albédo 0,74. Leur étude est réalisée en conditions réelles pendant le mois le plus chaud de l'année au Japon (août). Au maximum la température de surface est réduite de $12 \text{ }^\circ\text{C}$ dans le cas de la surface peinte en blanc. Dans le cas de la toiture réfléchissante, le rayonnement net est inférieur de 200 W.m^{-2} . Le flux conductif de surface est lui inférieur de 150 W.m^{-2} et le flux convectif de 100 W.m^{-2} .

Bien que la littérature scientifique à propos des toitures réfléchissantes soit importante, les conséquences de la mise en place de tels revêtements sur l'échauffement de l'air à proximité de la toiture en période caniculaire ne sont pas étudiées de manière exhaustive. Lorsque cet aspect est étudié, l'analyse est souvent qualitative et se base exclusivement sur la température de surface ou sur les échanges convectifs. Seules quelques études s'intéressent à l'évolution de l'ensemble des termes du bilan thermique de la surface extérieure de la toiture (convection, conduction et rayonnement net) comme par exemple Takebayashi et al. [47]. Cet aspect mérite donc d'être approfondi. D'autre part, l'impact de la position de l'isolant dans la structure sur l'efficacité des toitures fraîches

n'a pas été étudié.

2.4.2 Les toitures végétalisées

L'un des premiers modèles de toiture végétalisée est présenté à l'exposition universelle de Paris en 1867. Au début du 20^{ème} siècle, certains architectes comme Le Corbusier commencent à intégrer ce type de toiture dans leurs projets architecturaux [48]. L'évolution des matériaux utilisés dans la construction, comme le béton armé, a permis de généraliser les toitures-terrasses et donc d'augmenter le nombre de toitures végétalisables.

Actuellement, il existe trois grands types de toiture végétalisée : extensive, semi-intensive et intensive. Elles se différencient notamment par la hauteur de substrat sur lequel poussent les végétaux. Celle-ci ne dépasse pas les 10 cm pour une toiture extensive alors que pour les toitures intensives cette hauteur est de 30 cm au minimum. La composition de ces toitures est identique, seule l'épaisseur de certaines couches comme le substrat ou la couche drainante varie comme illustré Figure 2.4. Il est donc possible de planter n'importe quel type de végétation sur des toitures intensives, y compris des arbres, alors que sur les toitures extensives le choix des végétaux est souvent limité aux plantes grasses comme le sedum ou les mousses. Peu importe le type de toiture végétalisée, chacune d'elles présente de multiples avantages [49].

Lors de fortes précipitations, ce type de toiture retient une partie de l'eau de pluie. Il permet donc de réduire le ruissellement vers les systèmes d'évacuation des eaux pluviales et ainsi limiter leur saturation [50]. Leur efficacité dépend en partie du type de toiture (hauteur et propriétés du substrat, type de plantes) et du climat local. Par exemple, les résultats de Roehr et al. [51] montrent qu'une toiture végétalisée peut réduire le volume d'eau de ruissellement annuel de 29 % à Vancouver, de 55 % à Shanghai et de 100 % à Kelowna (Canada). Ces toitures peuvent aussi améliorer la qualité de l'air [52], réduire le bruit ambiant [53], maintenir une certaine biodiversité en ville [54] et apportent plusieurs bénéfices d'un point de vue thermique.

Effectivement, grâce à son substrat, ce type de toiture apporte une isolation supplémentaire. Le flux de chaleur V_0 qui pénètre par la surface extérieure de la toiture

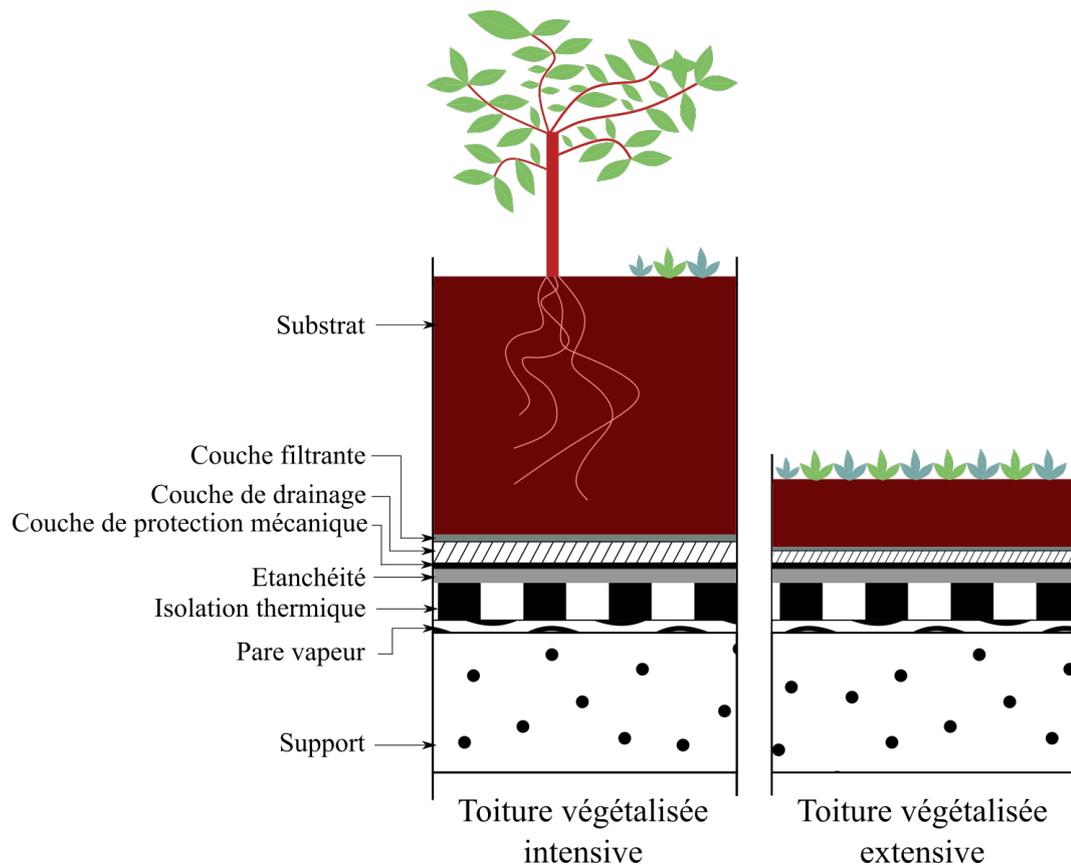


FIGURE 2.4 – À gauche, toiture végétalisée de type intensive et à droite de type extensive.

est donc réduit. D'autre part, la végétation constitue une barrière radiative, c'est-à-dire qu'une partie du rayonnement solaire est captée par la végétation et n'arrive pas jusqu'au substrat. En conséquence, ce type de toiture possède généralement une température de surface bien inférieure à celle des toitures conventionnelles. Elles permettent donc d'améliorer le confort thermique des bâtiments [55, 56, 57, 58] et de faire des économies d'énergie [59, 60, 61, 62] comme résumé Table 2.2.

Enfin, grâce au phénomène d'évapotranspiration, ces toitures s'échauffent moins que les toitures conventionnelles, elles contribuent moins à chauffer l'air extérieur. Effectivement, associées à la végétalisation des façades et de certains espaces publics, elles contribuent à atténuer le phénomène d'îlot de chaleur urbain [63, 64, 65, 66, 67, 68]. Par exemple, une étude de Dwivedi et al. [63] réalisée à Mumbai en Inde, montre à l'aide

TABLE 2.2 – Impact de la mise en place d’une toiture végétalisée sur la températures de la surface extérieure de la toiture, sur la température à l’intérieur du bâtiment et la consommation énergétique de ce dernier.

Auteurs	Type de toiture	Impact maximal		
		T_a^{int}	T_s^{ext}	Consommation énergétique annuelle
Karachaliou et al. 2016 [55] (In situ)	Intensive	- 0,7 °C (moy. jour)	- 15 °C	-19 % (climatisation)
Pragati et al. 2023 [59] (Simulation)	Semi-intensive	- 0,8 °C		-10 %
Niachou et al. 2001 [60] (In situ)		- 3 °C	-10 °C	-37 %
Jaffal et al. 2012 [62] (Simulation)	Extensive	- 2 °C	- 30 °C	- 6 %
Mousavi et al. 2023 [56] (Simulation)				- 14 %

d’images thermiques et du logiciel "Thermo IMAGER TIM 160" que la température de surface des espaces végétalisés est de 8 à 15 °C inférieure à la température de surface de structures en béton, en acier ou en asphalte. Or, moins la température de surface est élevée, moins les échanges convectifs entre la surface et l’air ambiant sont importants. Ils montrent aussi que la température de l’air au-dessus des terrasses conventionnelles fortement minéralisées est d’environ 3 à 4°C plus élevée que celle mesurée au dessus des terrasses végétalisées. Bevilacqua et al. [64] trouvent également que la température des surfaces végétalisées est bien moins importante comparée à celle des surfaces minérales. Dans cette étude réalisée en Italie, la température de surface de trois différentes toitures végétalisées est comparée à la température de surface d’une toiture conventionnelle de faible albédo. Au maximum la différence de température atteint 34,1 °C pendant la saison chaude.

Peng et al. [66] s’intéressent notamment à l’impact des toitures végétalisées sur

la température de l'air au niveau du piéton. L'étude est réalisée à Hong Kong et s'appuie sur les modèles de microclimat ENVI-met et RayMan. Deux scénarios de végétalisation sont étudiés, l'un avec des toitures extensives et l'autre avec des toitures intensives. Les résultats montrent que les effets rafraîchissants des toitures végétalisées ne se limitent pas aux toits. La réduction de la température de l'air au niveau des piétons est de 0,4 à 0,7 °C pour le scénario avec des toitures extensives, et de 0,5 à 1,7 °C pour le second scénario. En revanche, bien que cette réduction de la température de l'air ne soit pas négligeable, l'impact des toitures végétalisées sur le confort thermique du piéton au niveau de la rue est considéré par plusieurs auteurs comme relativement faible. Il semblerait aussi que cet impact dépende de nombreux paramètres tels que la hauteur du bâtiment dont la toiture est végétalisée, la largeur de la rue, son orientation, etc. Par exemple, Lobaccaro et al. [68] montrent dans une étude réalisée en Espagne que la végétalisation des toitures ne contribue que faiblement à améliorer le confort thermique du piéton. Effectivement, la "Physiological Equivalent Temperature" (PET) n'est abaissée que de 1 °C au maximum. Cette température est un indicateur thermique dérivé du bilan énergétique d'un humain et renseigne sur le confort thermique d'un individu dans un environnement donné. Ng et al. [69] ont des conclusions similaires. Dans une ville comme Honk Kong où le ratio entre la hauteur des bâtiments et la largeur de la rue est important, la végétalisation des toitures n'impacte que faiblement le confort thermique des piétons au niveau du sol. Finalement, bien que leurs effets rafraîchissants puissent être localisés, les toitures végétalisées contribuent bien à modérer l'échauffement urbain puisqu'elles permettent d'abaisser la température de l'air à proximité du bâtiment et de la surface de la toiture (donc de diminuer les échanges convectifs).

Néanmoins, il est important de considérer quelques inconvénients lors de la mise en place de telles toitures. Leur effet rafraîchissant dépend en grande partie de la quantité d'eau disponible dans le substrat. Il est donc nécessaire de les arroser régulièrement ce qui n'est pas toujours possible notamment dans les zones où les ressources en eau sont faibles. De plus, la masse supplémentaire liée au substrat (sec ou humide) ainsi qu'aux végétaux doit être supportable pour la structure du toit. Il n'est donc pas toujours possible d'installer des toitures végétalisées sur des bâtiments déjà construits. Dans le cas des nouvelles constructions, une telle toiture engendre des coûts financiers supplémentaires et ajoute des contraintes techniques pour que la structure soit suffisamment

résistante, notamment dans le cas des toitures intensives. Aussi, lorsque des engrais facilement solubles dans l'eau sont utilisés sur ces toitures, l'eau en sortie peut être polluée bien que sur d'autres aspects la qualité de l'eau puisse être améliorée [70, 71].

La littérature concernant l'impact des toitures végétalisées sur le bâtiment sous-jacent ou sur le climat urbain est bien documentée relativement à notre problématique.

2.4.3 Les toitures arrosées

L'utilisation de l'eau pour refroidir les différentes facettes du bâtiment est une méthode relativement ancienne puisque, d'après plusieurs auteurs [72, 73], l'une des premières études scientifiques sur le sujet a été réalisée par Houghten et al. [74] en 1939. Ils ont montré qu'en pulvérisant de l'eau sur une toiture ou en y laissant en permanence une couche d'eau de quelques centimètres d'épaisseur, le flux de chaleur qui pénètre à l'intérieur du bâtiment est réduit quel que soit le type de toiture. Effectivement, lorsqu'une toiture est arrosée, une partie des apports solaires reçus par cette dernière va être consacrée à l'évaporation de l'eau LE . Par conséquent, elle s'échauffe moins et le flux de chaleur V_0 qui pénètre dans la toiture est réduit tout comme les échanges convectifs entre la surface et l'air ambiant (H).

La technique la plus commune et la plus étudiée consiste à laisser une couche d'eau en permanence sur la toiture (roof pond). L'épaisseur de cette couche peut varier de quelques centimètres à plusieurs dizaines de centimètres (bassin d'eau). En journée le rayonnement solaire est capté par le bassin d'eau. La température de l'eau augmente alors et une certaine quantité d'eau s'évapore. La nuit, une partie de la chaleur emmagasinée par l'eau est restituée au milieu ambiant par l'intermédiaire des échanges convectifs avec l'air extérieur et par échanges radiatifs avec la voûte céleste. Il existe de nombreuses déclinaisons plus ou moins sophistiquées de cette technique. Il est par exemple possible d'ajouter des systèmes de ventilation, d'ombrage ou d'isolation pour améliorer les performances de ces toitures. Sharifi et al. [75] résument l'ensemble de ces déclinaisons dans une revue de littérature. On notera qu'en fonction de la technique utilisée, plusieurs facteurs peuvent avoir un impact significatif sur la performance de ces toitures comme par exemple l'humidité atmosphérique [76], la profondeur du bassin d'eau [77] ou encore les matériaux qui constituent la toiture [78, 79]. Finalement,

peu importe la configuration, l'objectif est de rafraîchir ou chauffer (suivant la saison considérée) le bâtiment sous-jacent de manière passive. Ces toitures permettent donc d'améliorer le confort intérieur des bâtiments et de réaliser des économies d'énergie. Par exemple, Yannas et al. [80] montrent que, pour un bâtiment climatisé à 25 °C, une toiture avec un bassin d'eau (équipée, entre autres, d'un système d'isolation amovible) permet de faire 50 % à 100 % d'économie d'énergie par rapport à une toiture conventionnelle et ce pour différentes villes d'Europe. Givoni [81] lui montre qu'un bâtiment équipé d'un "Skytherm System" (un système innovant avec bassin d'eau) permet de réduire la température intérieure de 6 °C à 8 °C comparé à un bâtiment traditionnel. Une autre étude menée par Spanaki et al. [82] en Grèce a montré qu'une toiture avec un bassin d'eau équipé d'un système de ventilation permet de réduire de 30 % les fluctuations journalières de la température intérieure ainsi que son maximum.

Bien que ce type de toiture arrosée et ses déclinaisons présentent des performances thermiques intéressantes du point de vue du bâtiment, elles ne sont pas généralisables au bâti existant. Effectivement, même dans le cas le plus simple où la toiture est recouverte d'un bassin d'eau, il est difficile pour une structure déjà existante de supporter une masse supplémentaire importante. Il serait nécessaire de réaliser d'importants travaux de rénovation qui engendreraient des coûts énergétiques et financiers importants. Ces coûts seraient encore largement augmentés dans le cas des autres déclinaisons qui comprennent par exemple un système de ventilation, d'ombrage ou d'isolation. D'autre part, les toitures avec bassin d'eau ne peuvent être déployées que sur des toitures plates.

Une autre technique qui consiste à pulvériser des gouttelettes d'eau sur la surface de la toiture à intervalles réguliers semble plus facilement généralisable et adaptée pour le bâti existant. Cette technique est applicable quelle que soit la résistance mécanique de la structure ou la pente de la toiture. A chaque aspersion, la toiture est recouverte soit de gouttelettes d'eau soit d'un film de quelques millimètres d'épaisseur. Entre chaque pulvérisation, l'eau s'évapore et refroidit de façon importante la surface. L'arrosage peut avoir lieu toute la journée ou seulement à certains moments, par exemple durant les heures les plus chaudes de la journée. Cette technique peut être réalisée par un opérateur à l'aide d'un tuyau d'arrosage ou être automatisée à l'aide d'un réseau de tuyaux et de systèmes d'aspersion. Cette technique est peu onéreuse, facile et rapide à déployer et

est très adaptée pour la saison estivale.

Plusieurs auteurs se sont intéressés à cette technique d'arrosage. Ketan et al. [83] étudient l'impact d'un arrosage par aspersion de gouttelettes sur une toiture composée d'une membrane d'étanchéité, d'une couche isolante et de béton léger. L'expérience se déroule en conditions réelles pendant la saison chaude au Japon lorsque la température de l'air atteint un maximum de 35 °C. L'arrosage a lieu entre 7 h et 7 h 30 du matin avec un débit de 0,167 kg.min⁻¹. Au maximum, la température de surface est abaissée de 5,5 °C. Une autre étude réalisée sur le toit d'un bâtiment non climatisé de l'Université A&M du Texas par Carrasco et al. [84] montre que l'aspersion de gouttelettes sur la surface de la toiture permet d'en réduire la température d'environ 14 °C et le flux de chaleur transmis au bâtiment de 75 %. Enfin, Mao et al. [85] expérimentent l'arrosage sur une toiture en éthylène tétrafluoroéthylène (ETFE) d'un complexe d'immeuble de la ville de Baiyun dans la province chinoise de Guangzhou. L'expérience est réalisée en conditions réelles au mois d'octobre sous une température d'air atteignant jusqu'à 29 °C. Les auteurs estiment, à l'aide d'un modèle numérique, que les propriétés optiques de leur toiture sont de 0,7 pour l'albédo et de 0,85 pour l'émissivité. La toiture est arrosée toutes les heures pendant neuf heures. Au maximum, la température de surface est abaissée de 19,5 °C.

On note que cette technique est aussi appliquée à d'autres surfaces urbaines comme la chaussée et les trottoirs. Par exemple, Hendel et al. [86] expérimentent l'arrosage sur la chaussée et le trottoir de la rue du Louvre à Paris. L'expérience a lieu en conditions réelles et se déroule durant l'été 2013. Le trottoir est en asphalte et la chaussée est en enrobé bitumineux. Ils comparent, entre autres, la réduction de température de surface obtenue lors de deux journées de mesure, l'une sans arrosage et l'autre avec. En fonction de la zone étudiée (trottoir ou chaussée), l'arrosage permet de réduire les températures de surface de 2 °C à 4 °C le matin et de 6 °C à 13 °C l'après-midi. Parison et al. [87] s'intéressent à l'impact de l'arrosage sur le comportement thermique d'une chaussée en enrobé bitumineux. Cette étude est réalisée en laboratoire et les propriétés optiques de l'asphalte sec sont 0,08 pour l'albédo et 0,99 pour l'émissivité. Dans cette expérience, la température de l'air est constante et est fixée à 35 °C pendant toute la phase diurne et le simulateur solaire est une lampe halogène. On constate que lorsque le débit d'arrosage est de 1,25 mm.h⁻¹, la température de surface est abaissée au maximum de 23,1 °C par

rapport au cas sans arrosage.

Le nombre d'études qui s'intéressent à cette technique d'arrosage appliquée aux toitures est relativement limité et le nombre de celles d'entre elles, comme par exemple Kabore et al. [88], qui s'intéressent à l'impact de cette technique sur le climat urbain l'est encore plus. Lorsque cette technique est appliquée à la chaussée ou aux trottoirs l'impact sur le microclimat est davantage étudié. La comparaison avec ces études pourra donc être pertinente.

2.5 Conclusion

Ce chapitre bibliographique montre qu'il existe de nombreuses études qui s'intéressent au comportement thermique des toitures, et ce depuis plusieurs décennies. En revanche, à l'exception des toitures végétalisées et de quelques études portant sur les toitures fraîches, le point de vue adopté par les auteurs est systématiquement celui du bâtiment. Globalement, l'impact des toitures sur le climat urbain en période caniculaire n'est que peu étudié. Ce travail cherchera donc à approfondir cet aspect et apporter des éléments de réponse aux questions suivantes.

- Comment la position de l'isolant au sein d'une toiture impacte-t-elle son comportement thermique et quelles en sont les conséquences sur l'échauffement local de l'air extérieur en période caniculaire ?

- Comment cet échauffement local est-il diminué lorsque la réflectivité solaire de la toiture augmente ?

- Dans quelle mesure l'arrosage de la couche superficielle des toitures permet-il de réduire la contribution de ces facettes urbaines à l'échauffement urbain, y compris pour une toiture réfléchissante et isolée ?

Comme les deux configurations d'isolation les plus répandues sont l'isolation par l'extérieur et l'isolation par l'intérieur, cette étude se focalise sur ces deux types de structures. L'expérience est réalisée en laboratoire à l'aide d'un dispositif expérimental qui permet de soumettre des échantillons de toiture à des conditions caniculaires. Cela permet de contrôler les paramètres climatiques ainsi que la composition et l'instrumen-

tation des échantillons de toiture étudiés.

Ce travail débute donc par la présentation du dispositif expérimental développé dans le cadre de cette thèse et détaille la méthodologie mise en place pour réaliser cette étude. La suite du manuscrit est divisée en deux parties. La première s'intéresse à l'impact de deux paramètres sur le comportement thermoclimatique des toitures, à savoir, la position de l'isolant dans la structure et la réflectivité solaire de la couche superficielle. La deuxième partie du manuscrit se concentre sur la modification du comportement thermoclimatique des toitures lorsque leur surface est arrosée. Après avoir conclu sur les résultats de l'étude, quelques perspectives seront proposées quant à la suite de ces travaux.

Chapitre 3

Matériels et méthodes

L'étude présentée dans ce manuscrit se focalise sur le comportement thermoclimatique de deux configurations de toiture plate : les toitures isolées thermiquement par l'extérieur (ITE) et les toitures isolées thermiquement par l'intérieur (ITI). Chacune des configurations est étudiée pour deux types de toitures : standard, dont la couche superficielle est de faible albédo, et réfléchissante (albédo élevé). La modification du comportement thermique des différentes structures, lorsque leur surface est arrosée, est aussi observée. Cette étude est réalisée en laboratoire à l'aide d'un dispositif expérimental permettant de soumettre des échantillons de toiture à des conditions caniculaires. Les échantillons sont de forme cylindrique et mesurent 28 cm de hauteur et 16 cm de diamètre.

Ce chapitre présente la méthodologie élaborée pour caractériser ces quatre configurations de toiture. Il débute par la description du matériel utilisé pour réaliser cette étude puis, dans un second temps, présente les structures de toiture étudiées ainsi que les conditions climatiques imposées pendant les expérimentations. La fin de ce chapitre, à partir du bilan thermique de surface, détaille la manière dont les différentes grandeurs d'intérêts sont soit mesurées, soit estimées.

3.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental développé et exploité dans le cadre de cette thèse est schématisé à la Figure 3.1. Il est composé d'une enceinte climatique Binder KMF-720 programmable en température et en humidité. Le logiciel de programmation intégré à l'enceinte permet d'imposer des variations en température et en humidité. Les dimensions de l'enceinte (1250 mm x 973 mm x 576 mm) autorisent l'étude d'échantillons de grande taille.

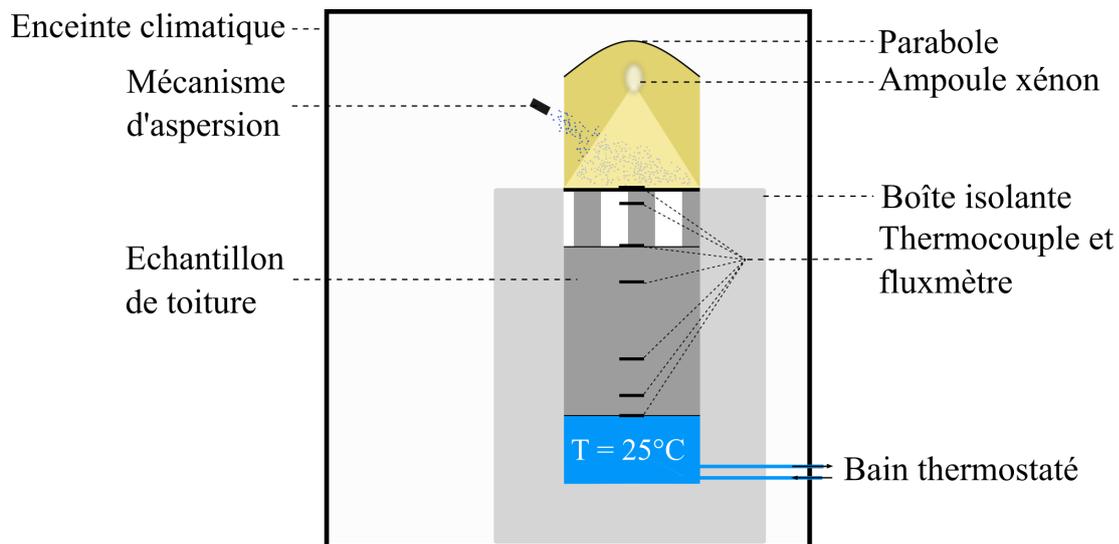


FIGURE 3.1 – Dispositif expérimental.

Pour reproduire l'ensoleillement, un simulateur solaire est disposé à l'intérieur de l'enceinte climatique à une distance de 35 cm au-dessus de la surface supérieure des échantillons de toiture. Ce simulateur solaire est composé d'une ampoule xénon à arc de puissance nominale 150 W, considérée comme une source ponctuelle, placée au point focal d'un miroir parabolique en aluminium de 20 cm de diamètre et de 5 cm de profondeur (Figure 3.2).

La Figure 3.3 compare le spectre d'émission du xénon avec celui de l'ensoleillement global horizontal AM 1.5. La surface du miroir a subi un polissage et un traitement multicouche permettant de réduire les pics du xénon à 800 nm et 1000 nm.

Un dispositif électronique programmable permet de faire varier la puissance du



FIGURE 3.2 – Parabole non traitée (à gauche), parabole "polie miroir" avec dépôt multicouche (à droite).

simulateur solaire. Cependant, malgré la parabole, la répartition énergétique du flux radiatif incident n'est pas parfaitement homogène (Figure 3.4). En effet, seule la partie du rayonnement qui est réfléchi par la parabole est filtrée et collimatée, ce qui n'est pas le cas pour le rayonnement direct. Du fait de cette hétérogénéité, la mesure locale du flux radiatif incident pendant les expérimentations est fortement dépendante de l'emplacement du capteur qui effectue la mesure. D'autre part, l'uniformité de la température de surface risque également d'être affectée.

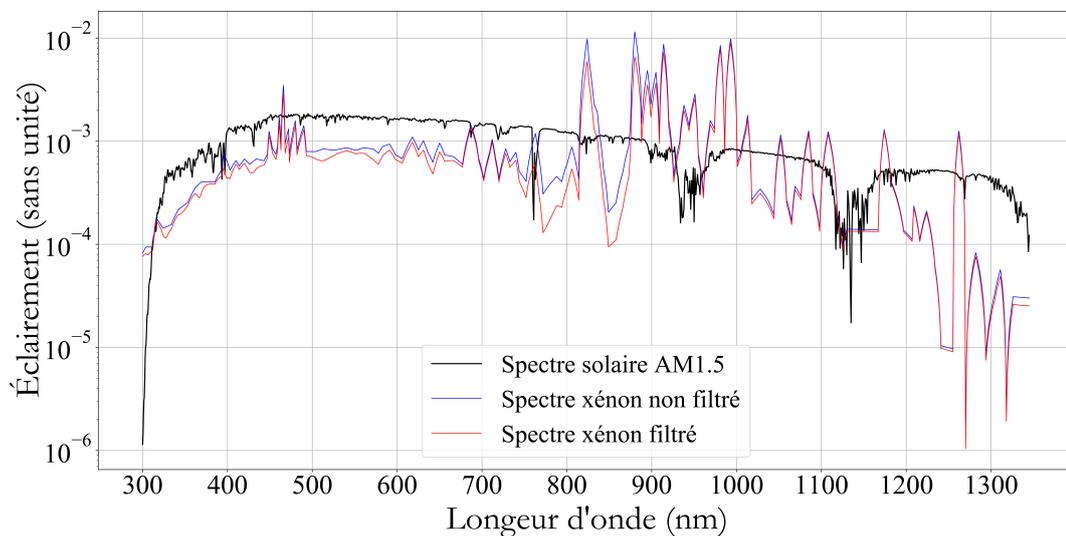


FIGURE 3.3 – Spectre solaire AM 1.5 comparé à celui du xénon, avec et sans filtrage.

Une plaque en aluminium de 3 mm d'épaisseur est donc ajoutée en dessous de la

couche d'étanchéité de la toiture afin d'uniformiser la température de surface. L'éclairage est caractérisé avant les expérimentations avec un capteur de même dimension que la surface des échantillons permettant ainsi de mesurer une grandeur moyenne. La caractérisation de cette hétérogénéité et la prise en compte de ses conséquences sur les expérimentations sont détaillées et présentées en annexe A.

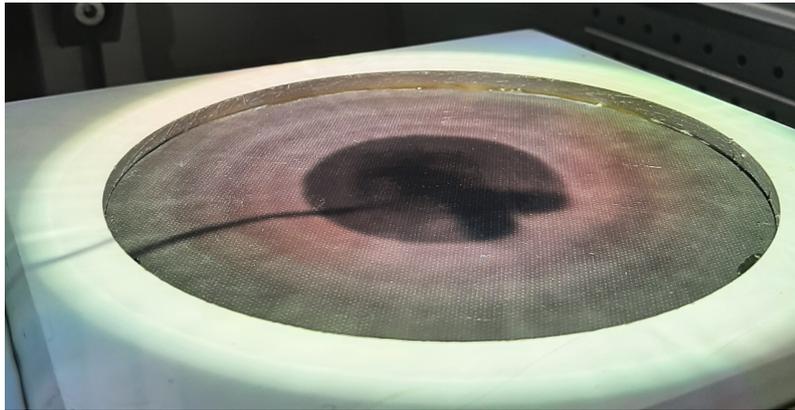


FIGURE 3.4 – Photographie illustrant l'hétérogénéité de l'éclairage de surface.

Pour simuler un bâtiment climatisé, la face inférieure des échantillons de toiture est maintenue, à l'aide d'un bain thermostaté, à une température de consigne de 25 °C. Le bain thermostaté, situé à l'extérieur de l'enceinte climatique, est relié à un échangeur de chaleur en aluminium de forme cylindrique de 8 cm de hauteur et de 16 cm de diamètre (diamètre équivalent à celui des échantillons de toiture). Cet échangeur est disposé sous l'échantillon de toiture et permet donc, par contact, d'imposer la température de consigne souhaitée. La surface latérale de l'ensemble (échantillon plus l'échangeur) est isolée thermiquement à l'aide d'une boîte en polyuréthane de 14 cm d'épaisseur. Du fait de cette isolation, les échanges énergétiques entre la toiture et le milieu ambiant se font principalement par la surface supérieure des échantillons et le flux de chaleur qui pénètre dans l'échantillon est supposé unidirectionnel.

Pour étudier l'impact d'un arrosage en surface sur le comportement thermoclimatique des structures, un mécanisme d'aspersion, composé d'une électrovanne et d'une buse à cône plein, permet de pulvériser de façon uniforme des gouttelettes d'eau sur la surface supérieure des échantillons. Trois débits d'arrosage différents sont appliqués sur chacune des quatre structures. La quantité d'eau pulvérisée par aspersion est

constante, la durée entre deux aspersion est ajustée pour obtenir le débit souhaité au cours d'une expérience donnée. On note que l'arrosage est activé seulement en journée et que, compte tenu des dimensions du tuyau d'alimentation, l'eau pulvérisée est à la température de l'air imposée à l'intérieur de l'enceinte climatique.

3.2 Structures de toiture étudiées

Les échantillons de toiture étudiés sont de forme cylindrique et sont confectionnés en laboratoire. Ils mesurent 28 cm de hauteur et 16 cm de diamètre et sont composés de trois couches : une membrane d'étanchéité EPDM de 1,2 mm d'épaisseur, une couche de béton de 20 cm et une couche d'isolant de 8 cm. Quatre structures sont étudiées selon leur membrane d'étanchéité (standard ou réfléchissante) et la configuration de l'isolant (ITI ou ITE). La composition et l'instrumentation des quatre échantillons de toiture sont présentées Figure 3.5.

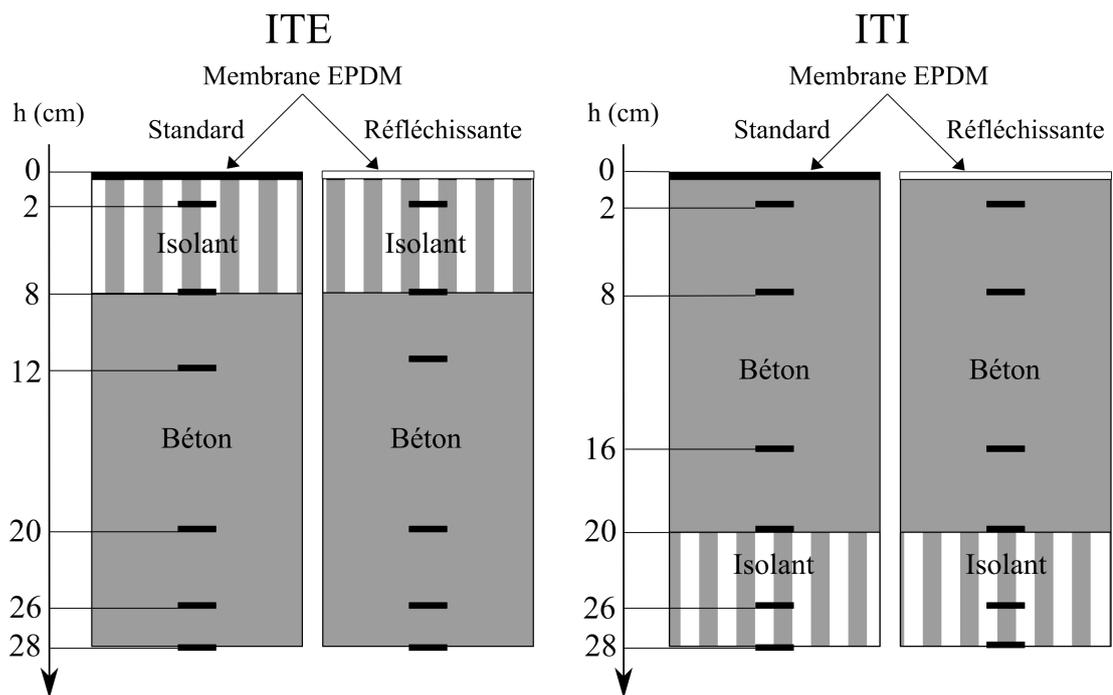


FIGURE 3.5 – Composition et instrumentation des quatre échantillons de toiture étudiés.

Les échantillons de toiture sont instrumentés, au centre de la surface supérieure, d'un capteur radiatif et thermique afin de mesurer la température de surface et de quanti-

fier les échanges convectifs entre la surface et l'air ambiant. Ils sont également équipés, au moment de leur confection, de thermofluxmètres disposés à différentes profondeurs au centre des échantillons afin de mesurer la température (T_z) et le flux de chaleur (V_z). L'ensemble des capteurs est relié à une centrale d'acquisition qui enregistre une mesure toutes les 10 secondes. Les propriétés des capteurs utilisés sont résumées à la Table 3.1.

	Surface des capteurs	Type	Sensibilité
Thermocouple	1 cm ²	T	± 0,5 °C
Fluxmètre	1 cm ²		± 3 % de la mesure

TABLE 3.1 – Propriétés des capteurs.

La même couche de béton instrumentée est réutilisée pour chaque échantillon. Cette couche de béton est retournée lors du passage de l'étude des toitures ITE aux toitures ITI et vice versa. Ceci explique les variations de profondeur de l'un des thermofluxmètres entre les deux configurations, de 12 cm pour ITI à 16 cm pour ITE. En procédant ainsi, les propriétés thermiques du béton et son instrumentation sont conservées pour chaque essai.

Les propriétés des différents matériaux qui composent l'échantillon sont présentées Tables 3.2. Les propriétés thermiques de l'isolant et de la membrane d'étanchéité ont été fournies par les constructeurs. La conductivité thermique et la capacité calorifique du béton sont tirées de la littérature (Payam Shafigh et al. [89]).

	e [cm]	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	ρ [kg.m ⁻³]	c_p [J.K ⁻¹ .kg ⁻¹]	R_{th} [m ² .K.W ⁻¹]
Béton	20	0,58 - 3,85	2100	800 - 1000	0,052 - 0,34
Isolant	8	0,026	28	1000	3,07
Étanchéité	0,12	0,2	1230	-	0,006

TABLE 3.2 – Propriétés des différentes couches de matériaux avec e l'épaisseur, λ la conductivité thermique, ρ la masse volumique, c_p la capacité thermique massique et R_{th} la résistance thermique.

La résistance thermique de chacune des structures est comprise entre 3,1 et 3,4 m².K.W⁻¹. Cette valeur est cohérente (ou légèrement en deçà) avec la RT 2020 qui préconise une résistance thermique minimale de 3,3 m².K.W⁻¹ pour une toiture-terrasse.

Les propriétés optiques des deux membranes d'étanchéité EPDM sont présentées Table 3.3. Pour déterminer l'albédo des différentes surfaces, qu'elles soient sèches ou

mouillées, un spectrophotomètre Cary 5000 avec sphère intégrante de 15 cm est utilisé pour mesurer leur réflectance spectrale entre 250 et 2500 nm. Celle-ci est ensuite pondérée par l'éclairement spectral (aussi appelé irradianance spectrale) de la lampe xénon filtrée. L'émissivité des surfaces sèches est également mesurée en laboratoire à l'aide d'un émissomètre EM4 de la société THEMACS Ingénierie en suivant la norme ASTM E408. L'émissivité des surfaces lorsqu'elles sont arrosées est égale à l'émissivité de l'eau.

	Surface sèche		Surface arrosée	
	α	ϵ	α	ϵ
Étanchéité standard	$0,07 \pm 0,01$	$0,887 \pm 0,008$	$0,03 \pm 0,01$	0,96
Étanchéité réfléchissante	$0,70 \pm 0,01$	$0,902 \pm 0,020$	$0,69 \pm 0,01$	0,96

TABLE 3.3 – Albédo (α) et émissivité hémisphérique (ϵ) des deux membranes d'étanchéité sèches et arrosées.

Finalement, l'agencement des couches au sein des structures ainsi que les propriétés optiques de la surface sont les deux seuls paramètres qui varient d'un échantillon à l'autre. Avant chaque expérimentation, l'échantillon est thermalisé à 25 °C pendant 24 h environ. L'échantillon est ensuite soumis au protocole expérimental décrit dans la section suivante.

3.3 Cycle climatique

3.3.1 Température et humidité relative

Les échantillons de toiture étudiés sont soumis à un cycle de température et d'humidité représentatif de conditions caniculaires parisiennes, oscillant entre 25 °C et 40 °C et 25 % et 50 % d'humidité. L'humidité absolue est fixée à 11,5 g.m⁻³. Ce cycle est représenté à la Figure 3.6.

La température de l'air au début du cycle est de 25 °C puis croît jusqu'à 40 °C, maximum qu'elle atteint à 17 h. Elle décroît ensuite progressivement entre 17 h et 7 h du matin de la journée suivante jusqu'à sa valeur initiale. L'humidité relative est en opposition de phase avec la température de l'air. Au début du cycle, alors que la température de l'air est minimale, l'humidité relative est maximale et vaut 50 %. Elle diminue en-

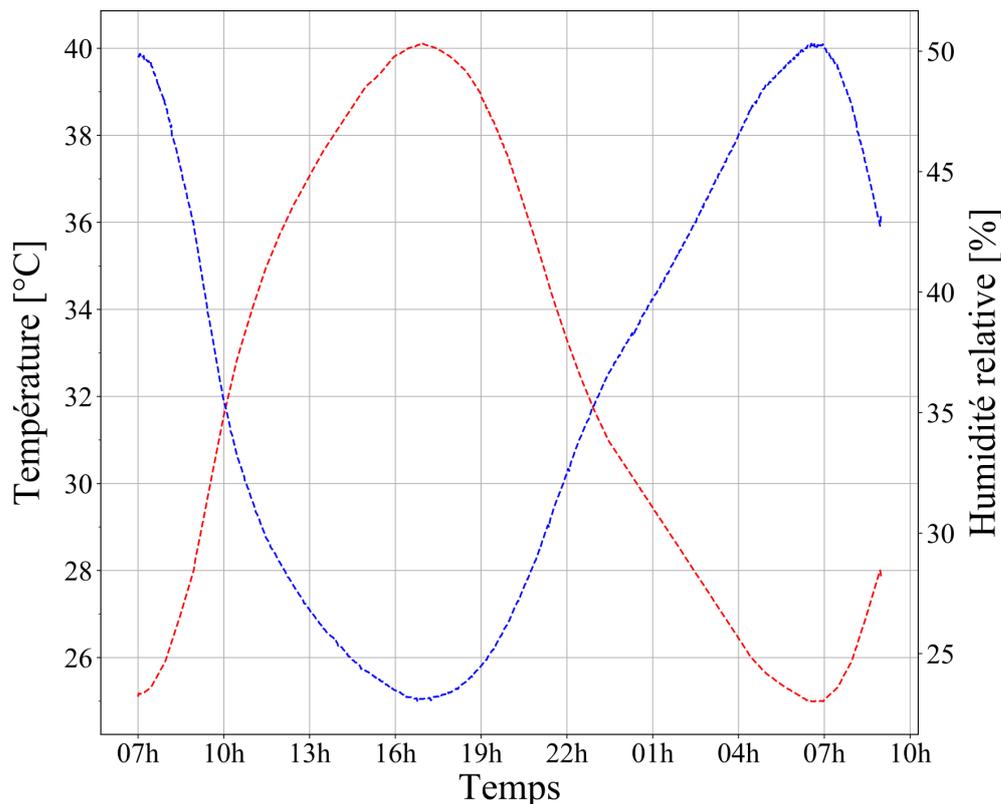


FIGURE 3.6 – Température de l'air (en rouge) et humidité relative (en bleu) imposées dans l'enceinte climatique.

suite pour atteindre un minimum de 23 % à 17 h puis augmente jusqu'à retrouver son maximum à 7 h du matin de la journée suivante. La durée du cycle complet est de 26 h ce qui permet d'observer les différences de conditions initiales dans lesquelles chacune des structures étudiées débute la deuxième journée caniculaire.

3.3.2 Ensoleillement

L'ensoleillement imposé aux échantillons étudiés cherche à reproduire un cycle d'ensoleillement d'été par ciel clair en France. Il est comparé Figure 3.7 à un ensoleillement réel pris pour modèle mesuré le 23 juillet 2019 dans la ville de Hyères située dans le département du Var.

Entre 7 h et 9 h, l'éclairement grande longueur d'onde (GLO) à l'intérieur du dis-

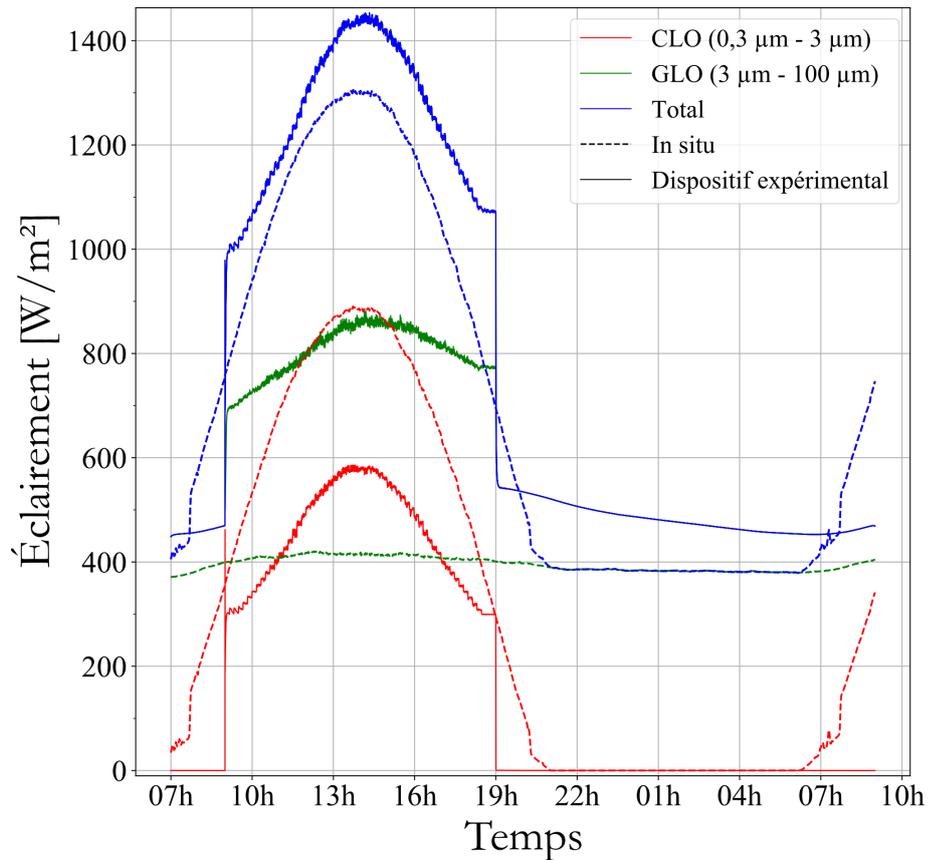


FIGURE 3.7 – Flux radiatif incident, avec la répartition courte (CLO) et grande (GLO) longueur d'onde, mesuré à l'intérieur du dispositif expérimental et comparé à celui mesuré en conditions réelles.

positif augmente très légèrement de $450 W.m^{-2}$ à $470 W.m^{-2}$ du fait de l'augmentation de la température ambiante. Lorsque le simulateur solaire s'allume à 9 h, l'éclairement croît soudainement avec l'augmentation brusque du rayonnement CLO mais aussi GLO. Elle augmente ensuite progressivement pour atteindre son maximum de $1455 W.m^{-2}$ aux alentours de 14 h puis décroît avec la diminution du rayonnement CLO. À 19 h, lorsque le simulateur solaire s'éteint, l'éclairement chute de $1080 W.m^{-2}$ à $545 W.m^{-2}$ puis décroît lentement pendant la phase nocturne jusqu'à $450 W.m^{-2}$.

Les sauts d'intensité sont dus à la régulation de l'intensité de la lampe qui ne permet pas une variation continue de 0% à 100%, l'allumage et l'extinction se faisant directement à environ 50% de l'intensité nominale.

On constate que l'éclairement total imposé en enceinte est légèrement supérieur à l'éclairement réel. Il existe aussi des différences entre les deux en termes de répartition spectrale (Table 3.4). L'éclairement **CLO** cumulé sur 24 h en conditions réelles est un peu plus d'une fois et demi supérieur à celui mesuré à l'intérieur de l'enceinte. Pour l'éclairement **GLO** l'inverse est constaté : celui mesuré à l'intérieur de l'enceinte est environ une fois et demi supérieur à celui mesuré en conditions réelles.

Comme le rayonnement **GLO** subit aussi un saut d'intensité lorsque le simulateur s'allume, il paraît vraisemblable qu'une partie du rayonnement dans cette gamme de longueur d'onde provienne directement de l'échauffement de la lampe.

	Énergie reçue pendant 24 h [kWh.m ⁻²]	
	<i>Conditions réelles</i>	<i>Dispositif expérimental</i>
CLO	7,5	4,5
GLO	9,5	14,8
TOTAL	17	19,3

TABLE 3.4 – Éclairement cumulé sur 24h.

3.4 Bilan thermique de surface

3.4.1 Sans arrosage

Le bilan thermique de la surface extérieure d'une toiture (sans arrosage) est illustré Figure 3.8.

Il s'écrit :

$$S + L = S_{ref} + L_{up} + H + V_0 \quad (3.1)$$

avec S le rayonnement incident **CLO**, L le rayonnement incident **GLO**, S_{ref} le rayonnement **CLO** réfléchi par la surface, L_{up} la radiosité **GLO** de la surface, H les échanges convectifs entre la surface et l'atmosphère et V_0 le flux conductif absorbé par la surface. Or, on a :

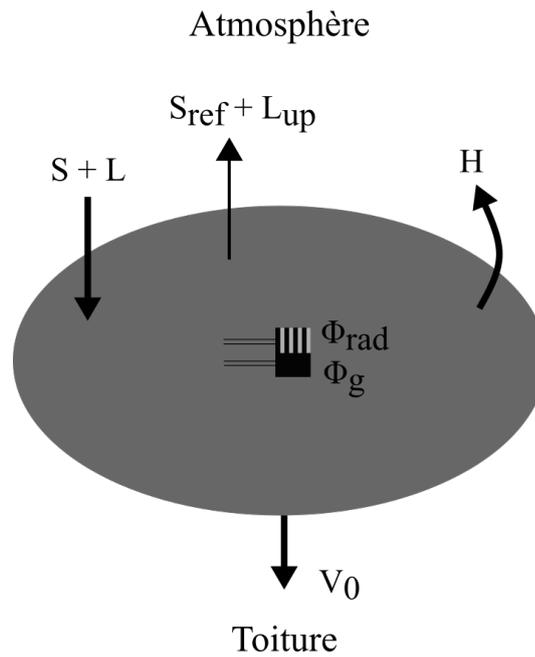


FIGURE 3.8 – Bilan thermique de la surface supérieure des échantillons de toiture et son instrumentation.

$$S_{ref} = \alpha S \quad (3.2)$$

$$L_{up} = (1 - \epsilon)L + \epsilon\sigma T_s^4 \quad (3.3)$$

avec α et ϵ respectivement l'albédo et l'émissivité de la surface, T_s la température de surface et σ la constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$). On peut donc réécrire le bilan thermique de la façon suivante :

$$(S + L) - (\alpha S + (1 - \epsilon)L + \epsilon\sigma T_s^4) = H + V_0 \quad (3.4)$$

$$R_n = H + V_0 \quad (3.5)$$

avec R_n le rayonnement net reçu par la surface. Pour caractériser le comportement thermoclimatique de la toiture, il est nécessaire de connaître l'évolution de ces trois

grandeurs (R_n , V_0 , H) pendant toute la durée de l'expérience. La suite de cette section présente la méthode employée pour déterminer chacune des grandeurs.

Rayonnement net

Pour déterminer l'évolution du rayonnement net, il est nécessaire de connaître l'évolution de la température de surface et du rayonnement incident courte et grande longueur d'onde pendant toute la durée des expérimentations, ainsi que les propriétés optiques (albédo et émissivité) de la surface des échantillons.

Le flux radiatif incident moyen est, quant à lui, mesuré à l'aide d'un capteur radiatif permettant de mesurer le rayonnement sur une bande spectrale allant de $0,3 \mu\text{m}$ à $100 \mu\text{m}$ et de surface identique à celle de l'échantillon de toiture (disque de 16 cm). Cette mesure est réalisée dans des conditions climatiques et radiatives identiques à celles imposées pendant les expérimentations sur les échantillons de toiture. On a :

$$\Phi_{rad-moyen} = R_n^{(\alpha=0,05 ; \epsilon=0,95)} = 0,95(S + L - \sigma T_c^4)$$

Soit :

$$S + L = \frac{\Phi_{rad-moyen}}{0,95} + \sigma T_c^4 \quad (3.6)$$

avec $\Phi_{rad-moyen}$ le rayonnement net mesuré par le capteur (dont les propriétés optiques sont : $\alpha = 0,05$ et $\epsilon = 0,95$) et T_c la température du capteur.

Une vitre en borosilicate, transparente pour les CLO mais opaque pour les GLO, est utilisée pour caractériser la part de courte ($0,3 - 3 \mu\text{m}$) et de grande ($3 - 100 \mu\text{m}$) longueur d'onde. Le coefficient de transmission sur la bande spectrale $0,3 - 3 \mu\text{m}$ de la vitre en borosilicate est de $0,9$. Deux mesures sont réalisées, l'une avec et l'autre sans la vitre.

Finalement, la connaissance de l'ensemble de ces grandeurs et de la mesure de température de surface réalisée pendant les expérimentations permet de calculer l'évo-

lution du rayonnement net pendant toute la durée de l'expérience.

Convection

Le flux convectif H est mesuré pendant les expérimentations à l'aide des deux capteurs disposés au centre de la surface. On a :

$$\begin{aligned}\Phi_{rad} &= R_n^{(\alpha=0,05 ; \epsilon=0,95)} = 0,95(S + L - \sigma T_s^4) \\ \Phi_g &= R_n^{(\alpha=0,05 ; \epsilon=0,95)} - H = 0,95(S + L - \sigma T_s^4) - H\end{aligned}\quad (3.7)$$

donc :

$$H = \Phi_{rad} - \Phi_g \quad (3.8)$$

avec Φ_{rad} et Φ_g respectivement le flux radiatif et le flux thermique global mesurés par les capteurs et T_s la température de surface.

À partir de cette mesure et de la différence de température entre la surface et l'air ambiant il est possible d'estimer le coefficient de convection h . La loi de Newton nous donne :

$$H = h(T_s - T_a) \quad (3.9)$$

avec h le coefficient d'échanges convectifs et $(T_s - T_a)$ l'écart de température entre la surface et l'air ambiant.

Conduction

Le flux conductif V_0 est déduit du bilan thermique de surface (équation (3.5)) :

$$V_0 = R_n - H \quad (3.10)$$

Les caractérisations et mesures expérimentales réalisées permettent ainsi de déterminer tous les termes du bilan de surface (équation (3.5)) pour chaque essai sec.

3.4.2 Avec arrosage

Le bilan thermique de la surface extérieure d'une toiture, lorsqu'elle est arrosée, est illustré Figure 3.9.

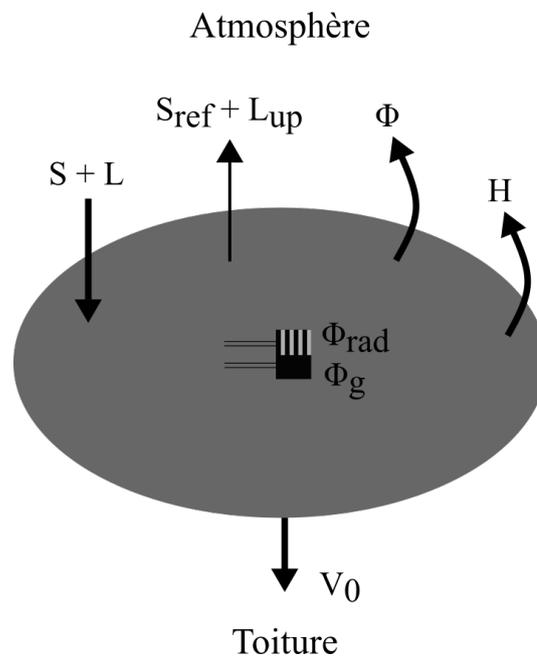


FIGURE 3.9 – Bilan thermique de la surface supérieure des échantillons de toiture lorsqu'elle est arrosée et son instrumentation.

Il s'écrit :

$$(S + L) - (\alpha S + (1 - \epsilon)L + \epsilon\sigma T_s^4) = H + V_0 + \Phi \quad (3.11)$$

$$R_n = H + V_0 + \Phi \quad (3.12)$$

avec Φ le flux rafraîchissant dû à l'évaporation de l'eau ainsi qu'à la différence de température entre l'eau pulvérisée et la surface.

Pour caractériser le comportement thermoclimatique de la toiture, il est nécessaire de connaître l'évolution de ces quatre grandeurs (R_n , V_0 , H et Φ) pendant toute la durée de l'expérience. La suite de cette section présente la méthode employée pour déterminer chacune des grandeurs.

Rayonnement net

Le rayonnement net est déterminé de la même façon que pour les expérimentations sans arrosage (3.4.1). L'unique différence concerne les propriétés optiques de la surface prises en compte pour son calcul, à savoir, l'émissivité de l'eau et l'albédo de la surface lorsqu'elle est arrosée.

Convection

Contrairement aux expérimentations sans arrosage, il n'est plus possible de mesurer le flux convectif H à l'aide des deux capteurs disposés au centre de la surface puisque la présence d'eau sur leur surface fausse la mesure du flux convectif. En revanche, celle de la température de surface n'est pas faussée par l'arrosage. Pour les expérimentations avec arrosage, les échanges convectifs sont donc calculés en utilisant la loi de Newton présentée équation (3.9). Le coefficient h utilisé pour réaliser ce calcul correspond au coefficient de convection thermique moyen estimé à partir des mesures de densité de flux convectif réalisées pendant les quatre expérimentations sans arrosage (6.5).

Conduction

Le flux conductif V_0 est calculé de la façon suivante :

$$V_0 = U_{sec}(T_s - T_{2\text{ cm}}) \quad (3.13)$$

avec T_s la température de surface, $T_{2\text{ cm}}$ celle mesurée à 2 cm de profondeur et U_{sec} la conductance effective de la couche de 2 cm d'épaisseur. Cette conductance effective est estimée pour chacune des quatre structures étudiées à partir des mesures réalisées pendant les expérimentations sans arrosage.

Flux rafraîchissant

Le flux rafraîchissant Φ est déduit du bilan thermique de surface (équation (3.12)) :

$$\Phi = R_n - (H + V_0) \quad (3.14)$$

Il est ensuite possible de différencier la part du flux rafraîchissant imputable à l'évaporation de l'eau (chaleur latente) et celle imputable à la différence de température entre l'eau et la surface (chaleur sensible). Le flux rafraîchissant peut se réécrire de la façon suivante :

$$\Phi = lE + c_e \rho_e \frac{V_e}{t_0} (T_s^a - T_e) \quad (3.15)$$

avec l la chaleur latente de vaporisation de l'eau (2260 kJ.kg^{-1}), E le débit d'évaporation, c_e chaleur spécifique de l'eau ($4,18 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$), ρ_e la masse volumique de l'eau (1000 kg.m^{-3}), V_e la quantité d'eau pulvérisée par aspersion, t_0 la durée entre deux aspersion, T_s^a la température de surface lorsqu'elle est arrosée et T_e la température de l'eau aspergée sur la surface. Dans notre expérience $T_e = T_a$.

Les caractérisations et mesures expérimentales réalisées permettent ainsi de déterminer tous les termes du bilan de surface (équation (3.12)) pour chaque essai.

Chapitre 4

Cas d'étude sans arrosage

Ce chapitre traite le cas d'application de la méthodologie lorsque la surface n'est pas arrosée. L'échantillon utilisé pour ce cas d'étude est celui d'une toiture standard isolée par l'intérieur [ITI](#).

4.1 Résultats expérimentaux

4.1.1 Température et densité de flux de chaleur

Les Figures [4.1](#) et [4.2](#) illustrent l'évolution des températures et des densités de flux de chaleur à différentes profondeurs au sein de l'échantillon de toiture [ITI](#) standard ainsi que l'évolution de la température de l'air à l'intérieur de l'enceinte.

Avant que le simulateur solaire ne s'allume, la température de surface et celle mesurée à 2 cm de profondeur croissent légèrement avec l'augmentation progressive de la température de l'air. Les autres températures mesurées plus en profondeur restent constantes. En ce qui concerne les flux de chaleur, seuls ceux mesurés à 2 cm et à 8 cm au sein de la couche de béton augmentent.

Les premières heures de la phase diurne, qui débute à 9 h, montrent une augmentation rapide des températures et des densités de flux consécutive au rayonnement croissant imposé par la lampe.

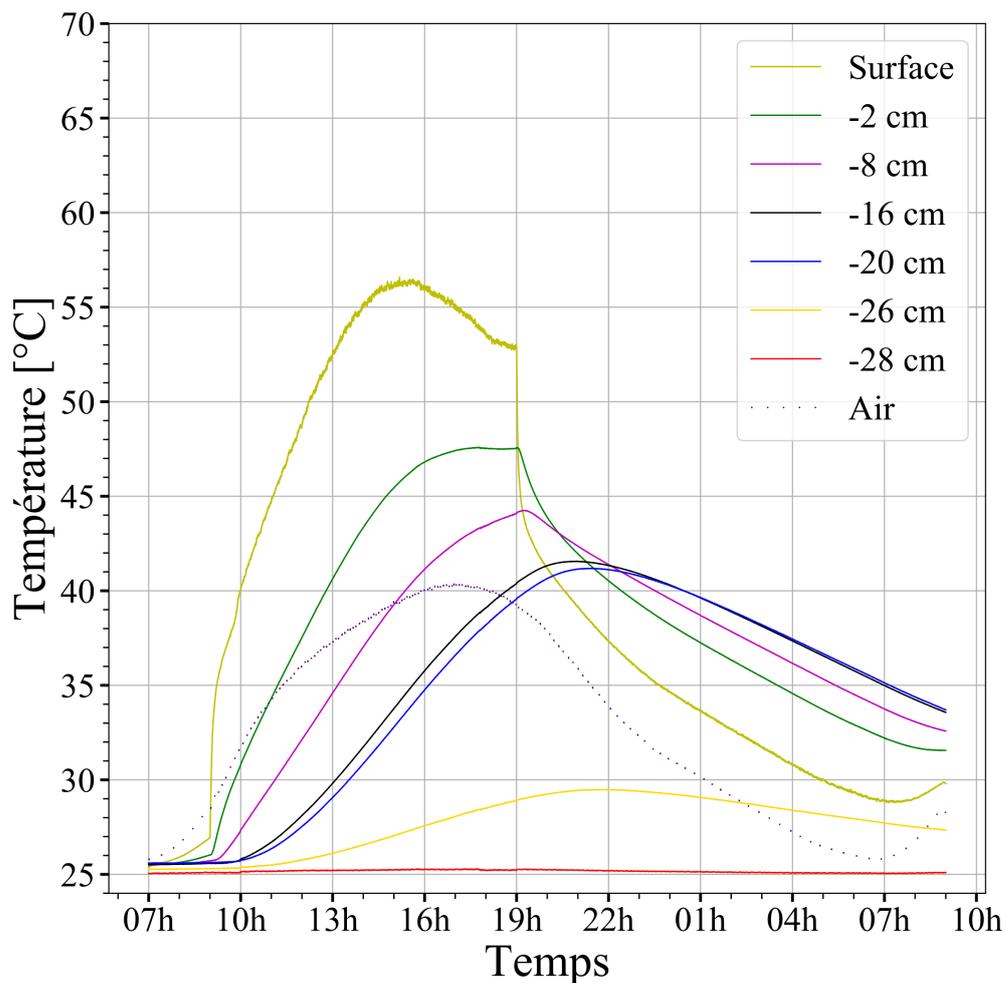


FIGURE 4.1 – Températures mesurées par les thermofluxmètres aux différentes profondeurs.

En surface, la température augmente fortement pour atteindre un maximum de 56,5 °C aux alentours de 15 h 30, un peu après le pic d'éclairement et 1 h 30 avant celui de la température de l'air. Elle diminue ensuite jusqu'à l'extinction du soleil artificiel.

Avec les profondeurs croissantes, on observe un amortissement et un déphasage des pics de température de plus en plus importants. Les températures à 2 cm et à 8 cm de profondeur augmentent rapidement dès la mise en marche du simulateur solaire. La température à 2 cm atteint un maximum de 47,5 °C à 17 h puis reste constante pendant les deux dernières heures de la phase diurne. À 8 cm, un maximum de 44 °C est

atteint quelques minutes après le début de la phase nocturne, donc un peu après 19 h. À 16 cm de profondeur et à 20 cm de profondeur, c'est-à-dire à l'interface béton/isolant, les maximums sont, respectivement, de 41,5 °C à 21 h et de 41 °C à 21 h 30. Les maximums sont atteints pendant la phase nocturne avec seulement 30 minutes d'écart. La température mesurée à 26 cm de profondeur dans l'isolant croît lentement et ne dépasse à aucun moment les 30 °C. Son maximum est atteint à 21 h 40. Les déphasages constatés entre les maximums mesurés aux différentes profondeurs sont dus au temps de diffusion de la chaleur au sein de l'échantillon.

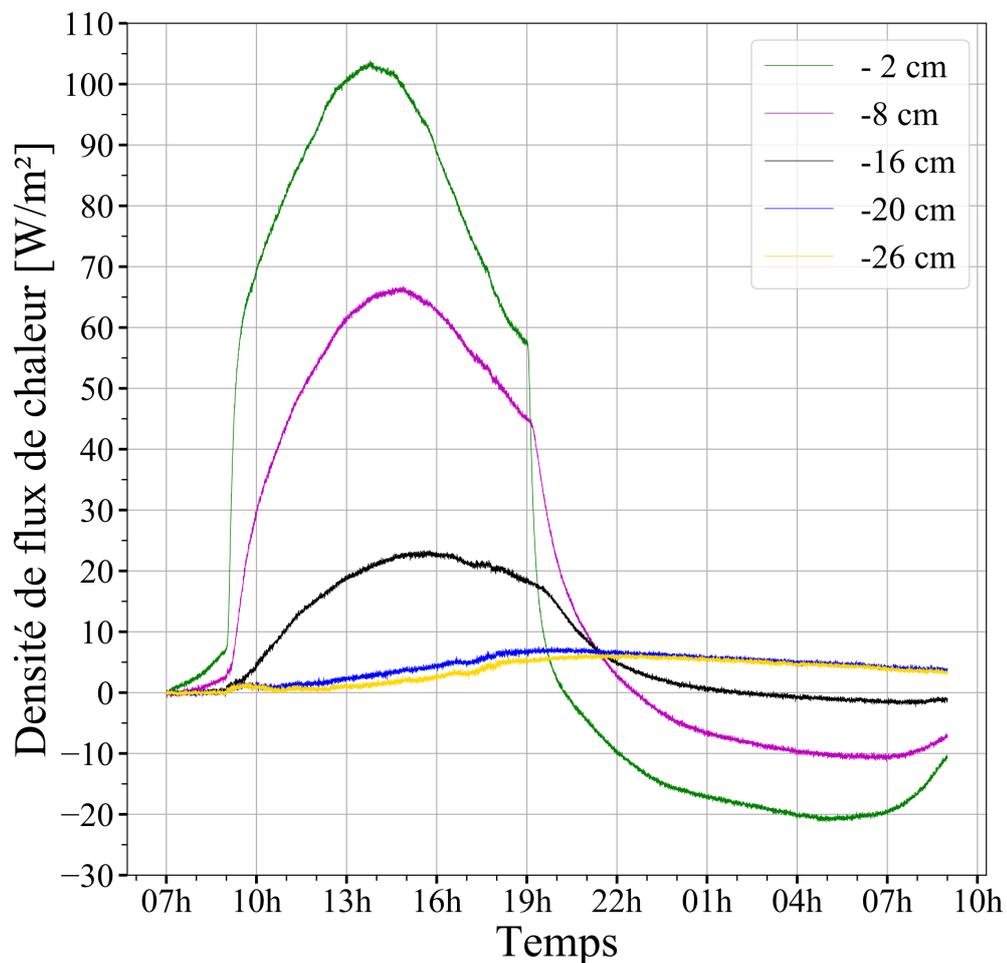


FIGURE 4.2 – Densités de flux de chaleur mesurées par les thermofluxmètres aux différentes profondeurs.

En début de journée, les flux mesurés à 2 cm et 8 cm dans la couche de béton aug-

mentent rapidement pour atteindre respectivement un maximum de 105 W.m^{-2} à 13 h45 et de 67 W.m^{-2} à 14 h 50. Ils diminuent ensuite jusqu'à l'extinction du simulateur solaire. On note que l'écart entre les deux mesures de flux n'est plus que de 12 W.m^{-2} à la fin de la phase diurne alors que cet écart est de 45 W.m^{-2} aux alentours de 13 h. Le flux mesuré à 16 cm est bien moins élevé avec un maximum de 23 W.m^{-2} enregistré à 15 h 45. Pourtant, l'écart de température entre 8 cm et 16 cm de profondeur est presque équivalent à celui entre 2 cm et 8 cm de profondeur. Cela traduit le stockage de la chaleur dans la couche de béton. Les flux mesurés à l'interface et dans l'isolant croissent très lentement ne dépassant jamais $7,5 \text{ W.m}^{-2}$.

Lorsque le simulateur solaire s'éteint, la température de surface chute brutalement : elle perd $10 \text{ }^\circ\text{C}$ en 30 minutes puis décroît plus progressivement pendant le reste de la phase nocturne. Elle devient, en quelques minutes, inférieure à la température mesurée à 2 cm et, un peu après 20 h, à toutes les autres températures mesurées dans la couche de béton. En revanche, elle reste supérieure à la température mesurée dans l'isolant et à la température de l'air pendant toute la nuit. On note que l'écart de température entre la surface et l'air ambiant durant la phase nocturne est presque constant et vaut $3,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

À 2 cm, la température diminue fortement au début de la phase nocturne et devient inférieure aux autres températures mesurées dans la couche de béton à partir de 21 h. Après avoir atteint leur maximum dans les premières heures de la phase nocturne, les trois autres températures mesurées dans le béton décroissent lentement. Un peu après 22 h, on remarque que le gradient de température dans la couche de béton s'inverse : les températures les plus élevées sont mesurées en bas de la couche de béton alors que la température la moins élevée est celle mesurée en surface. On constate aussi qu'aucune des températures mesurées dans l'échantillon ne redescend à $25 \text{ }^\circ\text{C}$ au début de la deuxième journée à 7 h du matin.

Dès l'extinction de la lampe xénon, les flux de chaleur mesurés à 2 cm et 8 cm de profondeur diminuent fortement jusqu'à devenir négatifs, traduisant bien l'inversion du flux dès lors orienté du béton vers l'atmosphère. À 16 cm le flux diminue progressivement puis devient légèrement négatif à partir de 1 h du matin. Le flux mesuré à l'interface béton/isolant (20 cm) et celui mesuré dans l'isolant (26 cm) restent positifs

et diminuent très lentement après avoir atteint leur maximum dans les premières heures de la phase nocturne. Comme le flux mesuré à 26 cm de profondeur est relativement faible pendant la totalité de l'expérience, ne dépassant jamais les 6 W.m^{-2} , on peut conclure qu'une faible quantité de chaleur pénètre à l'intérieur du bâtiment. Ce résultat est similaire à ceux de l'étude de Ramamurthy et al. [90]. Pour trois différentes toitures isolées et de faible albédo, le flux de chaleur qui pénètre dans le bâtiment est compris entre 5 W.m^{-2} et 12 W.m^{-2} .

Finalement, comme l'isolant est situé en dessous de la couche structurelle, la chaleur pénètre facilement dans la toiture. La couche de béton emmagasine donc de la chaleur en journée qu'elle restitue en partie la nuit, mais pas dans sa totalité. Du fait de l'isolant, seule une faible quantité de chaleur pénètre à l'intérieur du bâtiment. Comme la totalité de la chaleur qui pénètre dans la structure n'est pas restituée dans le milieu ambiant et ne pénètre pas non plus dans le bâtiment, cela signifie qu'une partie reste stockée dans la couche de béton.

4.1.2 Bilan thermique de surface

Analysons maintenant indépendamment les différents modes de transfert thermique au niveau de l'interface atmosphère/toiture.

Rayonnement net

Pour la toiture ITI étudiée dans ce chapitre, le rayonnement net ainsi que l'incertitude associée sont présentés Figure 4.3. L'incertitude est calculée à partir de celles associées aux propriétés optiques de la membrane d'étanchéité, à celle de la mesure de la température de surface et à celle de la mesure de l'éclairement CLO et GLO. L'incertitude sur la mesure de température et celle sur les flux radiatifs CLO et GLO est fournie par le constructeur (3.1, incertitude-type de type B) alors que celles sur les propriétés radiatives sont calculées à partir de l'écart-type expérimental (plusieurs séries de mesure avec un mode opératoire équivalent, incertitude-type de type A). L'incertitude-type sur le rayonnement net est alors obtenue en propageant les incertitudes associées aux grandeurs avec lesquelles il est calculé.

Avant le début de la phase d'ensoleillement, entre 7 h et 9 h, le rayonnement net

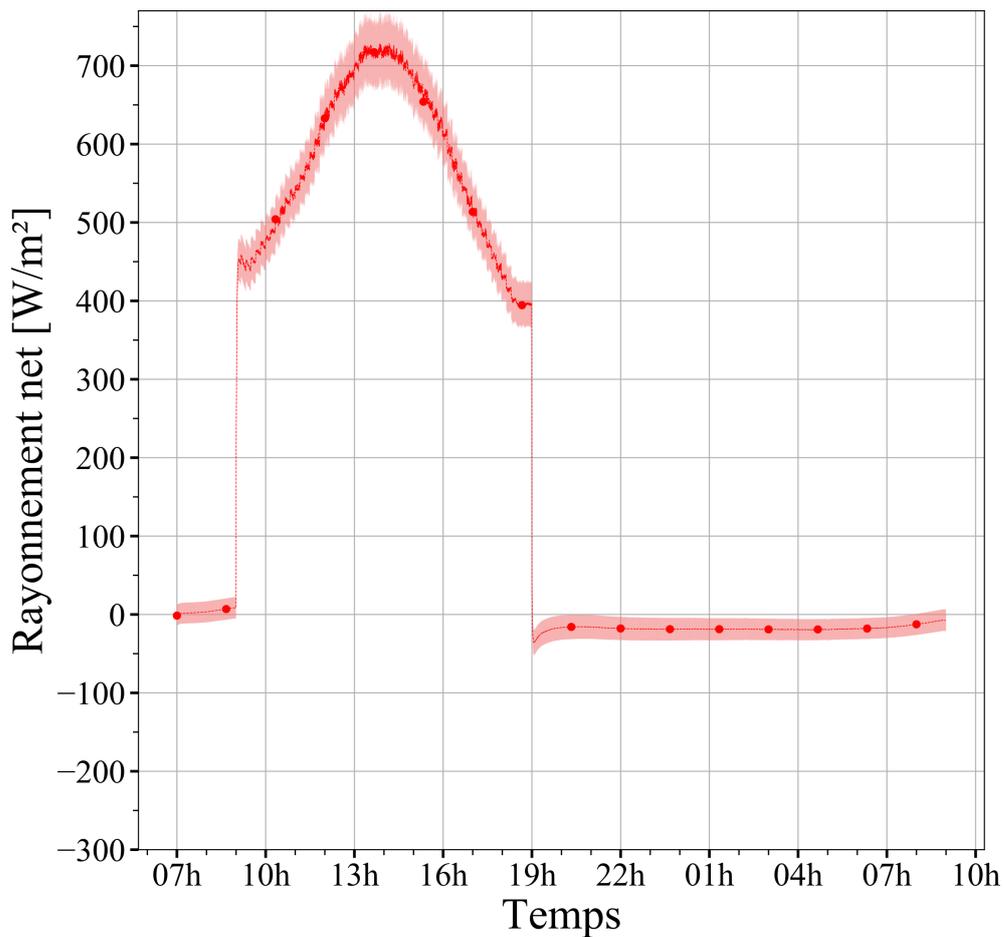


FIGURE 4.3 – Évolution du rayonnement net pour l'échantillon de toiture ITI.

est peu élevé mais positif. Du fait de l'augmentation progressive de la température à l'intérieur du dispositif, le rayonnement ambiant GLO augmente. Puisque le rayonnement net est positif, la surface reçoit plus d'énergie qu'elle n'en émet.

Sur la période de fonctionnement du simulateur solaire entre 9 h et 19 h, le rayonnement net suit l'évolution de l'éclairement, mais aussi de la radiosité impactée par les variations de la température de surface. En effet, on constate que pendant la première heure de la phase diurne, le rayonnement net décroît légèrement. Entre 9 h et 10 h, l'éclairement CLO est presque constant tandis que la température de surface croît soudainement et que la température à l'intérieur du dispositif expérimental croît progressivement. La radiosité GLO est supérieure à l'éclairement GLO. Après avoir atteint un

maximum aux alentours de 14 h, le rayonnement net décroît ensuite jusqu'à l'extinction de la lampe xénon à 19 h.

Lorsque le soleil artificiel s'éteint, le rayonnement net chute et devient, en quelques minutes, négatif puis le reste toute la nuit autour d'une valeur de -25 W.m^{-2} . En l'absence d'éclairement de la lampe xénon, l'éclairement CLO est nul. Durant toute la phase nocturne, la surface est en déficit radiatif : elle émet plus de rayonnement GLO qu'elle n'en reçoit.

Convection

La Figure 4.4 illustre la densité de flux de chaleur échangée par convection entre l'air et la surface de l'échantillon de toiture mesurée par les capteurs de surface. Le signal moyen lissé sur 5 minutes avec son incertitude est présenté Figure 4.5. L'incertitude ($\pm 1\sigma$) correspond à l'écart-type glissant (fenêtre de 5 minutes).

Pendant les deux premières heures de l'expérience, comme la température de l'air est légèrement supérieure à la température de surface, la densité de flux convectif est négative et de faible amplitude.

Lorsque la lampe s'allume, le flux convectif augmente de façon conséquente pendant quelques minutes puis croît progressivement pour atteindre un maximum d'environ 350 W.m^{-2} entre 14 h et 14 h 30, un peu après que le rayonnement net soit maximal. Le flux convectif décroît ensuite progressivement jusqu'à 17 h 45 puis reste constant pendant la dernière heure de la journée.

À 19h, le flux convectif chute fortement simultanément avec l'extinction du simulateur solaire. Aux alentours de 20 h, le flux se stabilise et reste positif et constant pendant toute la phase nocturne, ce qui est cohérent avec les observations précédentes de la température de surface (cf. section 4.1.1).

La Figure 4.6 illustre la densité de flux convectif en fonction de l'écart de température entre l'air et la surface. Les flèches noires et la frise de couleur rendent compte de l'évolution temporelle du flux convectif. Le coefficient de convection moyen sur l'ensemble de la journée est estimé par régression linéaire, pour laquelle on impose une ordonnée à l'origine nulle, comme illustré Figure 4.6. La pente de cette régression cor-

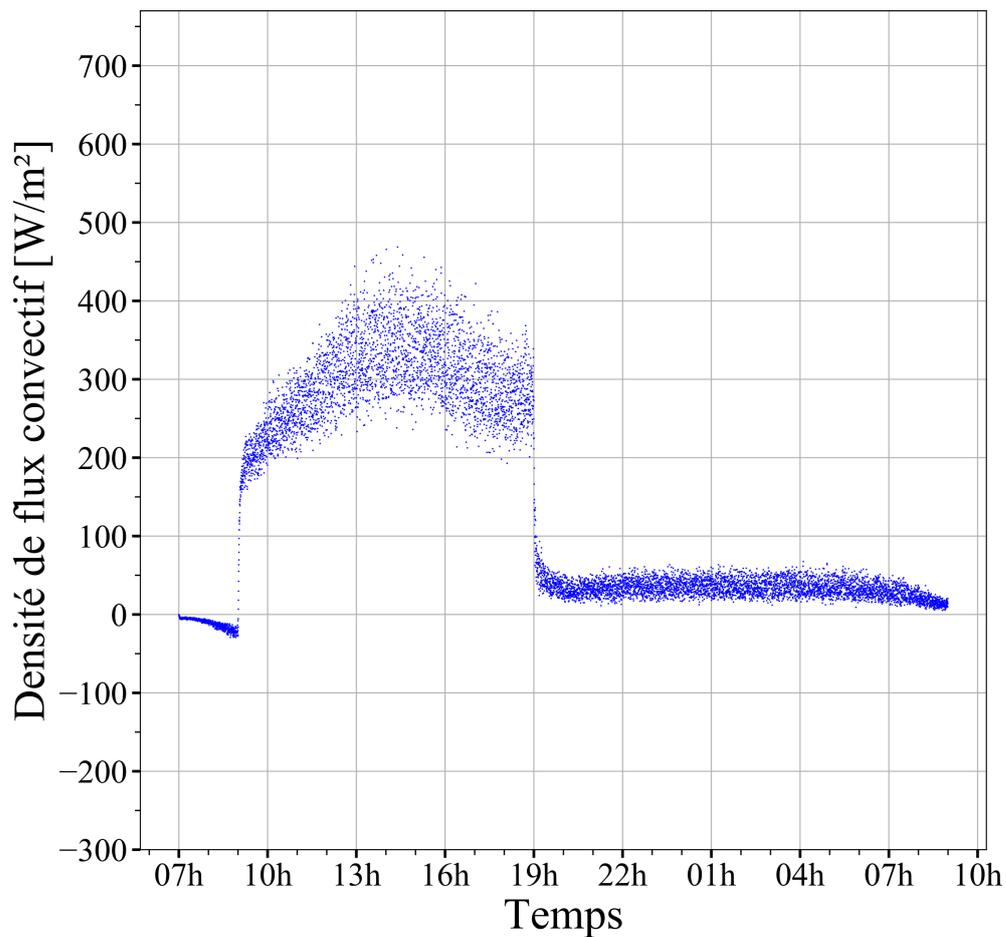


FIGURE 4.4 – Densité de flux convectif mesurée en fonction du temps.

respond, d'après la loi de Newton, au coefficient de convection thermique moyen.

L'expérience débute au point t_1 . Le premier nuage de points couleur bleu cyan en bas à gauche, entre t_1 et t_2 , correspond aux deux premières heures de la journée juste avant que le simulateur solaire ne s'allume, lorsque la température de l'air est supérieure à la température de surface. Le point t_2 correspond à l'allumage du simulateur solaire. Entre l'allumage du simulateur solaire (t_2) et le maximum d'éclairement (t_3), le flux convectif augmente progressivement. Il décroît ensuite jusqu'à l'extinction de la lampe (t_4). Le nuage de points couleur magenta correspond à la phase nocturne. L'expérience se termine en t_5 . On constate un phénomène d'hystérésis qui se manifeste par l'évolution de la température de surface qui ne suit pas la même chemin lors de la montée et la

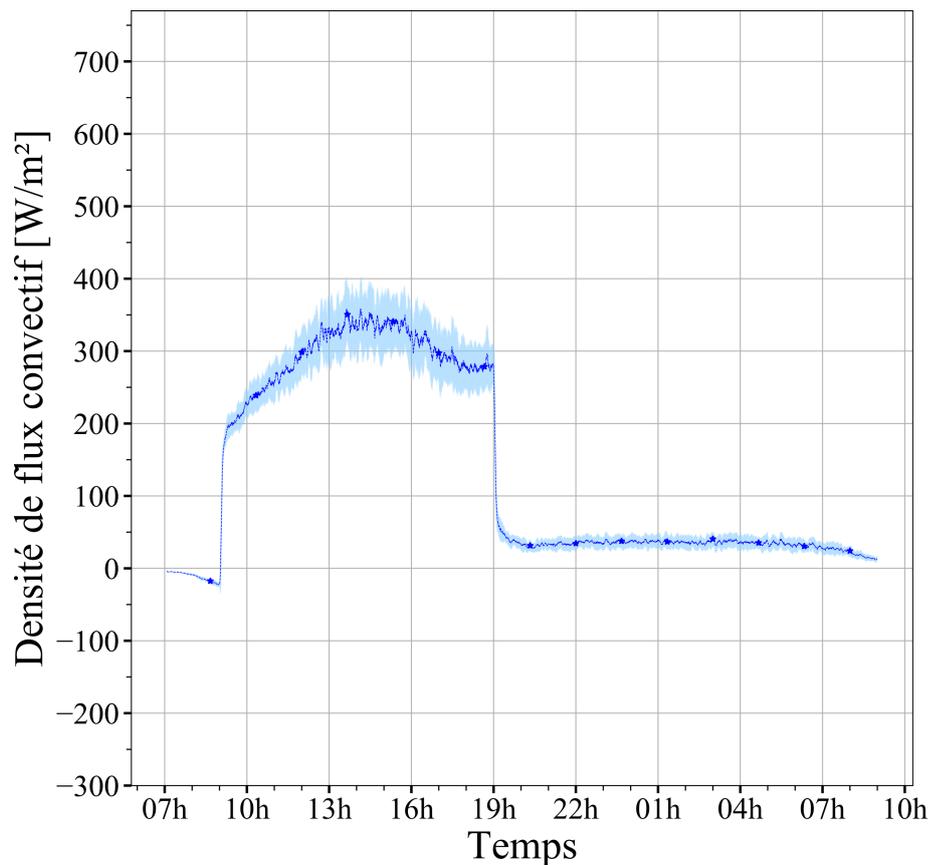


FIGURE 4.5 – Densité de flux convectif moyennée sur 5 minutes et son incertitude.

descente en puissance du simulateur solaire.

La valeur de $20 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ tombe dans la fourchette haute de la convection naturelle pour l'air ($5\text{-}25 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$). Cette valeur est en accord avec plusieurs études de la littérature. Montazeri et al. [91] montrent à l'aide de simulations numériques, que le coefficient de convection thermique en toiture pour des structures isolées dépend grandement de la géométrie des bâtiments, de la vitesse et de la direction du vent. Dépendamment des différentes géométries présentées dans leur étude, le coefficient de convection atteint ou dépasse la valeur de $20 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ pour des vitesses de vent au moins égales à 3 m.s^{-1} . Hagishima et al. [92] trouvent, à l'aide de mesures réalisées sur des toitures plates, des valeurs de coefficient de convection semblables à la nôtre lorsque la vitesse de vent est égale ou supérieure à 4 m.s^{-1} .

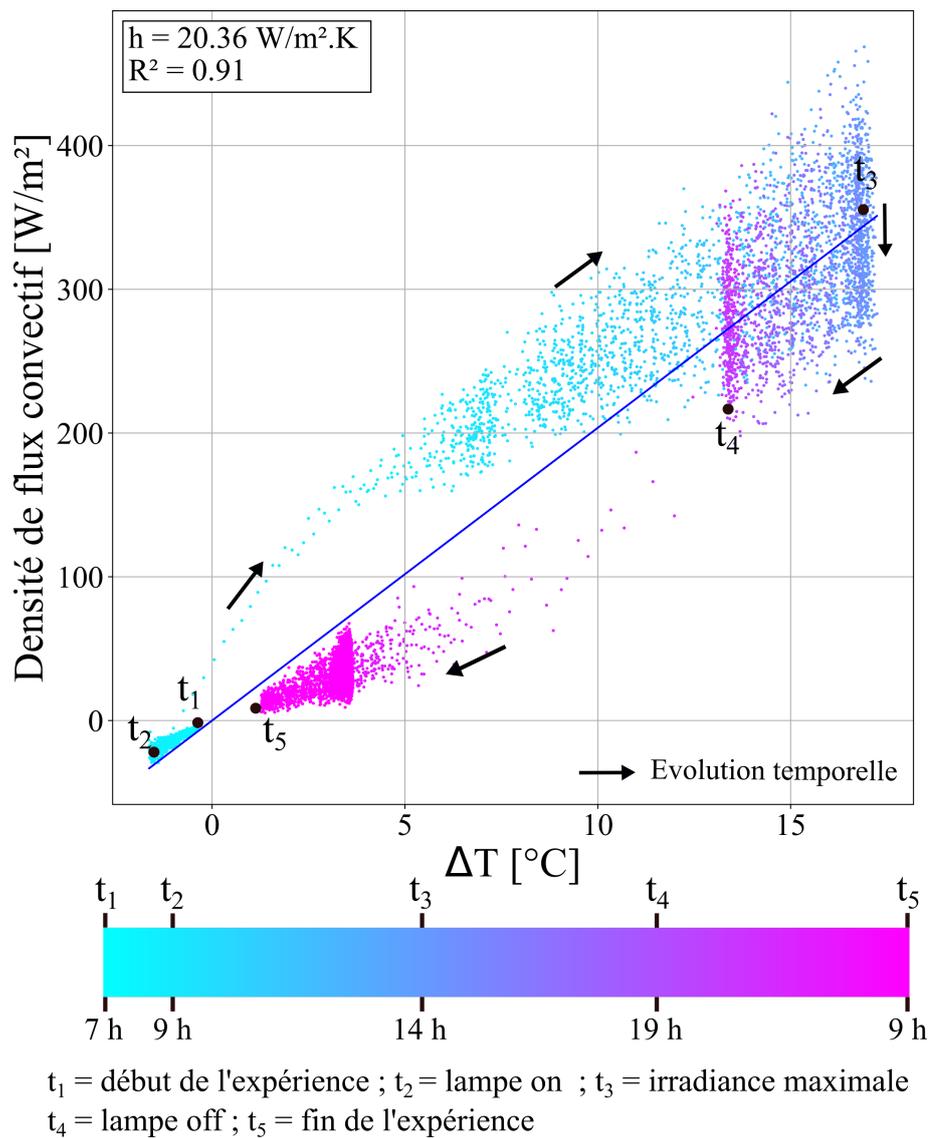


FIGURE 4.6 – Densité de flux convectif mesurée en fonction de la différence de température entre la surface et l'air au cours d'un cycle jour-nuit.

La connaissance du rayonnement net et du flux convectif pendant la totalité de l'expérience permet, à partir de l'équation (3.5), de déduire la densité de flux conductif absorbée par la surface supérieure de l'échantillon de toiture.

Conduction

La densité de flux de chaleur absorbée par la surface, obtenue à partir du résidu du bilan thermique, est présentée Figure 4.7. L'incertitude est calculée en propageant les incertitudes associées au rayonnement net et au flux convectif.

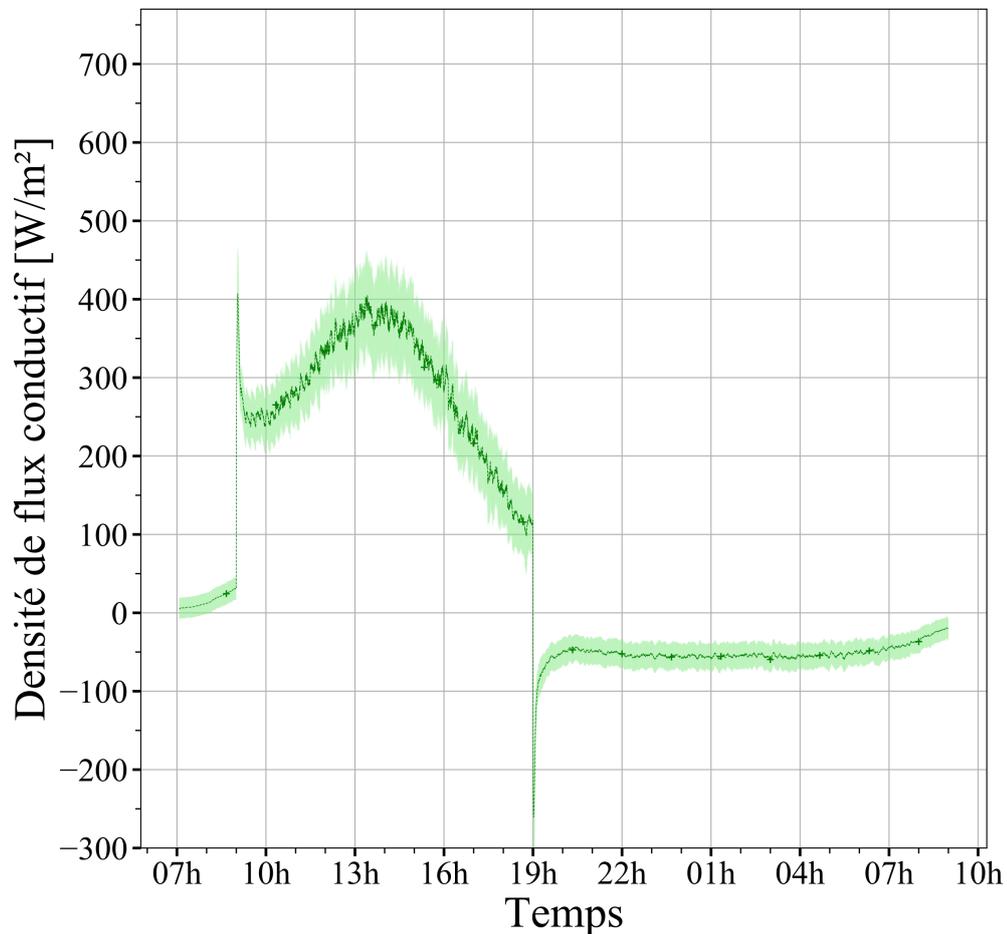


FIGURE 4.7 – Évolution de la densité de flux conduit par la surface de l'échantillon de toiture déduite du bilan thermique.

On constate une phase de stockage entre 7 h et 19 h et une phase de déstockage entre 19 h et 9 h. De 7 h à 9 h, la densité de flux conductif absorbée par l'échantillon est positive puisque la température de surface est légèrement supérieure à la température à 2 cm de profondeur. Lorsque le simulateur solaire s'allume, comme la température de surface augmente brutalement, le flux de chaleur absorbé par la surface augmente

également brutalement. Passée cette augmentation rapide, le flux conductif décroît légèrement avec le rayonnement net. Ensuite, le flux de chaleur croît progressivement jusqu'à un maximum atteint un peu avant celui du rayonnement net. Il décroît ensuite jusqu'à l'extinction du simulateur solaire. Lorsque la lampe s'éteint, le flux de chaleur décroît jusqu'à devenir négatif et le reste pendant toute la phase nocturne. Ces observations sont cohérentes avec l'évolution des températures de surface et à celle mesurée à 2 cm de profondeur.

Finalement, les trois flux intervenant dans le bilan thermique sont présentés Figure 4.8.

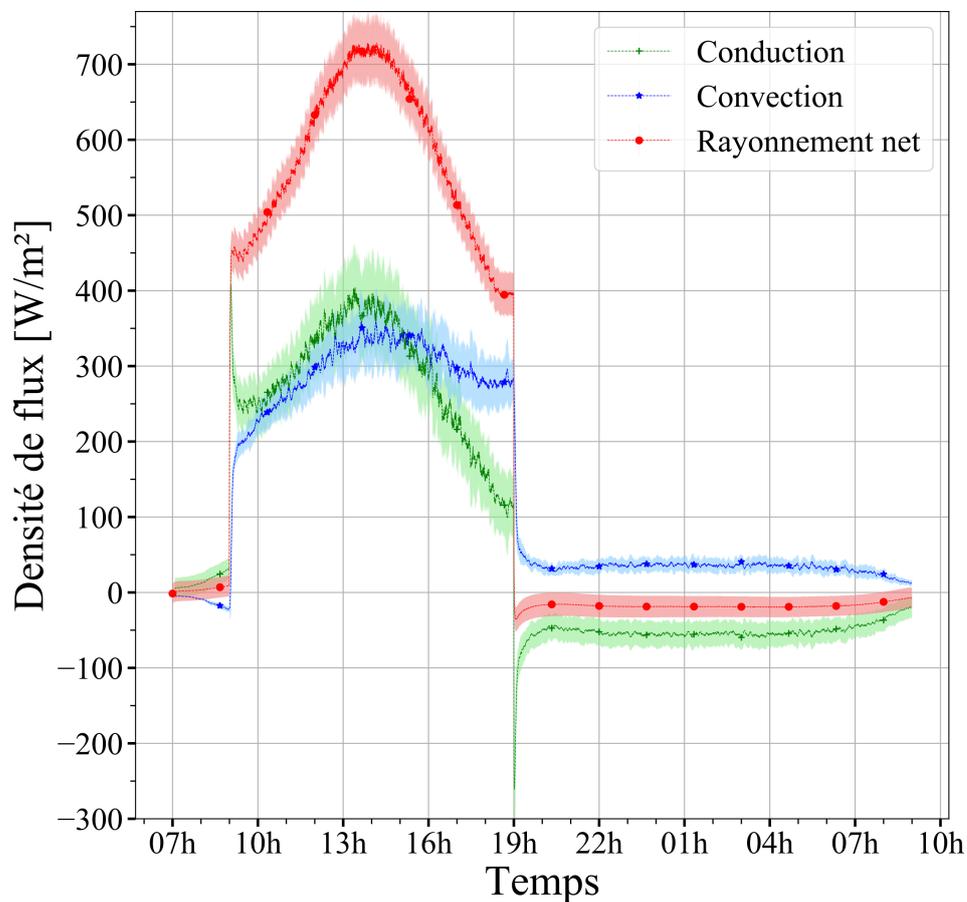


FIGURE 4.8 – Densité de flux en fonction du temps.

En début de journée, lorsque le simulateur solaire s'allume, les apports énergétiques du rayonnement incident pénètrent, en grande partie, par conduction dans la

couche structurelle de la toiture pour atteindre un maximum un peu avant que le rayonnement incident ne soit maximal. Les échanges convectifs augmentent quant à eux de façon plus progressive et atteignent un maximum un peu après que le rayonnement incident soit maximal. Une fois leur maximum atteint, les deux flux commencent à décroître, mais de façon bien plus importante pour le flux conductif dont la valeur est divisée par trois à la fin de la phase diurne à 19 h. Lorsque le simulateur solaire s'éteint, la température de surface chute brutalement et devient inférieure aux températures mesurées en profondeur, mais reste supérieure à la température de l'air. Par conséquent, le flux conductif s'inverse, c'est-à-dire qu'une partie de la chaleur emmagasinée par la couche structurelle en journée est déstockée dans l'atmosphère pendant la phase nocturne. Le flux convectif reste lui positif durant toute la phase nocturne, c'est-à-dire que la toiture continue d'échauffer l'air ambiant à proximité de la surface. Le rayonnement net, relativement faible, reste négatif et constant pendant la totalité de la phase nocturne. Sauf au moment de l'allumage et de l'extinction du simulateur solaire, la dynamique des flux constatée dans notre expérience est similaire à celle d'autres études réalisées en conditions réelles. Effectivement, en journée, les flux atteignent leur maximum dans le même ordre chronologique que dans les études de Takebayashi et al. [47] et Asaeda et al. [93] (le flux conductif atteint son maximum en premier suivi du rayonnement net, puis en dernier, du flux convectif) et leur allure est similaire.

4.1.3 Bilan énergétique

La Figure 4.9 présente sous forme de diagramme de Sankey la répartition de l'énergie cumulée reçue par l'échantillon de toiture ITI standard sur la durée de l'expérience. On s'intéresse à la répartition entre radiativité (rouge), convection (bleu) et conduction et stockage dans la structure ou transmission à travers l'échantillon vers le bâtiment sous-jacent (vert). Le stockage de chaleur est estimé à partir de la différence entre l'énergie qui pénètre par la surface supérieure de l'échantillon (intégrale de la densité de flux conductif de surface) et celle qui sort de la sous-face de l'échantillon.

Sur la totalité de l'énergie reçue pendant l'expérience, soit $19,3 \text{ kWh.m}^{-2}$, environ deux tiers est reçu pendant la phase diurne (rayonnement CLO et GLO) et un tiers pendant la phase nocturne (rayonnement GLO uniquement). En journée, la radiativité de la surface est de $6,8 \text{ kWh.m}^{-2}$ alors qu'elle reçoit $12,5 \text{ kWh.m}^{-2}$. Le rayonnement

ITI standard

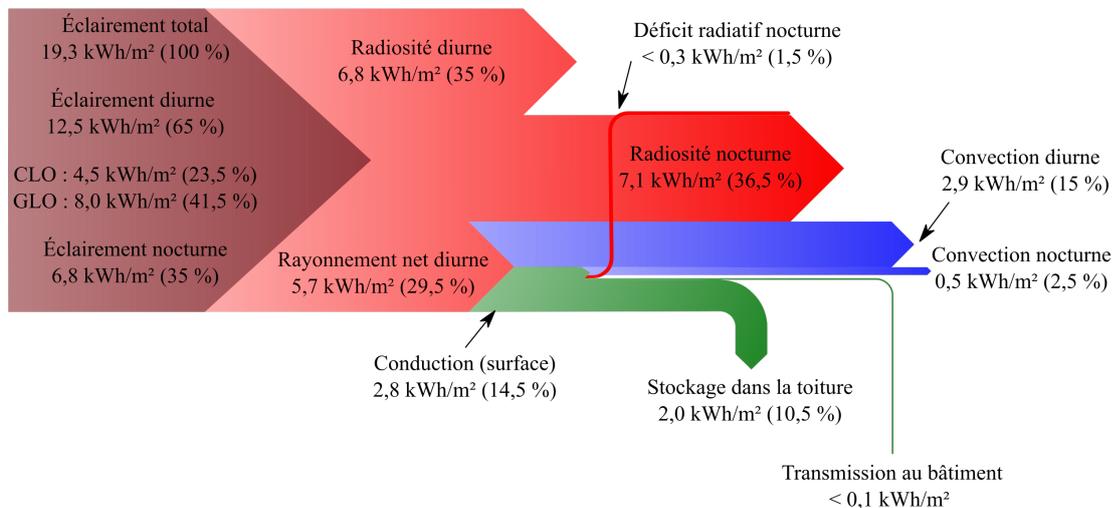


FIGURE 4.9 – Bilan énergétique pour l'échantillon de toiture standard ITI.

net est donc positif : la surface absorbe de l'énergie. Les apports énergétiques absorbés ($5,7 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$) sont soit évacués par convection ($2,9 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$), soit conduits dans les couches profondes de la toiture ($2,8 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$).

La nuit, la radiosité est légèrement plus importante que l'éclairage. Le rayonnement net est donc négatif : la toiture est en déficit radiatif. Une autre partie de la chaleur emmagasinée pendant la journée est restituée vers l'atmosphère par convection ($0,5 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$). Une quantité de chaleur importante reste stockée dans les couches de la toiture, environ 10,5 % de l'énergie totale reçue par la toiture et environ 70 % de l'énergie absorbée par la surface pendant la phase diurne. Seule une très faible quantité de chaleur pénètre dans le bâtiment, inférieure à $0,1 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$, ce qui représente environ 0,5 % de l'énergie totale reçue pendant l'ensemble de la journée par la toiture. Ce résultat est très comparable à celui de Ramamurthy et al. [90]. Pour trois différents types de toiture isolée et de faible albédo, ils estiment que pendant la saison chaude, la quantité de chaleur qui pénètre dans le bâtiment par jour est comprise entre $0,05 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ et $0,07 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$.

4.2 Discussion

Bien que les résultats obtenus dans notre expérience soient cohérents avec ceux de la littérature, on constate certaines différences qui sont discutées dans cette section.

L'amplitude des flux du bilan thermique de surface présentés Figure 4.8 est plus importante comparée à celle des flux du bilan thermique de surface de la toiture en béton de Takebayashi et al. [47] dont l'expérience est réalisée en conditions réelles. Notamment, le rayonnement net est supérieur de 300 W.m^{-2} dans notre cas. On constate aussi que la température de surface est de $12 \text{ }^\circ\text{C}$ inférieure à celle mesurée sur notre échantillon. La nuit, le rayonnement net vaut -25 W.m^{-2} dans notre cas, alors qu'il est inférieur à -50 W.m^{-2} dans leur étude. Dans les deux études, le flux convectif est positif et relativement faible (inférieur à 40 W.m^{-2}) pendant la phase nocturne puis tend vers zéro au début de la journée suivante. En revanche, la nuit, le flux conductif est presque deux fois plus important en valeur absolue que le nôtre (-90 W.m^{-2} vs -50 W.m^{-2}). Des différences similaires sont observées dans l'étude en conditions réelles de Zingre et al. [33]. La température maximale de surface atteinte par leur toiture en béton est de $47 \text{ }^\circ\text{C}$ soit $10 \text{ }^\circ\text{C}$ de moins que dans notre étude. Quant au maximum du flux conductif mesuré au niveau de la surface, il est de 250 W.m^{-2} au maximum donc 150 W.m^{-2} de moins que celui mesuré dans notre expérience. La nuit, le maximum du flux conductif est également plus important en valeur absolue dans leur étude. Enfin, dans les deux études, le flux conductif devient négatif avant le rayonnement net, ce qui n'est pas le cas dans notre expérience.

Bien que les résultats obtenus soient comparables à ceux présentés dans ces deux exemples tirés de la littérature, il apparaît que le flux conductif qui pénètre par la surface supérieure de l'échantillon est systématiquement plus important dans notre expérience. Cette différence peut s'expliquer en partie grâce au rayonnement net qui est relativement important comparé aux autres études du fait de la faible réflectivité solaire de la membrane d'étanchéité ($0,07$ contre $0,34$ et $0,30$ dans les deux études citées précédemment). La surface absorbe donc une plus grande partie du rayonnement incident et s'échauffe davantage. Comme la différence de température avec les couches sous-jacentes est importante, le flux conductif qui pénètre en surface l'est également. D'autre part, le flux conductif devient négatif en même temps que le rayonnement net à cause de l'extinc-

tion soudaine de notre simulateur solaire. Si l'éclairement avait continué à décroître progressivement, le flux conductif aurait probablement aussi changé de signe avec le rayonnement net comme dans les études citées précédemment.

Une partie de la disparité des résultats peut aussi être imputée à la variabilité des conditions climatiques entre les différentes études. Les expériences présentées dans notre étude sont réalisées dans des conditions caniculaires, la température de l'air dépasse légèrement les 40 °C en journée et les 25 °C la nuit. Les autres études citées précédemment sont aussi réalisées pendant la saison chaude, mais la température de l'air ne dépasse que rarement les 35 °C en journée.

Deux limites notables du dispositif expérimental peuvent aussi expliquer une partie des différences constatées. La nuit, comme l'ensemble du dispositif expérimental est maintenu à la température de l'air (entre 39 °C quand la lampe s'éteint et 25 °C à 7 h du matin), le refroidissement radiatif est moins important comparé à la réalité, ce qui peut expliquer les différences d'amplitude des flux nocturnes entre les études de terrain et notre étude en laboratoire. Un refroidissement radiatif plus important aurait pour conséquence d'abaisser plus rapidement la température de surface. Dans le cas de la structure étudiée dans ce chapitre et de son impact sur le microclimat local, on peut supposer qu'une quantité plus importante de chaleur (stockée en journée dans le béton) serait déstockée la nuit.

La deuxième limite concerne la condition en température imposée sur la face inférieure de l'échantillon (côté bâtiment) qui est directement, par contact, maintenue à 25°C. En réalité, la climatisation permet d'imposer une température de l'air fixe mais pas une température de paroi fixe. Ainsi, nous n'observons qu'une oscillation très faible de la température de surface intérieure. Il semblerait que dans les expériences réalisées en conditions réelles cette oscillation soit plus importante (de quelques degrés) comme par exemple dans l'étude d'Hernández-Pérez [94].

4.3 Conclusion

La méthodologie proposée a été appliquée à un cas d'étude, à savoir une toiture de faible albédo isolée par l'intérieur. Elle renseigne sur la dynamique du comportement

thermoclimatique de la structure.

Pendant la phase diurne, comme la couche superficielle de la toiture est de faible albédo, une partie importante du rayonnement incident est absorbée. Cela a pour conséquence d'augmenter la température de surface ce qui induit des échanges convectifs relativement importants en journée. Comme l'isolant se situe en dessous de la couche de béton, une partie de l'énergie absorbée par la surface est conduite et stockée dans celle-ci. Pendant la phase nocturne, une partie de cette quantité de chaleur est restituée dans l'atmosphère par l'intermédiaire des échanges convectifs. Cette typologie de toiture contribue donc à l'ICU nocturne puisqu'elle chauffe l'air extérieur à proximité de la toiture. D'autre part, on constate qu'une grande quantité de chaleur reste stockée dans le béton. Cela signifie que, une fois la vague de chaleur terminée, la toiture continuera d'échauffer l'air ambiant en déstockant toute la chaleur emmagasinée pendant la canicule. La couche de béton joue donc un rôle de réservoir de chaleur. Ce type de toiture peut donc contribuer à augmenter l'inertie thermique de la ville. Enfin, vu les caractéristiques de la couche isolante, il n'est pas surprenant que seule une faible quantité de chaleur pénètre dans le bâtiment.

Le chapitre suivant propose d'appliquer la même méthodologie aux quatre échantillons de toiture décrits section 3.2 afin de comparer leur comportement thermoclimatique.

Chapitre 5

Comportement thermoclimatique de différentes toitures sèches

Ce chapitre est dédié à l'étude du comportement thermoclimatique des quatre structures de toiture présentées à la section 3.2 lorsqu'elles sont soumises à des conditions caniculaires et sans arrosage superficiel. Les structures ainsi que les propriétés thermiques des couches qui les composent sont présentées section 3.2. Les résultats sont obtenus en appliquant strictement la même méthodologie que celle présentée dans le chapitre précédent. Sur les quatre structures, deux sont isolées par l'intérieur, c'est-à-dire que l'isolant est situé en dessous de la couche structurelle, et les deux autres sont isolées par l'extérieur. Chacune des deux configurations (ITE et ITI) est étudiée dans le cas d'une toiture standard et dans le cas d'une toiture réfléchissante, c'est-à-dire avec un albédo de surface élevé. L'objectif est de comparer leur contribution au climat urbain local en période caniculaire. Plus précisément, le but est d'observer comment les échanges de chaleur entre l'air extérieur, la toiture et le bâtiment sous-jacent sont modifiés lorsque la place de l'isolant dans la structure varie et lorsque l'albédo de la couche superficielle augmente.

Ce chapitre débute par la présentation des résultats issus des mesures recueillies par l'ensemble des capteurs pendant les expérimentations. La suite discute, à l'aide des bilans thermiques, de l'impact des quatre structures sur l'échauffement urbain.

5.1 Résultats expérimentaux

5.1.1 Température et densité de flux de chaleur

Impact de la position de l'isolant

La Figure 5.1 illustre l'évolution des températures et des densités de flux de chaleur à différentes profondeurs dans les deux échantillons de toiture standard. On compare ainsi uniquement l'impact de la configuration de l'isolant.

Pour les deux échantillons, seules les températures mesurées en surface et à 2 cm de profondeur commencent à augmenter pendant les deux premières heures de l'expérience avant que le simulateur solaire ne s'allume. On remarque une légère différence entre les deux structures : la température de surface et celle à 2 cm augmentent comme la température de l'air dans le cas de la toiture ITE. Pour la toiture ITI, la température de surface augmente moins rapidement que la température de l'air et la température à 2 cm de profondeur n'augmente que très légèrement. Dans les deux cas, les températures mesurées plus en profondeur restent constantes aux alentours de 25 °C. Pendant ces deux premières heures, l'ensemble des flux mesurés aux différentes profondeurs dans la structure ITE sont nuls, alors que ceux mesurés à 2 cm et à 8 cm de profondeur dans la structure ITI commencent à augmenter.

Lorsque le simulateur solaire s'allume à 9 h, la température de surface augmente significativement dans les deux cas. Cependant, on observe une nette différence : la température de surface croît très fortement pendant presque une heure pour la structure ITE alors que cette augmentation ne dure que quelques minutes pour la toiture ITI. Ensuite, elle croît de façon plus progressive pour atteindre un maximum de 67 °C aux alentours de 14 h 30 pour l'échantillon ITE et de 56 °C aux alentours de 15 h 30 pour l'échantillon ITI. La température de surface maximale est donc plus élevée de 11 °C dans le cas de la configuration ITE. Dans les deux cas, après avoir atteint son maximum, la température de surface diminue jusqu'à l'extinction du simulateur solaire à 19 h. Cette diminution de température est de quelques degrés à peine pour la structure isolée par l'intérieur alors qu'elle est de 10 °C environ pour l'autre échantillon. On note que la différence de température de surface entre les deux structures est du même ordre de grandeur que celle mesurée par Choidis et al. [15] (environ 9 °C) bien que l'étude

compare une toiture isolée par l'extérieur avec une toiture sans isolant.

Pour les températures mesurées plus en profondeur, seule la température à 2 cm augmente de façon importante pour l'échantillon **ITE** standard. À partir de 8 cm de profondeur (interface isolant/béton), l'ensemble des températures n'augmente que très progressivement, ne dépassant jamais les 28 °C. À l'inverse, dans le cas de la toiture isolée par l'intérieur, toutes les températures mesurées dans la couche de béton augmentent pendant la phase diurne. La température mesurée à 26 cm dans l'isolant n'augmente que de quelques degrés.

En journée, le flux de chaleur mesuré aux différentes profondeurs dans l'échantillon **ITE** est faible comparé à celui mesuré dans l'échantillon **ITI**. En effet, à 2 cm de profondeur, il est environ sept fois plus important dans l'échantillon isolé par l'intérieur. Plus en profondeur, le flux de chaleur ne dépasse pas les 10 W.m⁻² pour la structure **ITE**. Pour la structure **ITI**, le flux de chaleur mesuré dans la couche de béton est important, environ 100 W.m⁻² à 2 cm de profondeur. On remarque que la densité de flux de chaleur diminue fortement entre le haut et le bas de la couche de béton malgré un fort gradient de température : cette différence est due au stockage de la chaleur dans la couche de béton.

Pour les deux structures, lorsque le simulateur solaire s'éteint à 19 h, les températures de surface et à 2 cm diminuent brutalement. Plus en profondeur, les températures commencent à décroître un peu plus tard pendant la phase nocturne et avec un léger déphasage (plus la température est mesurée en profondeur, plus elle commence à décroître tard dans la nuit). On remarque cependant des différences importantes de comportement entre les deux structures.

Pour la structure **ITE**, une heure après l'extinction de la lampe, les températures de surface et à 2 cm sont presque égales à la température de l'air et elles le restent pendant toute la phase nocturne (bien que la température à 2 cm devienne légèrement supérieure à la température de surface à partir de 1 h du matin). Ce n'est qu'à partir de 4 h du matin que la température de surface devient inférieure aux températures mesurées plus en profondeur, mais de seulement 1,5 °C au maximum à la fin de la nuit.

Pour la structure **ITI**, lorsque le simulateur solaire s'éteint, la température de sur-

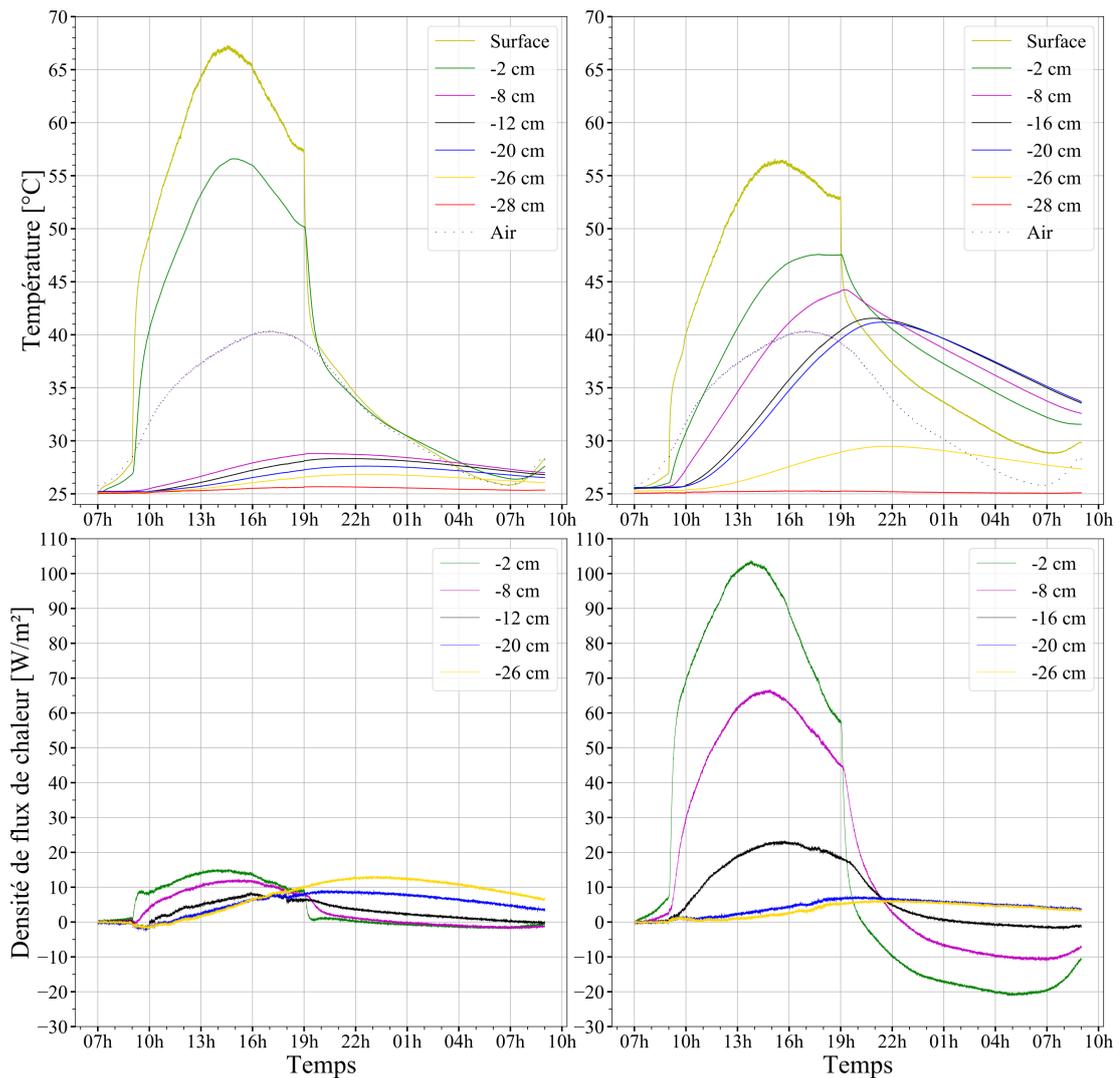


FIGURE 5.1 – Températures et densités de flux de chaleur mesurées à différentes profondeurs dans les deux échantillons de toiture standard, ITE à gauche et ITI à droite.

face devient rapidement inférieure aux autres températures mesurées dans la couche de béton tout en restant supérieure à la température de l'air d'environ 4 °C pendant toute la phase nocturne. On remarque aussi que le gradient de température change de sens : à partir de 22 h les températures mesurées en bas de la couche de béton sont plus importantes que celles mesurées en haut ou en surface. Cette inversion de gradient n'est pas constatée dans le cas de la structure ITE. On remarque aussi que la totalité de la structure isolée par l'extérieur revient presque dans son état initial au bout de 24 h. C'est-à-dire

que, après 24 h d'expérimentation, toutes les températures mesurées dans l'échantillon **ITE** sont comprises entre 25 °C et 27 °C contrairement à l'échantillon **ITI** pour lequel les températures sont comprises entre 25 °C et 35 °C. Ce résultat met en évidence la forte inertie de la structure **ITI** par rapport à l'**ITE**.

Les observations réalisées sur les températures nocturnes sont cohérentes avec les courbes de flux de chaleur. Pendant la nuit, le flux de chaleur mesuré aux différentes profondeurs dans l'échantillon **ITE** reste faible. Le flux mesuré dans la couche isolante (-2 cm) et à l'interface isolant/béton (-8 cm) devient rapidement nul puis négatif de seulement quelques watts. Dans la couche de béton, le flux de chaleur est légèrement plus important à 26 cm de profondeur : une partie de la chaleur absorbée par la surface en journée continue de diffuser progressivement à l'intérieur du bâtiment. Dans le cas de la structure **ITI**, le flux de chaleur mesuré en haut de la couche de béton à 2 cm et 8 cm de profondeur devient rapidement négatif : une partie de la chaleur emmagasinée la journée par la couche de béton commence à être restituée dans l'atmosphère. Le flux mesuré à l'interface béton/isolant (-20 cm) et dans l'isolant à 26 cm de profondeur reste légèrement positif. Comme pour la structure **ITE**, une faible quantité de chaleur pénètre jusqu'à l'intérieur du bâtiment.

Un point important est à noter en ce qui concerne la configuration **ITE**. La quantité de chaleur totale qui a traversé l'échantillon à 2 cm est légèrement inférieure à celle mesurée à 26 cm. Cette différence pourrait être imputable à l'incertitude des capteurs de flux et/ou à une fuite thermique à travers l'isolation latérale de l'échantillon qui apporterait un flux de chaleur supplémentaire. En effet, le gradient de température entre le béton et l'air est plus important que pour l'échantillon **ITI**, atteignant jusqu'à 10°C à 8 cm de profondeur et 14°C à 26 cm de profondeur au moment du pic de température de l'air. Une mesure de la densité de flux de chaleur transverse réalisée à l'aide d'un thermofluxmètre fixé sur la surface latérale de l'échantillon à 25 cm de profondeur relève une densité de flux pénétrant dans l'échantillon atteignant jusqu'à 4 W.m⁻². Les densités de flux mesurées en deçà de la couche d'isolant sont donc vraisemblablement légèrement surestimées de quelques W.m⁻².

Cette analyse des températures et des densités de flux de chaleur met en lumière l'impact de l'isolant sur le comportement thermique des deux structures. Du fait de

l'isolant, la structure **ITE** empêche la chaleur de pénétrer dans les couches profondes de la toiture ce qui engendre une augmentation importante de sa température de surface. La faible quantité de chaleur absorbée pendant la phase diurne est progressivement transmise jusqu'à l'intérieur du bâtiment pendant la phase nocturne. Au contraire pour la configuration **ITI**, le flux de chaleur pénètre plus facilement dans la toiture pendant la phase diurne ce qui entraîne un échauffement de la surface moins important, mais un échauffement global de toute la couche de béton. Une quantité de chaleur importante est stockée dans la couche de béton dont une partie est restituée la nuit. La quantité de chaleur qui est transmise jusqu'à l'intérieur du bâtiment est moins importante que pour la toiture **ITE**.

Impact de l'albédo

La Figure 5.2 illustre l'évolution des températures et des densités de flux de chaleur pour les deux échantillons de toiture réfléchissante. Globalement, l'allure des courbes est similaire à celle obtenue pour les échantillons standards mais l'amplitude des températures et des flux est moins importante.

Pour les deux configurations, l'augmentation de l'albédo de la couche superficielle permet une réduction importante des températures de surface et à 2 cm de profondeur. Pour la toiture **ITE**, cette réduction est de presque 13 °C en surface et de 10 °C à 2 cm de profondeur alors qu'elle est de 8 °C en surface et de 5 °C à 2 cm de profondeur pour la toiture **ITI**. Les températures mesurées plus en profondeur au sein du béton de la structure **ITI** sont aussi impactées avec une réduction de 4 °C alors que l'ensemble des températures mesurées dans la couche de béton de la structure **ITE** chutent d'à peine 1 °C.

Lorsque la couche isolante est placée en dessous de la couche structurelle (**ITI**), l'augmentation de l'albédo permet de réduire de façon importante la quantité de chaleur qui pénètre dans l'échantillon. En effet, comparées à la structure standard, les densités de flux de chaleur mesurées dans la couche de béton sont divisées par deux pendant la phase diurne et la phase nocturne. Lorsque le simulateur solaire s'éteint, la température de surface chute brutalement, mais comme pour la toiture standard, n'atteint jamais la température de l'air. En effet, lorsque la lampe s'éteint, le flux de chaleur au sein de la

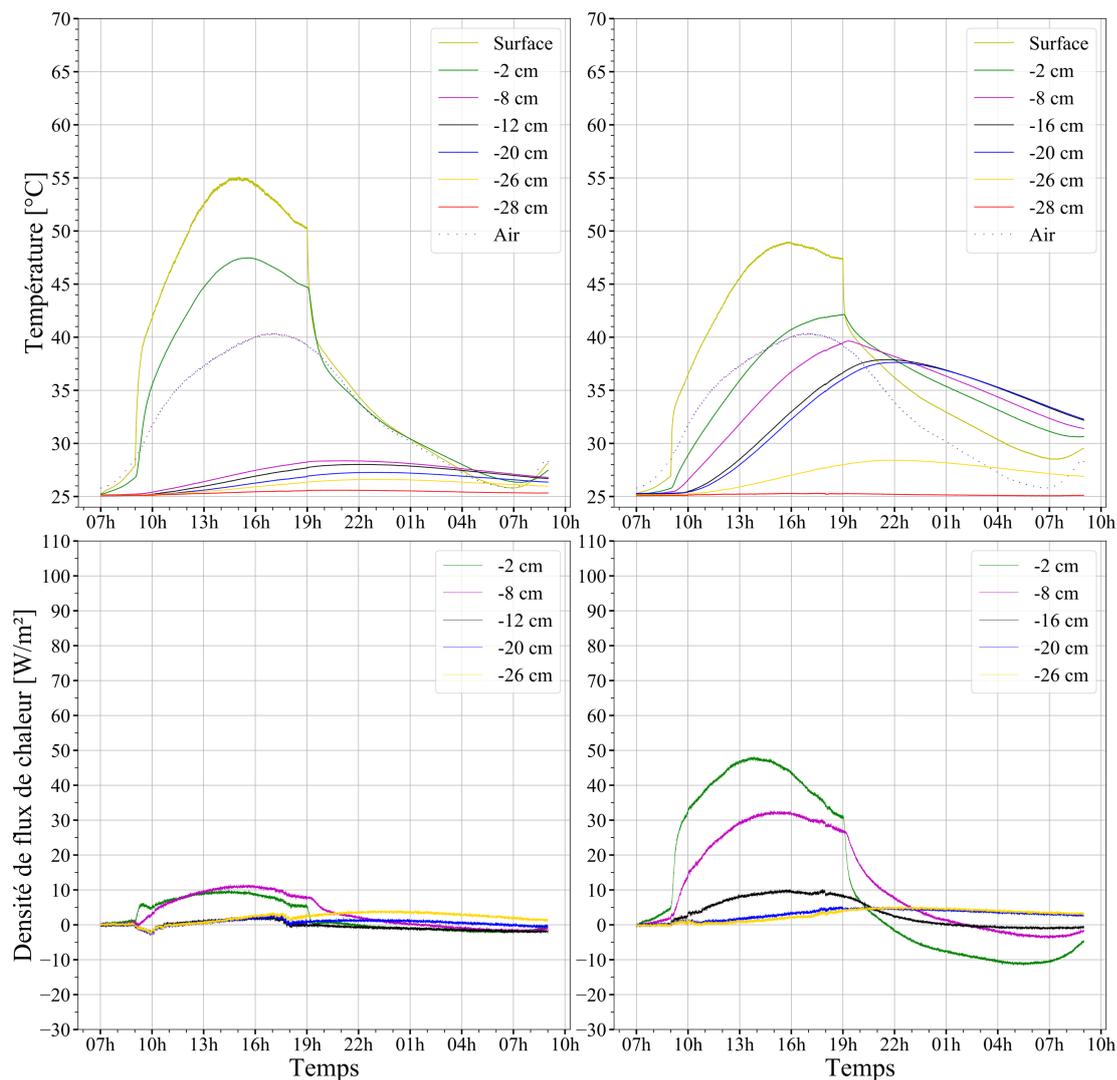


FIGURE 5.2 – Températures et densités de flux de chaleur mesurées à différentes profondeurs dans les deux échantillons de toiture réfléchissante, ITE à gauche et ITI à droite.

couche de béton s'inverse, maintenant ainsi des températures supérieures à la température de l'air dans le béton. En revanche, on constate une légère différence entre les deux structures ITI : l'écart entre la température de l'air et la température de surface pendant la phase nocturne est légèrement plus important pour la toiture standard comparée à la toiture réfléchissante.

Pour la toiture ITE, l'augmentation de l'albédo de la couche superficielle permet

aussi de réduire le flux de chaleur qui pénètre dans la toiture, mais dans une moindre mesure. On constate aussi que le flux de chaleur qui est transmis au bâtiment pour cette configuration est très faible, voir négligeable. Lorsque le simulateur solaire s'éteint, les températures de surface et à 2 cm de profondeur chutent brutalement pour atteindre rapidement la température de l'air. Comme pour la structure ITE standard, l'ensemble de l'échantillon revient presque dans son état initial au bout de 24 h.

Ces résultats mettent en évidence l'impact de l'albédo sur le comportement thermique des deux typologies de toiture. Notamment, l'augmentation de la réflectivité de la surface permet dans les deux cas de réduire la température de surface de façon conséquente, mais cette réduction est plus importante pour la structure isolée par l'extérieur. Aussi, on constate que l'augmentation de l'albédo permet de réduire les différences entre les échantillons ITE et ITI. En effet, alors que l'écart maximal de température de surface est de 11 °C entre les deux structures standards, il n'est plus que de 6 °C entre les deux structures réfléchissantes. Cependant, comme le flux de chaleur qui pénètre par conduction dans une toiture standard ITE est faible, l'impact de l'augmentation de l'albédo se manifeste surtout sur la température de surface, mais n'a que peu d'impact sur le flux de chaleur qui pénètre dans les couches profondes de la toiture. Pour la toiture ITI, l'augmentation de l'albédo, permet à la fois de réduire de façon significative la température de surface et le flux de chaleur qui pénètre par conduction dans la toiture.

5.1.2 Coefficient de convection thermique

La Figure 5.3 illustre la densité de flux convectif mesurée en fonction de la différence de température entre l'air et la surface pour les quatre structures étudiées. Les flèches noires et la frise de couleur rendent compte de l'évolution temporelle du flux convectif. Pour chacune des structures, le coefficient de convection thermique moyen sur l'ensemble de la journée est estimé par régression linéaire, pour laquelle on impose une ordonnée à l'origine nulle.

Les coefficients de convection thermique moyens obtenus pour chacune des expériences ont des valeurs très proches comprises entre 20 et 24 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ qui correspondent aux valeurs hautes de convection naturelle dans l'air. Ces valeurs sont en accord avec la littérature [91, 92]. Compte tenu de la ventilation imposée dans l'en-

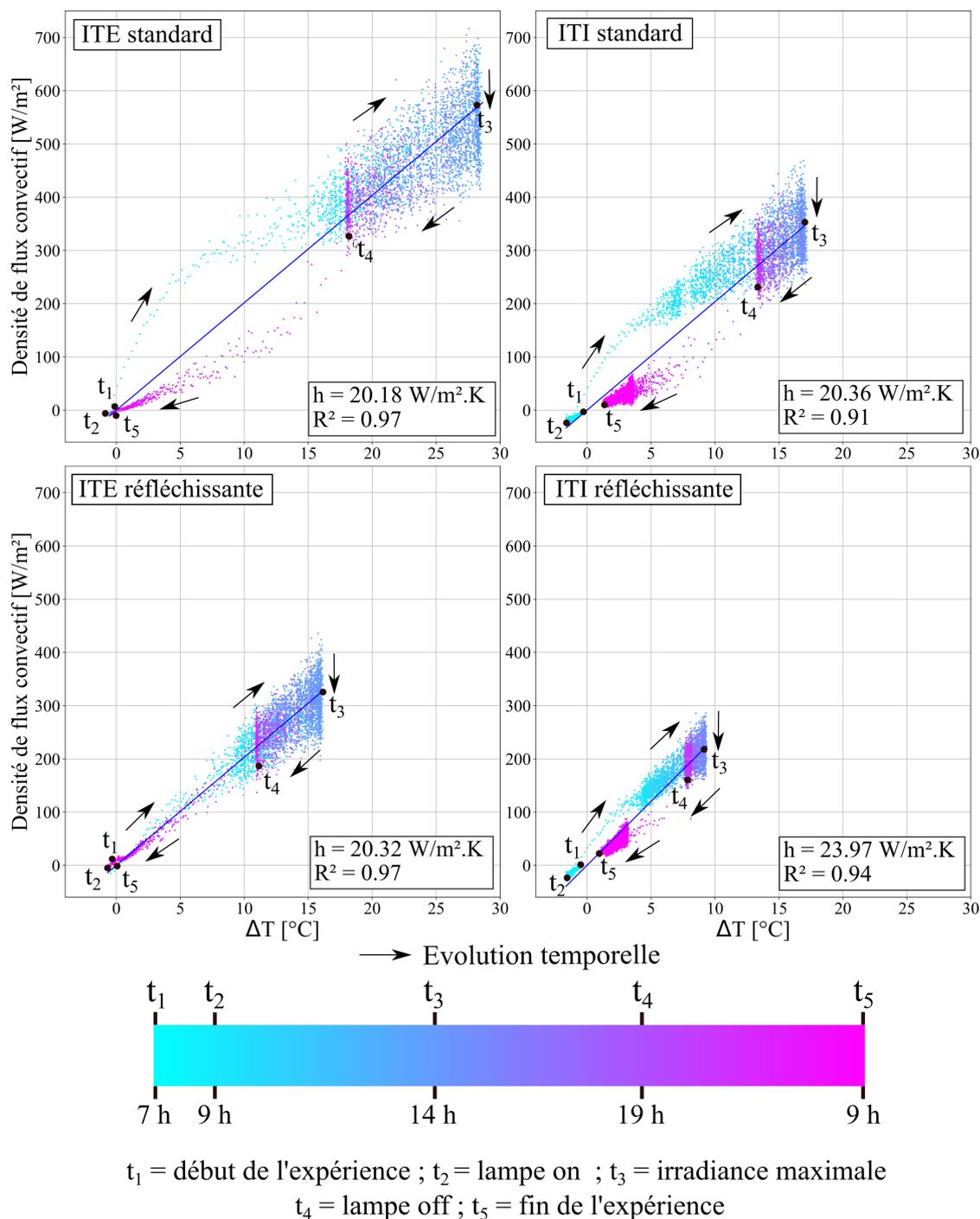


FIGURE 5.3 – Densité de flux convectif mesurée en fonction de la différence de température entre la surface et l'air pour les quatre structures étudiées.

ceinte, il s'agit vraisemblablement d'un régime de convection mixte. On note que pour les deux échantillons de toiture standard, le coefficient de convection thermique moyen obtenu sur l'ensemble de la journée semble être légèrement surestimé pour la phase nocturne alors que ce n'est pas le cas pour les échantillons réfléchissants. On peut supposer que cela est dû à la façon de mesurer les échanges convectifs avec les deux capteurs de surface plutôt qu'à une réalité physique.

5.1.3 Bilan thermique de surface

Les flux du bilan thermique de surface pour chacune des structures étudiées dans ce chapitre sont illustrés Figure 5.4.

Pendant les deux premières heures de l'expérience, avant que le simulateur solaire ne s'allume, on constate que le flux de chaleur qui pénètre dans l'échantillon est très faible et constant pour les deux structures ITE alors qu'il croît progressivement pour les deux structures ITI. On retrouve ainsi l'effet de l'isolant qui limite fortement l'absorption de chaleur. Par conséquent, la température de surface suit (de près) l'évolution de la température de l'air, bien qu'elle reste légèrement en deçà. Les échanges convectifs sont donc peu importants et négatifs.

En revanche, pour les deux échantillons ITI, l'écart de température entre l'air et la surface est plus important, les échanges convectifs le sont donc également. Les flux mesurés à 2 cm de profondeur, illustrés Figures 5.1 et 5.2, confirment cette analyse. Pendant les deux premières heures de l'expérience, le flux de chaleur mesuré à 2 cm de profondeur pour les deux toitures ITI croît progressivement avec l'augmentation de la température de l'air alors qu'il reste nul pour les deux configurations ITE.

Lorsque le simulateur solaire s'allume, le rayonnement net augmente brutalement pour l'ensemble des configurations. On remarque une nette différence entre les structures réfléchissantes et les structures standards. Le rayonnement net est jusqu'à 250 ou 300 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ moins important pour les structures réfléchissantes puisqu'une partie importante du rayonnement incident courte longueur d'onde est réfléchi par la couche superficielle. D'autre part, à réflectivité constante, le rayonnement net est plus faible pour les toitures isolées par l'extérieur. Cet écart est dû à la température de surface qui est

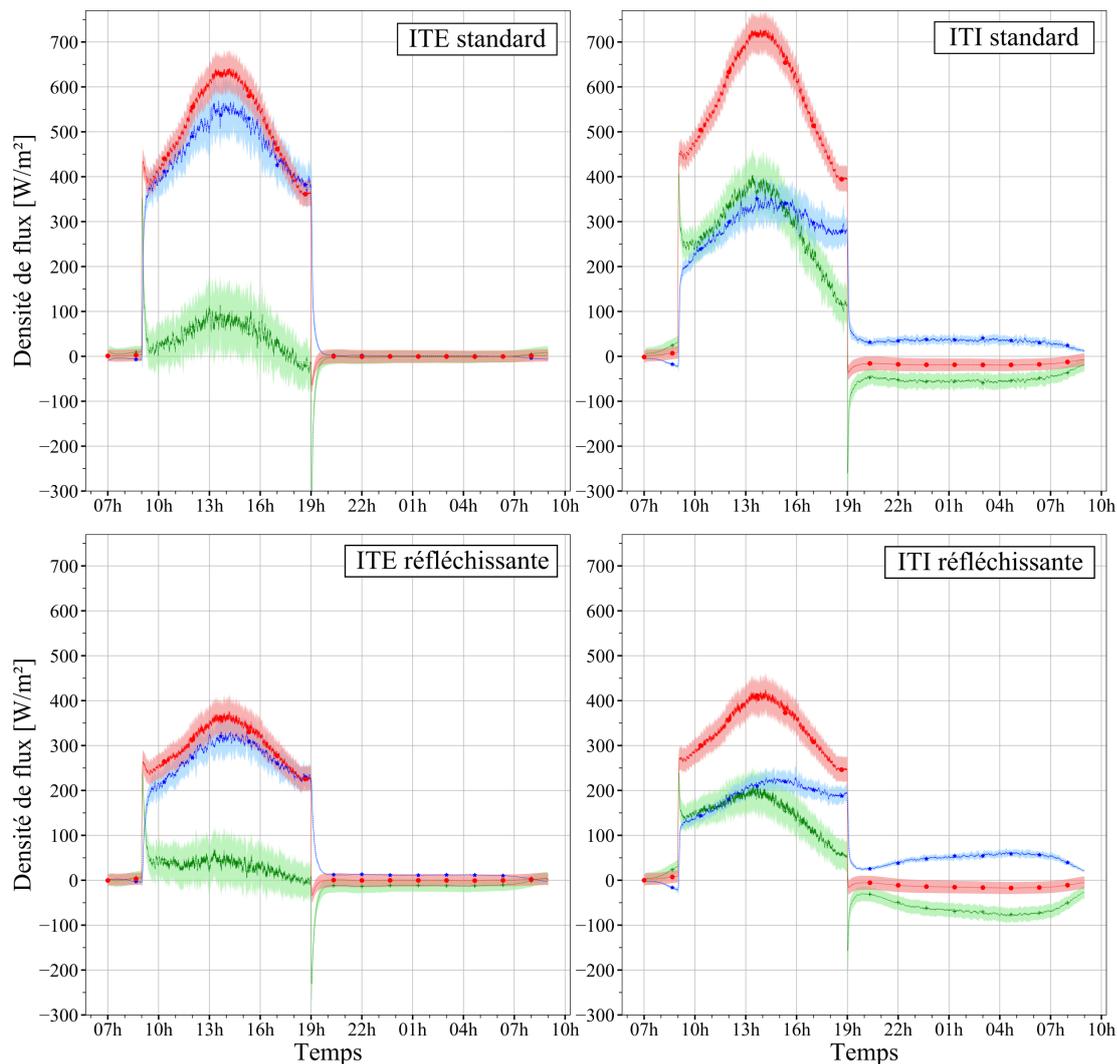


FIGURE 5.4 – Bilan thermique en surface des quatre structures de toiture. En rouge, le rayonnement net, en bleu les échanges convectifs et en vert le flux de chaleur conductif.

plus élevée pour les structures **ITE** qui émettent donc davantage de rayonnement **GLO**.

Le flux de chaleur qui pénètre dans l'échantillon de toiture **ITI** de faible albédo atteint un maximum de pratiquement $400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ aux alentours de 14 h alors qu'il n'est que de $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ pour la toiture **ITE** de même albédo. L'augmentation de la réflectivité de la couche superficielle permet pour les deux types de configurations de diminuer le flux conductif qui pénètre dans l'échantillon, bien que cette diminution soit plus importante pour la structure **ITI** standard. On remarque que les variations du flux conduc-

tif sont moins importantes dans le cas des structures réfléchissantes. On constate par ailleurs que le flux conductif devient légèrement négatif à la fin de la phase diurne pour l'échantillon **ITE** standard et nul pour l'échantillon **ITE** réfléchissant alors qu'il reste franchement positif pour les deux échantillons **ITI**.

La structure **ITE** standard est la toiture qui échange le plus de chaleur par convection avec le milieu ambiant. Comme l'augmentation de l'albédo de la couche superficielle permet de réduire de façon importante la température de surface, les échanges convectifs sont fortement réduits dans le cas des structures réfléchissantes comparées aux structures standards. Cependant, puisque l'augmentation de l'albédo impacte davantage la température de surface des structures **ITE**, la diminution des échanges convectifs lorsque la réflectivité augmente est plus importante pour les toitures **ITE**.

Enfin, on note que pour les deux structures **ITI** les maximums de flux sont atteints dans le même ordre : le flux conductif atteint son maximum en premier suivi du rayonnement net puis du flux convectif. Cette tendance est moins nette pour les échantillons **ITE**. La courbe de densité de flux convectif semble être presque totalement en phase avec celle de rayonnement net.

Finalement, en journée, alors que convection et conduction sont du même ordre de grandeur pour les échantillons **ITI**, les échantillons **ITE** présentent une conduction faible (100 W.m^{-2} environ au maximum) se traduisant par une convection entre 40 et 60 % plus importante selon l'albédo, assez proche du rayonnement net. Les échantillons **ITE** contribuent donc significativement plus à échauffer l'air en journée que les échantillons **ITI**.

Lorsque le simulateur solaire s'éteint, l'ensemble des flux tendent rapidement vers zéro pour les deux structures **ITE**. Par conséquent la chaleur emmagasinée par la toiture pendant la phase diurne reste soit stockée dans la couche structurelle de béton, soit est transmise jusqu'à l'intérieur du bâtiment. En effet, comme la résistance thermique entre la couche de béton et le bas de l'échantillon est plus faible que la résistance thermique de la couche isolante, la chaleur continue de se propager jusqu'à l'intérieur du bâtiment. On constate cependant que le flux conductif en surface est négatif et de faible amplitude pendant la phase nocturne. La faible quantité de chaleur retenue dans

les premiers centimètres de la couche isolante est déstockée dans le milieu extérieur.

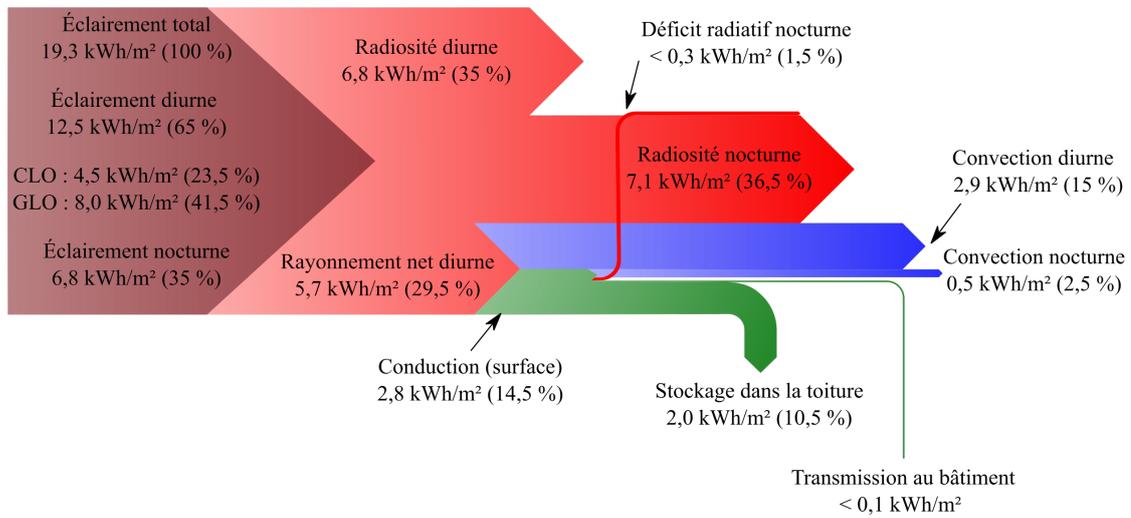
Au contraire, pour les deux échantillons **ITI**, les flux chutent brutalement, mais ne tendent pas vers zéro. Dans les deux cas, le rayonnement net est légèrement négatif et presque constant pendant la phase nocturne. Les échanges convectifs sont eux positifs. Pour l'échantillon standard, le flux convectif est constant du début à la fin de la nuit, puis décroît légèrement au début de la journée suivante. Pour l'échantillon réfléchissant, le flux convectif augmente progressivement pendant toute la phase nocturne puis diminue au début de la journée suivante. On constate que les échanges convectifs sont même plus importants entre 2 h et 7 h du matin pour l'échantillon réfléchissant. Le flux conductif est négatif pendant toute la phase nocturne dans les deux cas. On constate aussi que, comme pour les échanges convectifs, le flux conductif est constant pendant la phase nocturne pour l'échantillon standard alors qu'il diminue progressivement pour l'échantillon réfléchissant. Cela s'explique par le fait que le flux conductif est reconstruit à partir des valeurs du rayonnement net et du flux convectif. Comme le rayonnement net est presque constant, le flux conductif évolue à l'inverse du flux convectif. Dans les deux cas, comme le flux devient négatif, cela signifie que la toiture restitue une partie de la chaleur qu'elle a emmagasinée dans la couche de béton pendant la phase diurne.

5.1.4 Bilan énergétique

Les Figures 5.5 et 5.6 présentent le bilan énergétique des toitures standard et réfléchissante, respectivement. Sur les $12,5 \text{ kWh.m}^{-2}$ reçus en journée, la surface de la toiture **ITI** standard absorbe $5,7 \text{ kWh.m}^{-2}$ et celle de la toiture **ITE** $5,1 \text{ kWh.m}^{-2}$ alors que celles des structures réfléchissantes absorbent respectivement $3,4 \text{ kWh.m}^{-2}$ et 3 kWh.m^{-2} . En effet, les toitures de faible albédo émettent et réfléchissent, pendant la phase diurne, entre 20 % et 25 % d'énergie en moins par rapport aux toitures réfléchissantes. Elles absorbent donc davantage d'énergie. On observe une légère différence entre les échantillons **ITI** et les **ITE**. Les toitures **ITE** émettent et réfléchissent respectivement 3,5 % et 2 % d'énergie de plus que les toitures **ITI**.

Pour les structures **ITE**, environ 90 % de l'énergie absorbée par la surface est évacuée en journée par l'intermédiaire des échanges convectifs, indépendamment de la réflectivité de surface. L'augmentation de la réflectivité permet de réduire les échanges

ITI standard



ITE standard

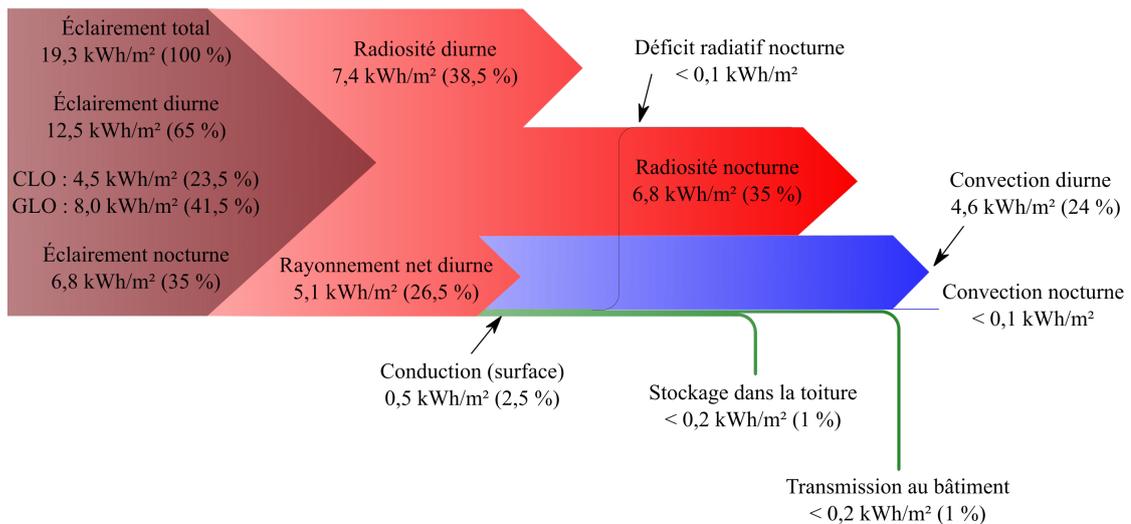
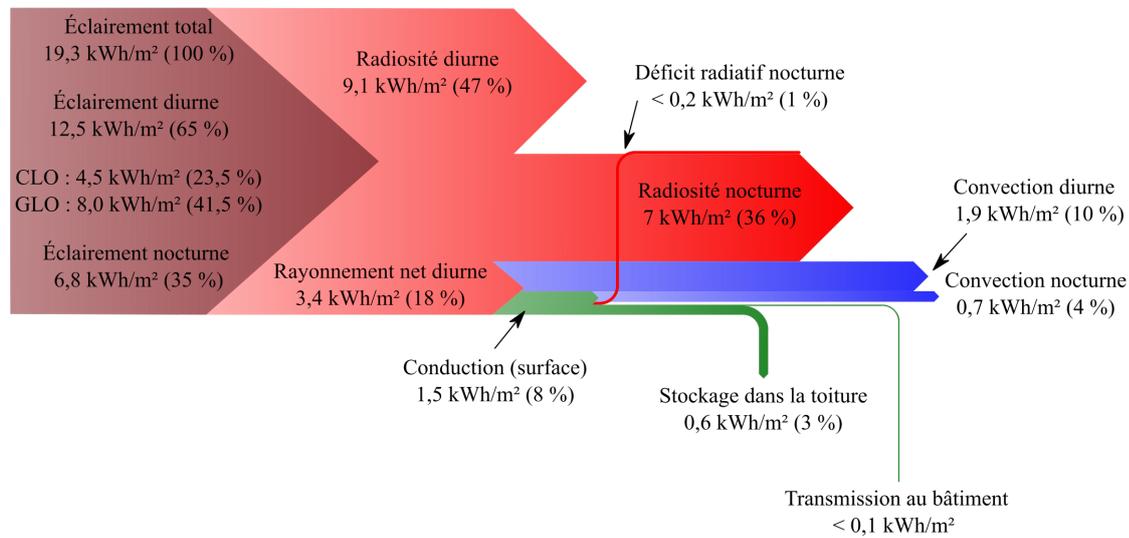


FIGURE 5.5 – Bilan énergétique pour les deux échantillons standards.

convectifs pendant la phase diurne d'environ 45 %. Le flux de chaleur conduit dans les couches sous-jacentes, relativement faible aussi bien pour la structure standard que pour la structure réfléchissante, est également affecté par le changement d'albédo, mais dans une moindre mesure. On note que la quantité de chaleur qui reste stockée dans la toiture est presque équivalente quelle que soit la valeur d'albédo. La principale différence réside

ITI réfléchissante



ITE réfléchissante

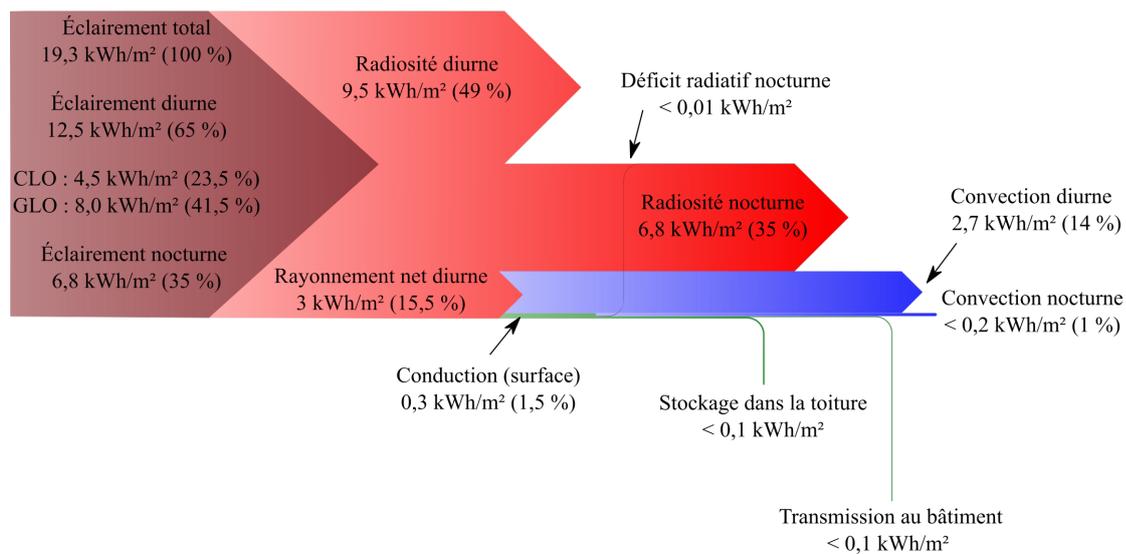


FIGURE 5.6 – Bilan énergétique pour les deux échantillons réfléchissants.

dans la quantité de chaleur qui est transmise dans le bâtiment, c'est-à-dire qui a traversé l'échantillon. Bien que déjà très faible pour la toiture standard, cette quantité est divisée par trois environ dans le cas de la toiture réfléchissante passant de $0,19 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ à $0,06 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$. Ramamurthy et al. [90] trouvent des résultats similaires. Le passage

d'une toiture noire à une toiture blanche entraîne une diminution d'environ 60 % du flux de chaleur qui pénètre dans le bâtiment pendant la saison chaude.

Pour les structures ITI, un peu plus de 50 % du rayonnement net ($2,9 \text{ kWh.m}^{-2}$ pour la toiture standard et $1,9 \text{ kWh.m}^{-2}$ pour la toiture réfléchissante) est évacué en journée par convection peu importe la valeur de réflectivité de la membrane d'étanchéité (Table 5.1). L'autre moitié est conduite plus en profondeur dans la couche de béton. Pendant la phase nocturne, une partie de la chaleur emmagasinée en journée est restituée au milieu ambiant, majoritairement par l'intermédiaire des échanges convectifs ($0,5 \text{ kWh.m}^{-2}$ pour la toiture standard et $0,7 \text{ kWh.m}^{-2}$ pour la structure réfléchissante). Le reste est évacué par refroidissement radiatif (environ $0,3 \text{ kWh.m}^{-2}$ pour la structure standard et inférieure à $0,2 \text{ kWh.m}^{-2}$ pour la réfléchissante). Bien que la différence soit minimale, il paraît surprenant que les échanges convectifs soient plus importants dans le cas de la structure réfléchissante alors même que l'écart de température entre l'air et la surface est plus faible comparé à la structure standard. Il semblerait que cette légère différence ne représente pas une réalité physique mais plutôt qu'elle soit due à la façon dont les échanges convectifs sont mesurés avec les capteurs de surface. L'augmentation de la réflectivité de la couche superficielle permet, durant la phase diurne, de réduire de façon significative la quantité d'énergie échangée par convection et celle qui pénètre plus en profondeur par conduction. La quantité de chaleur qui est transmise jusqu'à l'intérieur du bâtiment (inférieure à $0,1 \text{ kWh.m}^{-2}$ dans les deux cas) n'est pas affectée de façon significative par l'augmentation de la réflectivité de la couche superficielle tout comme la quantité de chaleur restituée au milieu ambiant pendant la phase nocturne. La principale différence réside dans la quantité de chaleur qui reste stockée dans la toiture : cette quantité est divisée par trois environ lorsque l'albédo augmente, passant de 2 kWh.m^{-2} pour la toiture standard à $0,6 \text{ kWh.m}^{-2}$ pour la toiture réfléchissante.

		ITI		ITE	
		Standard	Réfléchissant	Standard	Réfléchissant
Convection [kWh/m ²]	Jour	2,9	1,9	4,6	2,7
	Nuit	0,5	0,7	0,1	0,2

TABLE 5.1 – Comparaison des échanges convectifs diurnes et nocturnes des quatre toitures.

5.2 Discussion

Ces résultats mettent en évidence l'impact de la place de l'isolant dans une toiture et de sa réflectivité solaire sur son comportement thermoclimatique en période caniculaire. Les résultats sont cohérents avec la littérature mais ils diffèrent sous certains aspects.

Effectivement, l'application d'un revêtement réfléchissant ne semble pas avoir le même impact d'une étude à l'autre. Dans le cas de Zingre et al. [33] l'application d'un revêtement réfléchissant sur une toiture en béton permet de diminuer la température de surface de 14,1 °C. On notera que la valeur de réflectance de leur revêtement (0,74) est proche de celle de notre membrane EPDM blanche (0,70). Pour Bozonnet et al. [32] la température maximale atteinte par la surface extérieure de la toiture est abaissée de presque 30 °C lorsque une peinture réfléchissante est appliquée. Pisello et al. [31] mesurent une réduction de la température de surface pouvant aller jusqu'à 20 °C pendant les heures les plus chaudes de la journée. Dans leur étude, la réflectivité de la toiture standard est de 0,07 et celle de la toiture réfléchissante est de 0,75. Malgré des augmentations d'albédo similaires, la réduction de température de surface de notre échantillon **ITI** est trois fois inférieure à celle de Pisello et al.

Il semblerait que la composition de la toiture impacte fortement l'efficacité des revêtements réfléchissants. En effet, les toitures décrites ne sont pas forcément isolées et les propriétés thermiques des structures et du revêtement de surface ne sont pas les mêmes. Notre étude confirme cette dernière remarque puisque la réduction de température de surface liée à la mise en place du revêtement réfléchissant est de 13 °C au maximum pour la toiture **ITE** et de 8 °C pour la toiture **ITI**. Comme dans notre expérience la résistance thermique des deux structures est strictement équivalente, il semblerait que ce ne soit pas uniquement les propriétés thermiques de la structure qui génèrent ces différences mais bien l'agencement des couches au sein de la paroi. Autrement dit, l'efficacité d'un revêtement réfléchissant est fortement impactée par les couches sur lesquelles il est appliqué.

Une autre explication pourrait être liée au simulateur solaire utilisé dans notre expérience. L'éclairement **CLO** imposé dans notre expérimentation est moins important

qu'en conditions réelles alors que l'éclairement **GLO** est lui plus important. L'impact de l'augmentation de l'albédo est donc forcément moins marqué dans notre cas, a priori dans les mêmes proportions que la différence de rayonnement **CLO**.

Finalement, bien que l'on puisse affirmer que l'augmentation de la réflectivité entraîne systématiquement une réduction de la température de surface, il est difficile de différencier l'impact de chacun des paramètres sur le résultat final. Or, l'un des avantages du dispositif expérimental présenté dans cette étude réside justement dans sa capacité à contrôler l'ensemble des paramètres et de n'en faire varier qu'un seul à la fois. Ainsi, l'ensemble des différences constatées entre les quatre échantillons de toiture dans cette étude peut être directement imputé soit à la place de l'isolant dans la structure soit à la réflectivité solaire de la surface. Une des perspectives suite à cette expérience en laboratoire serait donc d'étudier d'autres structures pour pouvoir in fine quantifier l'efficacité des techniques de rafraîchissement dépendamment des propriétés de la toiture et de l'agencement des couches au sein de la paroi.

Une autre différence existe entre notre expérimentation et la littérature. Plusieurs études [17, 18] montrent que l'isolation extérieure permet de faire des économies d'énergie plus importantes qu'avec une isolation intérieure. Pourtant, les bilans énergétiques des deux échantillons standards résumés sur la Figure 5.5, montrent que la quantité de chaleur qui pénètre jusqu'à l'intérieur du bâtiment est légèrement plus importante pour la structure **ITE** comparée à celle de la structure **ITI**. En effet, la chaleur qui a traversé la couche isolante de l'échantillon **ITE** en journée continuera de diffuser vers le bâtiment pendant la phase nocturne puisque la résistance thermique est moins importante dans cette direction. Dans le cas de la toiture **ITI**, la chaleur emmagasinée dans la couche de béton est préférentiellement déstockée à l'extérieur du bâtiment. Donc, cumulée sur une seule journée, la quantité de chaleur qui pénètre dans le bâtiment peut être légèrement supérieure dans le cas de l'isolation extérieure. On note que cela n'est plus valable pour les structures réfléchissantes. La quantité de chaleur qui pénètre par la surface de l'échantillon **ITE** est tellement faible que seule une quantité infime parvient à traverser la couche isolante et à pénétrer jusqu'à l'intérieur du bâtiment.

Il semblerait donc que cette différence avec la littérature soit liée au périmètre de l'étude. Dans notre cas, seul un échantillon de toiture est pris en compte et non

l'ensemble d'un bâtiment. L'impact de l'isolation extérieure sur les ponts thermiques n'est pas pris en compte dans notre étude alors qu'il est important lorsque l'on considère un bâtiment entier. D'autres paramètres peuvent expliquer cette différence comme par exemple la saison considérée (chauffage ou climatisation), le climat local ou encore l'occupation du bâti. Par exemple, Kolaitis et al. [95] montrent qu'un bâtiment isolé par l'extérieur est plus performant du point de vue énergétique lorsque l'on s'intéresse aux besoins annuels comparé à un bâtiment isolé par l'intérieur. Mais on constate aussi que, dépendamment du comportement des occupants et de la saison, les besoins énergétiques peuvent être légèrement plus importants lorsque la structure est isolée par l'extérieur, notamment pendant la saison chaude.

Une autre piste pour expliquer cette différence porte sur la durée d'expérimentation. Notre essai s'étend sur une seule journée, ne permettant pas d'observer de phénomènes inertiels/cumulatifs. On constate d'ailleurs sur les courbes de température qu'aucun des quatre échantillons de toiture ne retrouve son état initial au bout de 24 h d'expérience. Une autre perspective pour la suite de ces travaux est donc de réaliser des expériences sur plusieurs jours afin de mieux prendre en compte l'inertie de la couche structurelle sur le comportement thermique des toitures et de leur impact sur le climat urbain en période caniculaire.

5.3 Conclusion

Ce chapitre s'est focalisé sur l'étude en laboratoire du comportement thermoclimatique de quatre structures de toiture lorsqu'elles sont soumises à des conditions caniculaires. Ces structures diffèrent soit par la place de l'isolant dans la structure soit par la réflectivité solaire de la surface extérieure.

Il apparaît que les structures isolées par l'extérieur échauffent l'air extérieur majoritairement en journée, mais ne contribuent pas à échauffer l'air extérieur pendant la nuit. Autrement dit ce type de structure ne participe pas au maintien de températures élevées la nuit en milieu urbain lors de périodes caniculaires.

Les structures **ITI** échauffent également l'air ambiant en journée, mais dans une moindre mesure que les toitures **ITE** ($-1,7 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$). En revanche, en restituant une

partie importante de la chaleur emmagasinée pendant la phase diurne, elles contribuent à maintenir des températures importantes la nuit et contribuent ainsi davantage à la formation de l'ICU.

L'augmentation de la réflectivité de la couche superficielle permet de réduire de façon importante l'énergie solaire absorbée par la surface de la toiture. Par conséquent, les échanges convectifs en journée sont presque réduits de moitié pour la toiture ITE. Finalement, il ne reste plus que 15 % environ de l'énergie incidente qui participe à l'échauffement urbain, et ce, majoritairement en journée. Le reste est restitué en grande partie par rayonnement (réfléchi et émis).

Le changement d'albédo contribue également à réduire les échanges convectifs de la toiture ITI réfléchissante, mais permet surtout une réduction d'environ 50 % du flux de chaleur qui pénètre plus en profondeur dans la couche de béton. Durant la phase nocturne, il semblerait que la différence d'impact sur le climat urbain entre les deux toitures ITI soit minime. La différence notable concerne la quantité de chaleur stockée dans la couche de béton : elle est presque quatre fois moins importante dans le cas de la toiture réfléchissante comparée à la toiture standard. Or, bien que cette quantité de chaleur ne soit pas restituée au bout d'une nuit, elle le sera à la fin de la vague de chaleur. Les structures isolées par l'intérieur participent donc à étendre dans le temps les conséquences de la vague de chaleur sur le climat urbain (bien qu'elles permettent de l'amortir au début). Il serait donc intéressant de répéter l'expérience avec plusieurs journées consécutives pour approfondir ce dernier point.

Du point de vue du bâtiment, seule une faible quantité de chaleur parvient jusqu'à l'intérieur quelle que soit la structure étudiée grâce à l'isolation thermique. Ce résultat n'est pas surprenant au vu des performances et de l'épaisseur de la couche isolante (résistance thermique comprise entre 3,1 et 3,4 m².K.W⁻¹). Toutefois, on observe quelques différences entre les quatre toitures étudiées. Notamment, le flux de chaleur qui est transmis au bâtiment est presque deux fois plus élevé pour la toiture ITE standard en comparaison à la toiture ITI standard. L'augmentation de l'albédo n'a pas de conséquence significative sur le flux de chaleur transmis au bâtiment pour les structures ITI, mais permet de diviser ce flux par trois environ pour les toitures ITE. Finalement, la structure qui minimise le flux de chaleur transmis au bâtiment est la structure ITE

réfléchissante.

Ces résultats montrent que la structure qui minimise à la fois les impacts sur le climat local et sur le bâtiment sous-jacent en période caniculaire est la structure réfléchissante ITE. Cela ne signifie pas que cette configuration de toiture est systématiquement la plus adaptée. Cette conclusion, par exemple, ne prend pas en compte l'utilisation qui en est faite. En effet, dans le cas d'une toiture-terrasse occupée pendant la saison estivale, une valeur de réflectance élevée peut fortement impacter le confort thermique des occupants. D'un autre côté, l'occupation de la terrasse peut rapidement dégrader les performances optiques de la membrane réfléchissante en abaissant la valeur de réflectivité solaire. Enfin, le rayonnement réfléchi par de telles toitures peut aussi impacter les autres bâtiments environnants. Dans ce cas, la structure standard isolée par l'extérieur est peut-être la configuration à privilégier.

Les conclusions précédentes peuvent être considérées lors de la construction d'un bâtiment. En revanche pour le bâti existant, il n'est pas toujours possible de mettre en place de telles stratégies d'adaptation. Notamment, la place de l'isolant dans la structure peut difficilement être modifiée sans engendrer des coûts financiers importants. D'autre part, pour des raisons de préservation du patrimoine architectural, ajouter une isolation par l'extérieur ou modifier l'albédo de la couche superficielle n'est pas toujours possible. La mise en place d'autres stratégies d'adaptation peut donc être dans certains cas plus pertinente.

Une autre technique de rafraîchissement consiste à arroser la couche superficielle de la toiture. La deuxième partie de ce manuscrit propose donc d'étudier comment le comportement thermoclimatique des quatre structures présentées dans la première partie est modifié lorsque la surface est arrosée à intervalles réguliers. De nouveau, l'impact des quatre structures sur le climat local en période caniculaire sera observé.

Chapitre 6

Cas d'étude avec arrosage

La suite de ce manuscrit se focalise sur la modification du comportement thermoclimatique des quatre structures de toiture étudiées précédemment lorsque leur surface est arrosée. L'objectif final est identique, à savoir, caractériser les différents échanges thermiques entre l'air extérieur et la toiture d'une part, et la toiture et le bâtiment sous-jacent d'autre part.

Pour chacune des quatre structures, trois débits d'arrosage sont étudiés. On rappelle que la technique d'arrosage mise en œuvre dans cette étude est un arrosage par pulvérisation de gouttelettes d'eau sur la surface supérieure de la toiture. Par conséquent, la surface peut être soit recouverte de gouttelettes (débit faible) soit d'un film d'eau (débit élevé). On note aussi que l'arrosage a lieu uniquement pendant la phase diurne et que la quantité d'eau pulvérisée à chaque aspersion est identique. Seule la fréquence d'aspersion varie entre les expérimentations.

Les échantillons de toiture et leur instrumentation sont les mêmes que ceux utilisés pour les expérimentations sans arrosage et les conditions expérimentales sont strictement identiques. Seules les propriétés optiques des membranes d'étanchéité diffèrent du fait de l'arrosage (cf. Table 3.3).

De manière analogue au chapitre 4, ce chapitre se focalise sur un cas d'application de la méthodologie présentée section 3.4.2. L'échantillon utilisé pour ce cas d'étude est celui d'une toiture standard isolée par l'intérieur (ITI).

6.1 Résultats expérimentaux

6.1.1 Température et densité de flux de chaleur

Température de surface

La Figure 6.1 illustre l'évolution de la température de surface en fonction du débit d'arrosage pour l'échantillon de toiture ITI standard. Pour la comparaison, les résultats de l'expérience réalisée sans arrosage seront utilisés.

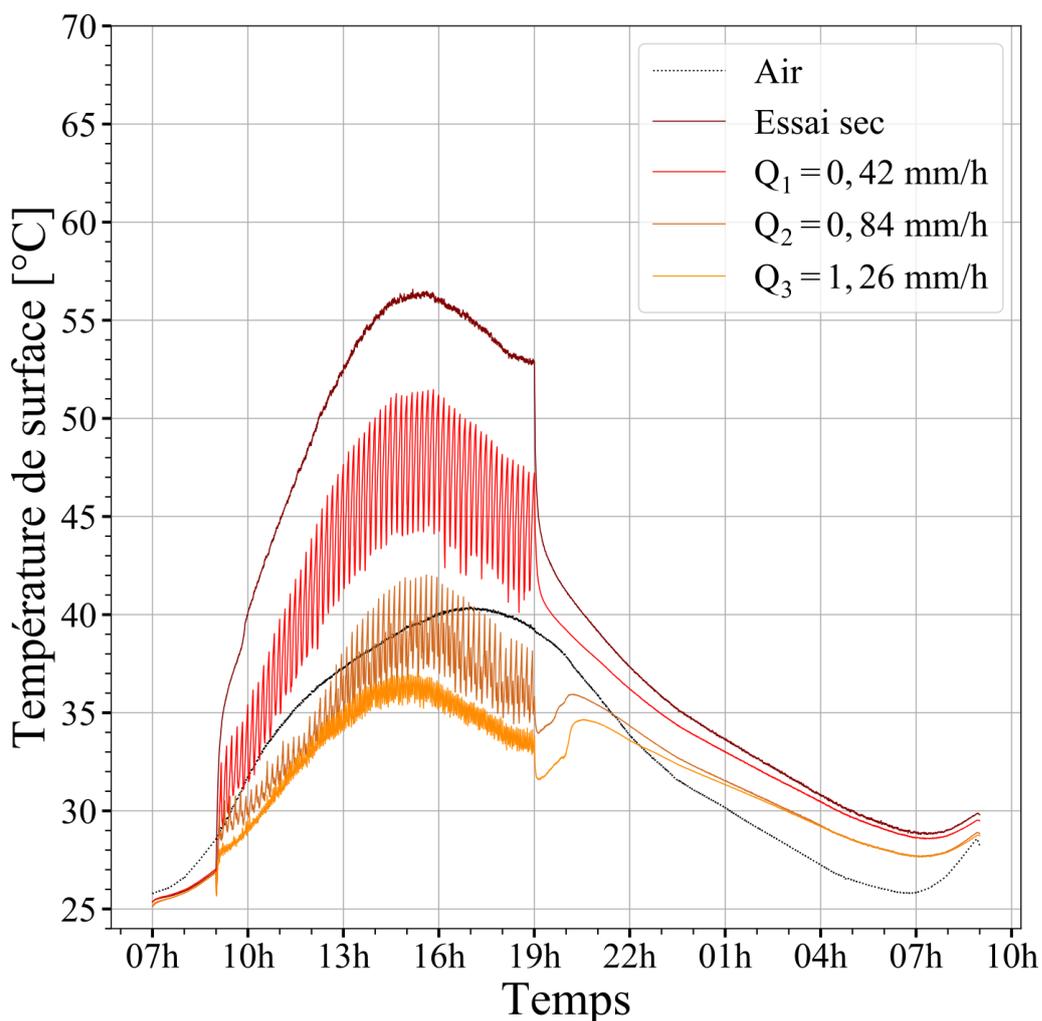


FIGURE 6.1 – Évolution temporelle de la température de surface pour différents débits d'arrosage.

Pendant la phase diurne entre 9 h et 19 h, peu importe le débit, la température de surface croît jusqu'à un maximum puis diminue jusqu'à l'extinction du simulateur. Plus le débit est important, plus l'augmentation de la température de surface est progressive et plus le maximum atteint est faible. Alors qu'il est de 57 °C lorsque la surface est sèche, il n'est plus que de 37 °C lorsque la surface est arrosée de façon importante (Q_3). On observe aussi que la diminution de la température de surface due à l'arrosage n'est pas proportionnelle au débit et que lorsque la surface n'est pas suffisamment arrosée sa température fluctue de façon importante. En effet, lorsque le débit est insuffisant, la surface a le temps de sécher entre deux aspersion. Sa température croît donc de nouveau jusqu'à la prochaine pulvérisation. Lorsque le débit est suffisamment important (Q_3), la quantité d'eau pulvérisée à chaque aspersion n'a pas le temps de s'évaporer entièrement si bien qu'elle s'accumule sur la surface. Quelques minutes après le début de l'expérience, un film d'eau recouvre en permanence la surface, il n'y a donc plus de fluctuation importante de sa température. L'impact du débit d'arrosage sur la température de surface est résumé Table 6.1.

Débit d'arrosage	Q_1	Q_2	Q_3
$T_{s\ sec}^{max} - T_{s\ arr}^{max}$	5°C	15°C	20°C
$F_{T_s}^{max}$	7°C	5°C	1,5°C

TABLE 6.1 – Réduction et fluctuation maximale ($F_{T_s}^{max}$) de la température de surface en fonction du débit d'arrosage.

Peu importe le débit mis en œuvre en journée, l'extinction de la lampe à 19 h entraîne, dans les premières minutes qui suivent, une diminution de la température de surface. Plus le débit est faible, plus la chute de température est importante puisque la surface s'est davantage échauffée en journée. Lorsque le débit est faible (Q_1), la surface est sèche au moment de l'extinction du simulateur solaire et sa température est relativement importante. La température chute donc brutalement et décroît ensuite progressivement tout en restant supérieure à la température de l'air de quelques degrés. La nuit, son comportement est similaire à celui du cas sans arrosage.

Pour les deux autres expérimentations, comme le débit est plus important, la surface s'échauffe moins en journée si bien qu'à la fin de la phase diurne sa température est inférieure à la température de l'air. Lorsque la lampe s'éteint, alors que la température de surface devrait légèrement remonter pour se rapprocher de la température de l'air, elle

continue de décroître. En effet, toute l'eau pulvérisée pendant la journée sur la surface n'a pas eu le temps de s'évaporer. Elle continue donc d'être refroidie par l'évaporation de l'eau au début de la phase nocturne.

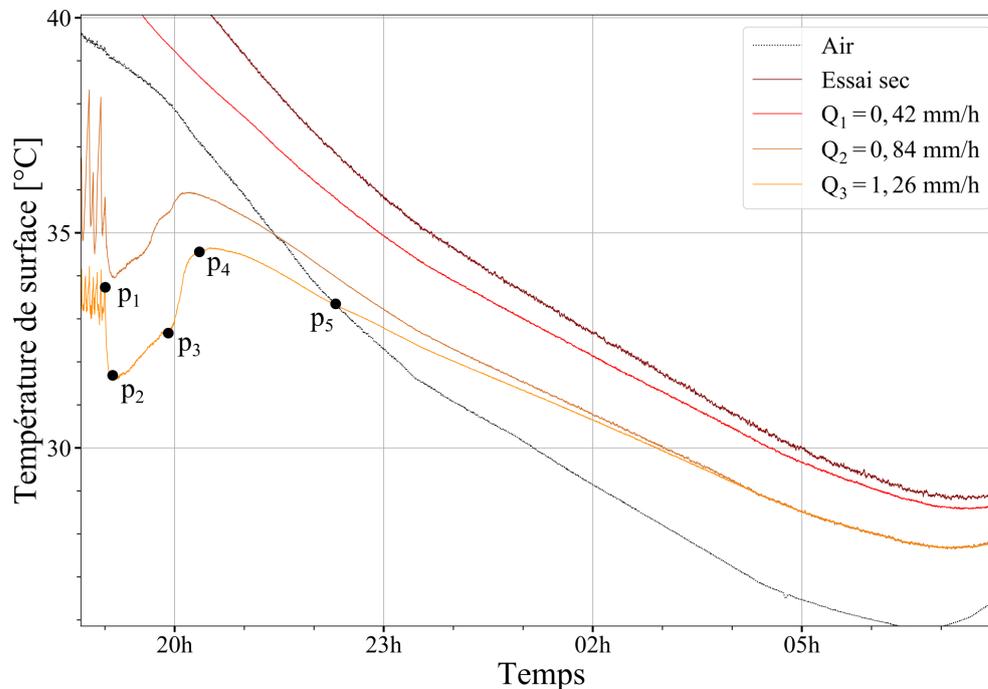


FIGURE 6.2 – Évolution temporelle de la température de surface au début de la phase nocturne.

Il semblerait que deux mécanismes s'opposent durant la première heure et demie de la nuit (Figure 6.2). La surface est refroidie par l'évaporation de l'eau tout en étant échauffée par l'air dont la température est plus importante. Pendant les premières minutes qui suivent l'extinction de la lampe (de p_1 à p_2), le refroidissement dû à l'évaporation de l'eau domine, la température décroît. Ensuite, la température commence de nouveau à croître progressivement (de p_2 à p_3) : un peu d'eau continue de s'évaporer mais la surface n'est plus recouverte d'un film continu. Les parties sèches de la surface ne sont plus refroidies par l'évaporation. Enfin, lorsque la surface est totalement sèche, comme sa température est inférieure à celle de l'air, elle croît franchement pendant une vingtaine de minutes jusqu'à un maximum (de p_3 à p_4). Elle décroît ensuite progressivement mais, avec le déstockage de la chaleur emmagasinée dans la couche de béton en journée, moins rapidement que la température de l'air si bien qu'elle devient supérieure

à cette dernière un peu après 22 h et le reste jusqu'à la fin de la nuit.

L'impact de l'arrosage sur la température de surface observé sur cet échantillon de toiture est proche de celui constaté dans d'autres études. Effectivement, lorsque le débit atteint les $1,26 \text{ mm.h}^{-1}$ on constate une réduction maximale de la température de surface d'environ $21 \text{ }^\circ\text{C}$ par rapport à l'expérience sans arrosage. Cette réduction est presque équivalente à celle observée par Parison et al. [87] qui mesurent une réduction de la température de surface de $23,1 \text{ }^\circ\text{C}$ au maximum par rapport au cas sans arrosage lorsque le débit est de $1,25 \text{ mm.h}^{-1}$. Jain et al. [96] trouvent une réduction de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ au maximum.

Températures et flux de chaleur en profondeur

La Figure 6.3 présente l'évolution de la température et du flux de chaleur mesurés à différentes profondeurs au sein de l'échantillon de toiture ITI standard en fonction du débit d'arrosage.

Pendant la phase diurne entre 9 h et 19 h, les températures mesurées à 2 cm de profondeur augmentent progressivement jusqu'à une valeur maximale puis restent constantes ou ne diminuent que très légèrement jusqu'à l'extinction de la lampe. Comme pour les températures de surface, plus le débit d'arrosage est important, moins la température à 2 cm augmente rapidement et plus la valeur maximale atteinte est faible. On remarque aussi que, plus le débit est important, plus la température maximale à 2 cm est atteinte rapidement. Contrairement à la température de surface qui fluctue de façon importante pour les deux expériences avec des débits intermédiaires (Q_1 et Q_2), la température mesurée à 2 cm de profondeur ne fluctue que très peu voire pas du tout. Lorsque le simulateur s'éteint, les courbes de température mesurées à 2 cm de profondeur sont semblables à celles mesurées en surface, bien que l'écart de température entre les expériences semble un peu plus prononcé.

Avec les profondeurs croissantes, peu importe le débit d'arrosage, on observe un amortissement et un déphasage des pics de température de plus en plus importants. On remarque aussi que l'écart de température entre les quatre expérimentations est de plus en plus faible avec la profondeur. À 2 cm de profondeur, l'écart de température entre l'expérimentation sans arrosage et celle avec un débit important (Q_3) atteint jusqu'à

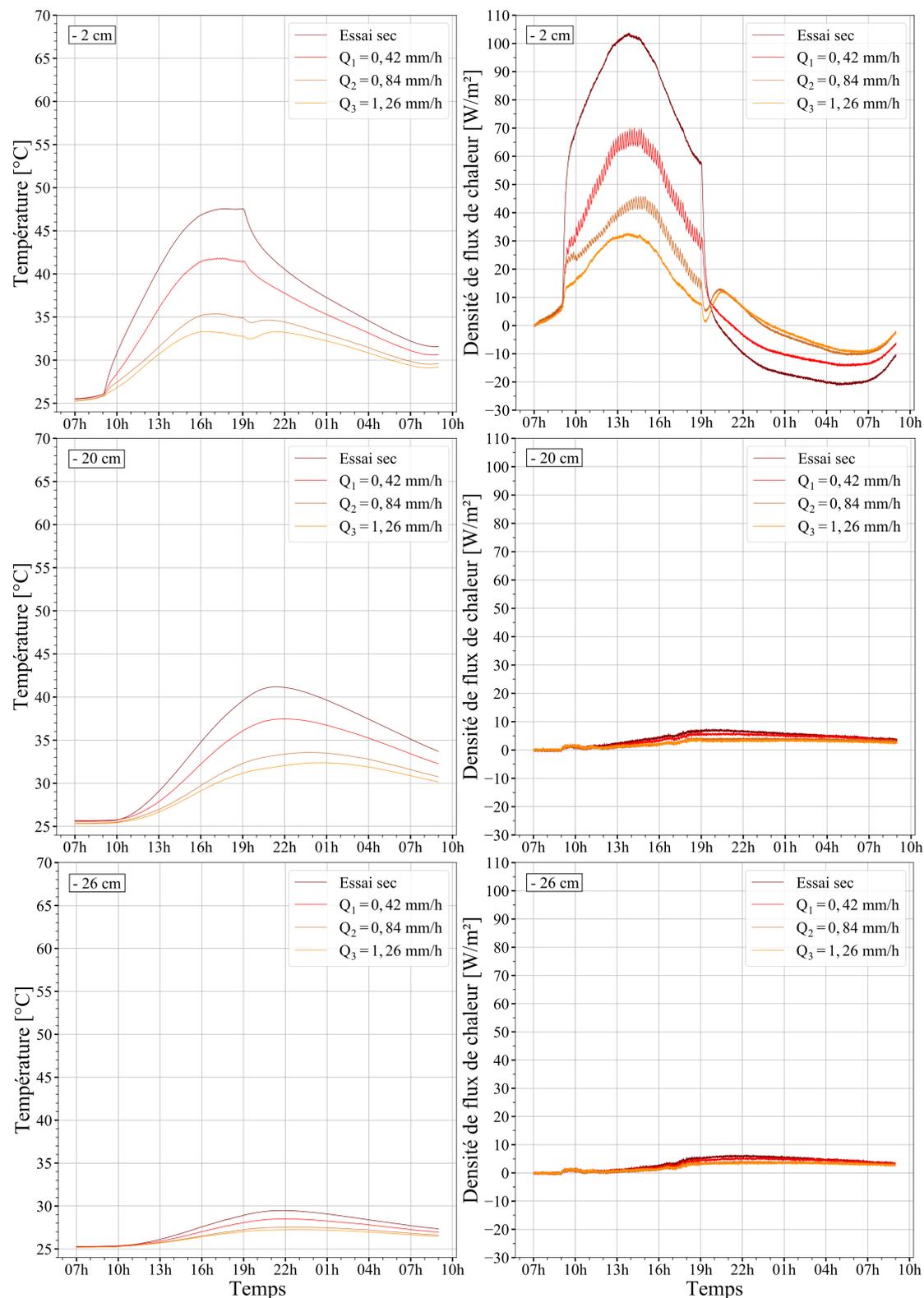


FIGURE 6.3 – Évolution temporelle des températures (à gauche) et des densités de flux de chaleur (à droite) mesurées à 2 cm de profondeur (en haut), à l'interface béton/isolant (au milieu) et à 26 cm de profondeur (en bas) pour différents débits d'arrosage.

15 °C alors que cet écart n'est que de 2 °C au maximum à 26 cm. Autrement dit, l'effet de l'arrosage sur le comportement thermique de la structure est important proche de la surface, mais relativement faible en profondeur. Aussi, plus le débit est important, plus le gradient de température entre le haut et le bas de la structure est faible. En effet, on constate que l'écart de température entre 2 cm et 26 cm de profondeur est de 18 °C au maximum lorsque la surface n'est pas arrosée alors qu'il n'est plus que de 6 °C au maximum lorsque la surface est arrosée avec un débit important (Q_3). Par ailleurs, contrairement aux températures de surface et à celles mesurées à 2 cm de profondeur, on remarque que plus le débit est important et plus les maximums de température à 20 cm et à 26 cm sont atteints tard dans la nuit.

En journée, le flux de chaleur mesuré à 2 cm de profondeur croît d'autant plus progressivement que le débit est faible. Alors qu'il atteint 105 W.m^{-2} lorsque la surface n'est pas arrosée, il n'est que de 33 W.m^{-2} au maximum pour l'expérience avec le débit le plus important (Q_3). On observe aussi que le flux de chaleur mesuré à 2 cm fluctue pour l'expérience avec le faible débit (Q_1) et pour celle avec le débit intermédiaire (Q_2). Ces fluctuations sont dues à celles de la température de surface qui n'ont lieu que pour ces deux débits. Lorsque le simulateur solaire s'éteint, pour l'expérience sans arrosage et celle avec un faible débit, le flux de chaleur chute rapidement. Il devient négatif en quelques heures et le reste pendant toute la phase nocturne. Pour les deux autres expériences, le flux de chaleur commence par chuter puis augmente de nouveau peu de temps après. Ces variations sont en accord avec celles de la température de surface. Après avoir atteint un maximum aux alentours de 21 h, le flux de chaleur diminue progressivement jusqu'à devenir négatif. On note que plus le débit est important plus le flux de chaleur devient négatif tardivement dans la nuit.

Enfin, peu importe le débit, les flux mesurés à 20 cm et à 26 cm de profondeur n'augmentent que faiblement, ne dépassant pour aucune des quatre expériences les 8 W.m^{-2} à 20 cm de profondeur et les 5 W.m^{-2} à 26 cm de profondeur. L'effet de l'arrosage sur les flux de chaleur mesurés en profondeur est donc faible.

6.1.2 Bilan thermique de surface

Rayonnement net

La Figure 6.4 montre l'évolution du rayonnement net reçu par la surface de l'échantillon ITI standard en fonction du débit d'arrosage. Il est calculé de la même façon que pour les essais sans arrosage (section 3.4.1). La seule différence porte sur les propriétés optiques de la membrane d'étanchéité lorsqu'elle est arrosée.

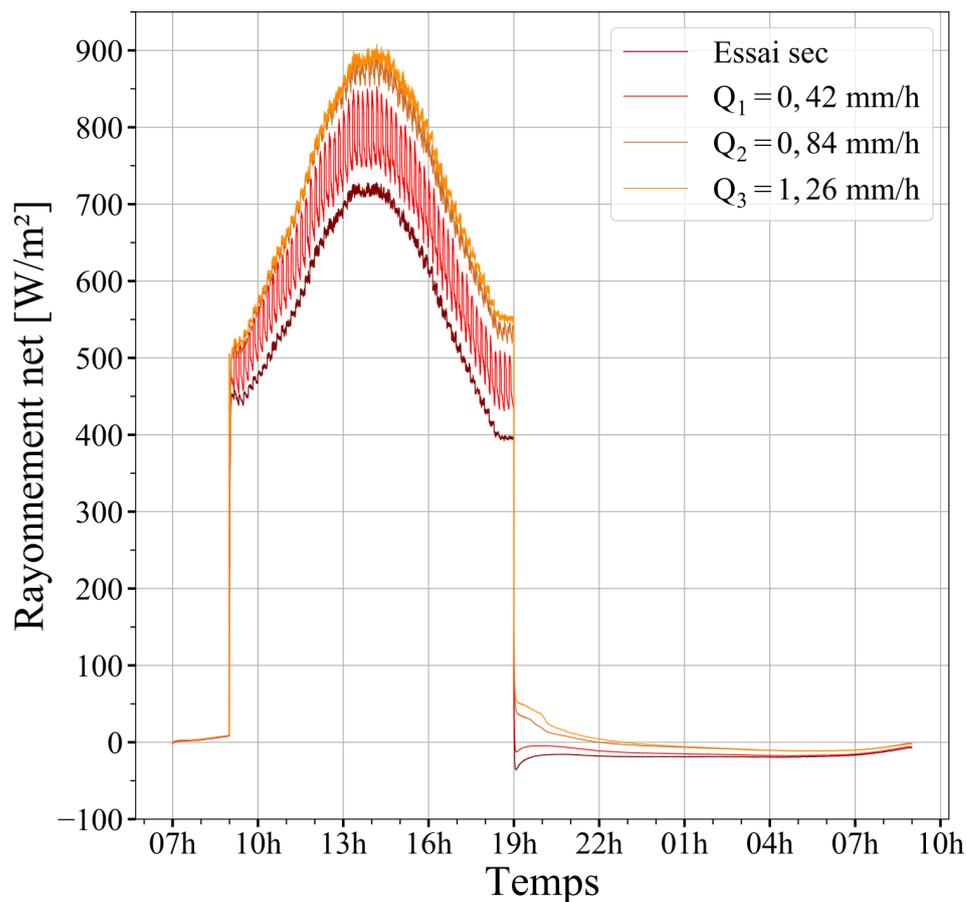


FIGURE 6.4 – Évolution temporelle du rayonnement net reçu par l'échantillon de toiture ITI standard pour différents débits d'arrosage.

Sur la période de fonctionnement du simulateur solaire entre 9 h et 19 h, peu importe le débit d'arrosage, le rayonnement net suit l'évolution de l'éclairement, mais aussi de la radiosité impactée par les variations de la température de surface. L'allure des courbes est similaire d'une expérience à l'autre mais l'amplitude du flux diffère.

Plus le débit d'arrosage est important plus le rayonnement net est élevé : il passe d'environ 725 W.m^{-2} au maximum lorsque la surface n'est pas arrosée à presque 900 W.m^{-2} lorsque la surface est arrosée avec un débit important (Q_3). Plusieurs facteurs expliquent cette augmentation. Lors des expériences avec arrosage, la température de surface est bien moins importante comparée à l'expérience sans arrosage. Pour ces expérimentations, le rayonnement GLO émis par la surface est alors moins important ce qui à pour conséquence d'augmenter le rayonnement net. D'autre part, lorsque la surface est mouillée, sa réflectivité solaire diminue de 0,07 à 0,03 ce qui entraîne une augmentation de l'absorption du rayonnement CLO. Enfin, lorsque la surface est arrosée, son émissivité est égale à celle de l'eau soit une augmentation de 7 points par rapport à l'expérience sans arrosage. Le rayonnement GLO réfléchi par la surface diminue et donc le rayonnement net augmente.

Enfin, pour l'expérience pour laquelle le débit est le plus faible (Q_1), on constate des fluctuations du rayonnement net de presque 100 W.m^{-2} au maximum. Ces fluctuations sont principalement dues à celles de la température de surface, donc de l'émissivité GLO.

Lorsque le soleil artificiel s'éteint, le rayonnement net chute et devient, en quelques minutes, négatif pour l'expérience sans arrosage et pour celle avec un faible débit. Durant toute la phase nocturne, la surface est en déficit radiatif : elle émet plus de rayonnement GLO qu'elle n'en reçoit. Cela coïncide avec les observations réalisées sur les températures de surface nocturnes ($T_s > T_a$). Pour les deux autres expériences, le rayonnement net chute, mais reste positif tant que la température de surface est inférieure à celle de l'air. Lorsque la température de surface devient supérieure à celle de l'air, le rayonnement net devient légèrement négatif : la surface émet plus de rayonnement GLO qu'elle n'en reçoit.

Convection

On rappelle que, lorsque la surface est arrosée, il n'est plus possible de mesurer les échanges convectifs directement avec les capteurs de surface qui sont fortement perturbés par la présence d'eau. Ils sont alors calculés grâce au coefficient de convection thermique moyen estimé à partir des mesures réalisées pendant les expérimentations sur

les quatre structures sèches. La Figure 6.5 présente la densité de flux convectif mesurée par les capteurs de surface pendant les quatre expérimentations sans arrosage en fonction de la différence de température entre la surface et l'air. Le coefficient de convection thermique est estimé en effectuant une régression linéaire sur l'ensemble du jeu de données (les quatre échantillons secs).

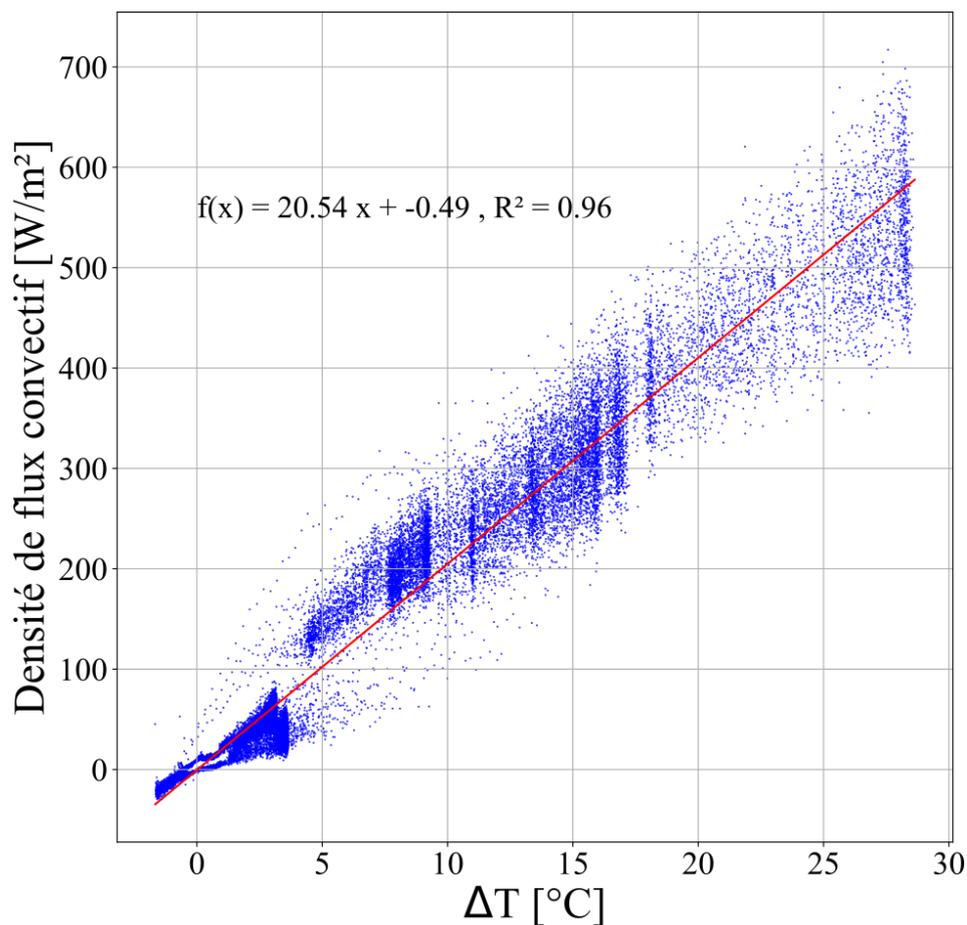


FIGURE 6.5 – Densité de flux convectif mesurée pendant les quatre expérimentations sans arrosage avec les capteurs de surface en fonction de la différence de température entre la surface et l'air.

Finalement, les échanges convectifs sont calculés à partir du coefficient de convection thermique moyen ($20,55 \pm 0,03 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$) et de la différence de température entre l'air et la surface mesurée pendant chacune des expériences. Dans la deuxième partie de ce manuscrit, pour harmoniser la méthodologie et les comparaisons, les échanges

convectifs de l'expérience sans arrosage sont également calculés à l'aide du coefficient de convection thermique moyen et non avec la mesure directe réalisée pendant les expérimentations. Les résultats des quatre expériences sont donc obtenus en appliquant la même méthodologie. On notera que, pour l'échantillon de toiture ITI standard, les échanges convectifs nocturnes estimés grâce au coefficient de convection thermique moyen sont légèrement surestimés par rapport à la mesure directe réalisée avec les capteurs.

La Figure 6.6 illustre l'évolution de la densité de flux convectif pour l'échantillon de toiture ITI standard en fonction du débit d'arrosage.

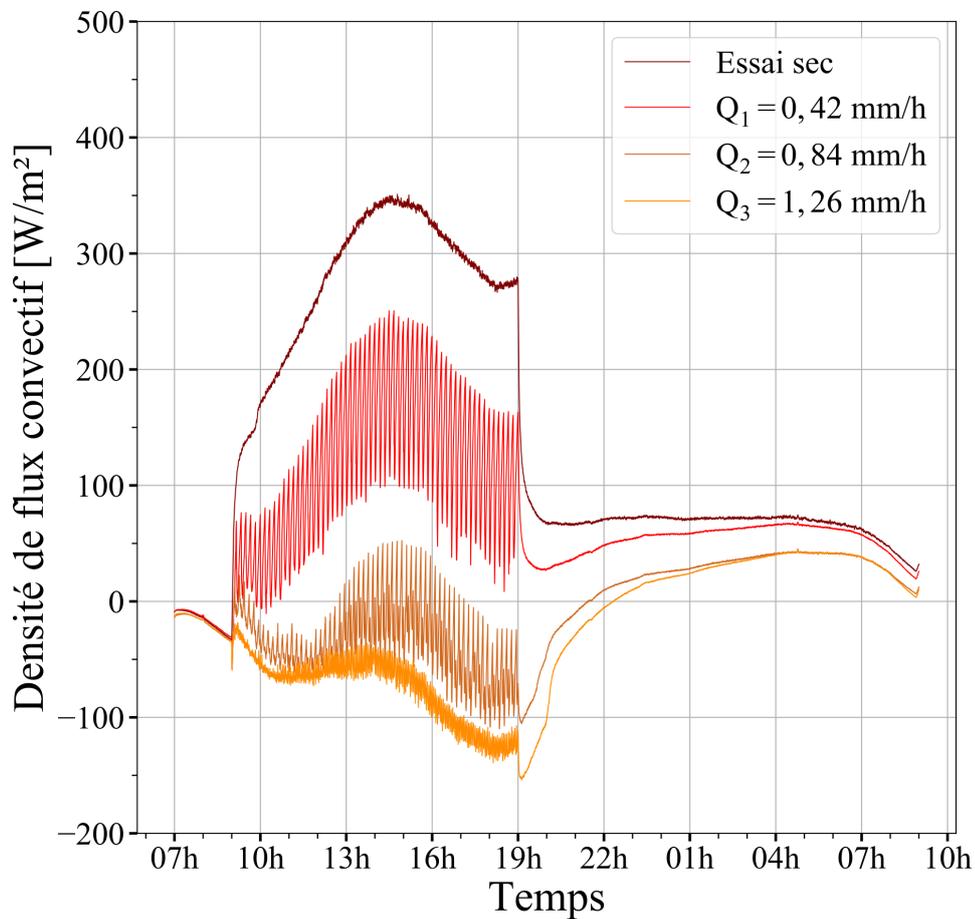


FIGURE 6.6 – Évolution temporelle de la densité de flux convectif pour différents débits d'arrosage pour l'échantillon de toiture ITI standard.

En journée, plus le débit d'arrosage est important plus les échanges convectifs

sont faibles. On constate même que lorsque le débit est suffisant, les échanges convectifs diurnes deviennent négatifs (car $T_s < T_a$). Pour les expériences avec les débits Q_1 et Q_2 , la densité de flux convectif fluctue respectivement de 160 W.m^{-2} et 100 W.m^{-2} au maximum. Ces fluctuations sont causées par celles de la température de surface. Pour l'expérience avec le débit Q_3 , comme le débit est suffisamment important, les échanges convectifs ne fluctuent plus et sont négatifs pendant la totalité de la phase diurne. Ketan et al. [83] observent également un changement de signe du flux convectif en arrosant entre 7 h et 7 h30 du matin avec un débit de $0,167 \text{ kg.min}^{-1}$ une toiture dont la composition est semblable à la nôtre. Ce court arrosage fait suffisamment diminuer la température de surface pour qu'elle devienne inférieure à celle de l'air. Cela n'est pas surprenant puisque au moment de l'arrosage, la température de surface est à peine supérieure à celle de l'air.

La nuit, plus le débit est important, plus les échanges convectifs sont faibles. On note que pour les expériences avec les débits Q_2 et Q_3 , les échanges convectifs deviennent positifs quelques heures après l'extinction du simulateur alors qu'ils étaient négatifs le reste de la journée.

Conduction

Lorsque la surface est arrosée, le flux de chaleur absorbé par la surface ne peut plus être déduit directement du bilan thermique comme pour les essais secs. Il est donc calculé à l'aide de la conductance effective moyenne de la partie supérieure de l'échantillon.

Cette dernière est estimée à partir du flux conductif absorbé par la surface pendant la phase diurne de l'expérience sans arrosage. Comme illustré sur la Figure 6.7, la densité de flux conductif au niveau de la surface (V_0^{sec}) est tracée en fonction de la différence entre la température de surface et celle mesurée à 2 cm de profondeur ($T_s^{sec} - T_{2\text{ cm}}^{sec}$). Une régression linéaire est ensuite effectuée et dont la pente correspond à la conductance effective. Comme la densité de flux conductif augmente puis diminue très fortement à la suite de l'allumage du simulateur solaire, la première heure de la phase diurne n'est pas prise en compte pour cette régression.

Finalement, il semblerait que pour chaque degré d'écart entre la température me-

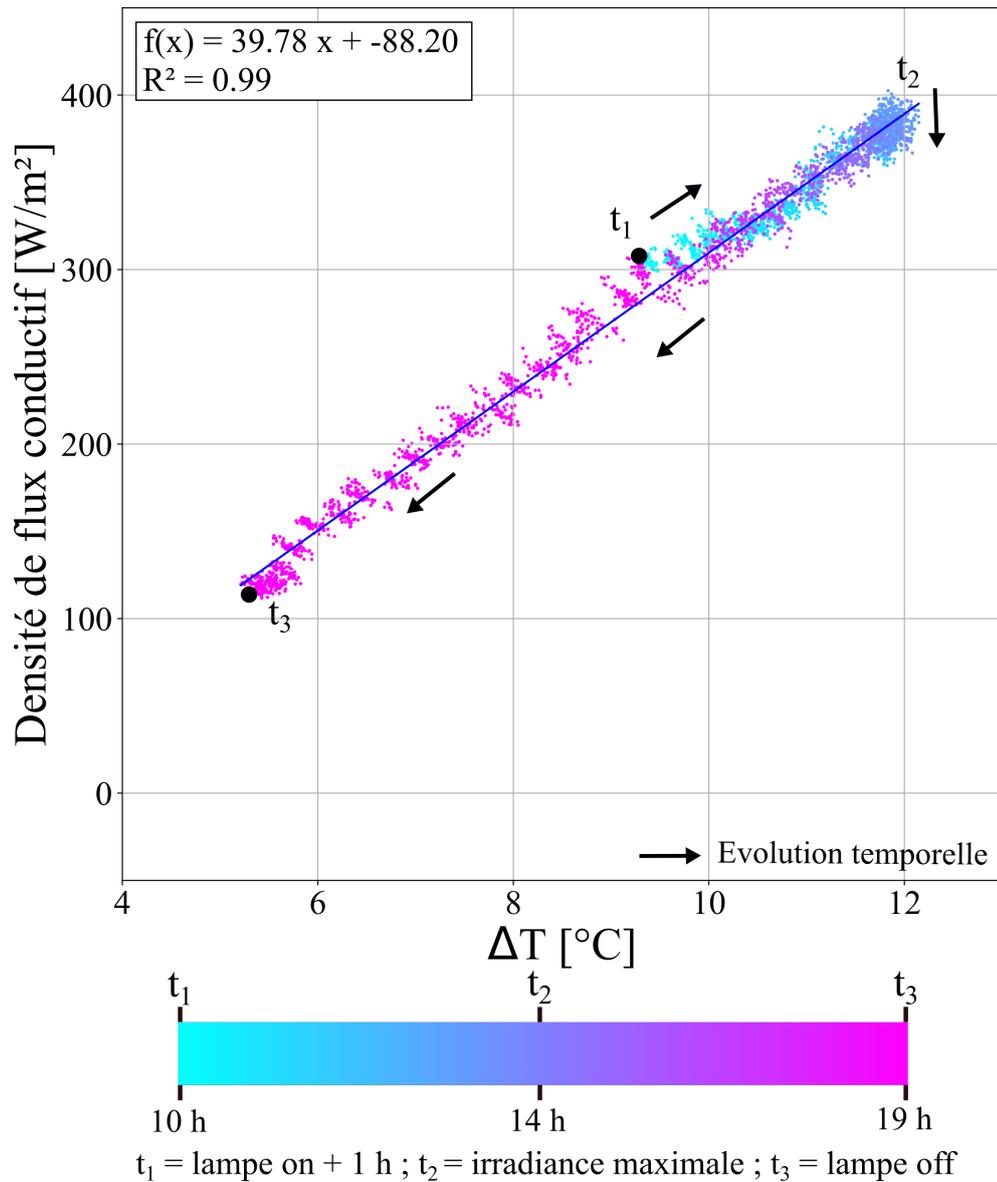


FIGURE 6.7 – Densité de flux conductif de surface en fonction de la différence entre la température de surface et celle mesurée à 2 cm de profondeur pour l'échantillon de toiture ITI standard sans arrosage.

surée en surface et celle à 2 cm de profondeur, la couche de 2 cm d'épaisseur conduit environ $39,8 \pm 0,2 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$. On remarque que l'ordonnée à l'origine n'est pas nulle ce qui traduit que le régime stationnaire n'est pas atteint.

La densité de flux conductif absorbée par la surface arrosée est donc obtenue en multipliant la conductance effective moyenne par la différence de température entre la surface et à 2 cm de profondeur. Les résultats sont présentés Figure 6.8. Il est important de noter que la nuit, lorsque la totalité de l'eau s'est évaporée (donc que la surface et les capteurs sont totalement secs), la densité de flux conductif est estimée comme pour les expérimentations sans arrosage, c'est-à-dire à partir du résidu du bilan thermique de la surface lorsqu'elle est sèche ($V_0 = R_n - H$)

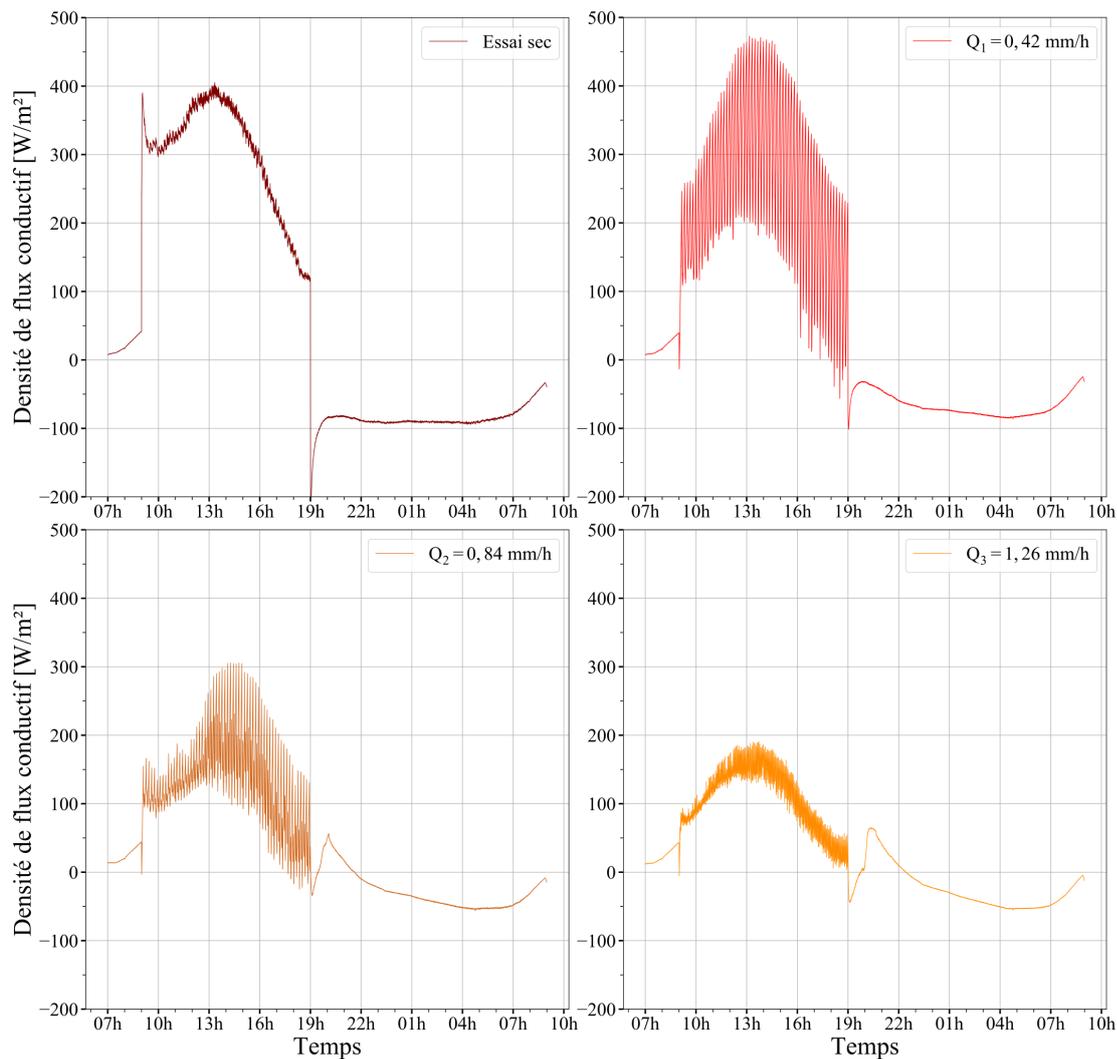


FIGURE 6.8 – Évolution temporelle de la densité de flux conductif au niveau de la surface de l'échantillon de toiture ITI standard pour différents débits d'arrosage.

En journée, plus le débit est important, moins le flux augmente rapidement et plus la valeur maximale atteinte est faible. Pour l'expérience avec un faible débit (Q_1) et celle avec un débit intermédiaire (Q_2), on observe des fluctuations importantes du flux conductif qui sont dues, comme pour les échanges convectifs, aux fluctuations de la température de surface. Lorsque la surface est suffisamment arrosée, ces fluctuations s'estompent.

Pour l'expérience sans arrosage et celle avec un faible débit, le flux conductif est négatif toute la nuit (phase de déstockage). Pour les deux autres expériences, on constate que la densité de flux, après avoir chuté suite à l'extinction du simulateur, augmente de nouveau jusqu'à redevenir positive. Après avoir atteint un maximum, le flux décroît et redevient négatif un peu avant 22 h pour l'expérience avec le débit intermédiaire (Q_2) et un peu après 23 h pour l'expérience avec le débit important (Q_3).

Flux rafraîchissant

La densité de flux rafraîchissant, déduite du bilan thermique, est présentée Figure 6.9 pour chacune des expériences avec arrosage. On rappelle que, pour les trois expériences, la première aspersion a lieu lorsque le simulateur solaire s'allume à 9 h du matin. L'arrosage se désactive au moment où la lampe s'éteint.

Lorsque le débit est faible (Q_1), la densité de flux rafraîchissant moyenne croît légèrement avec l'augmentation de l'éclairement bien que l'on constate principalement des fluctuations importantes autour de la moyenne pendant la totalité de la phase diurne. En effet, peu de temps après que l'eau ait été pulvérisée sur la surface, le flux rafraîchissant dû à l'évaporation de l'eau augmente fortement. Pour ce débit, l'intervalle de temps entre deux arrosages est de 10 minutes, l'eau pulvérisée à chaque aspersion a donc le temps de s'évaporer complètement ou presque. Plus la proportion de surface sèche augmente par rapport à celle de surface mouillée et plus la densité de flux rafraîchissant diminue. Lorsque le simulateur solaire s'éteint, la surface est entièrement sèche, le flux rafraîchissant est donc nul dès le début de la phase nocturne.

Pour l'expérience avec le débit intermédiaire (Q_2), la densité de flux rafraîchissant croît avec l'augmentation de l'éclairement pour atteindre un maximum aux alentours de 14 h 30, puis décroît jusqu'à l'extinction du simulateur solaire. Entre 9 h et 12 h

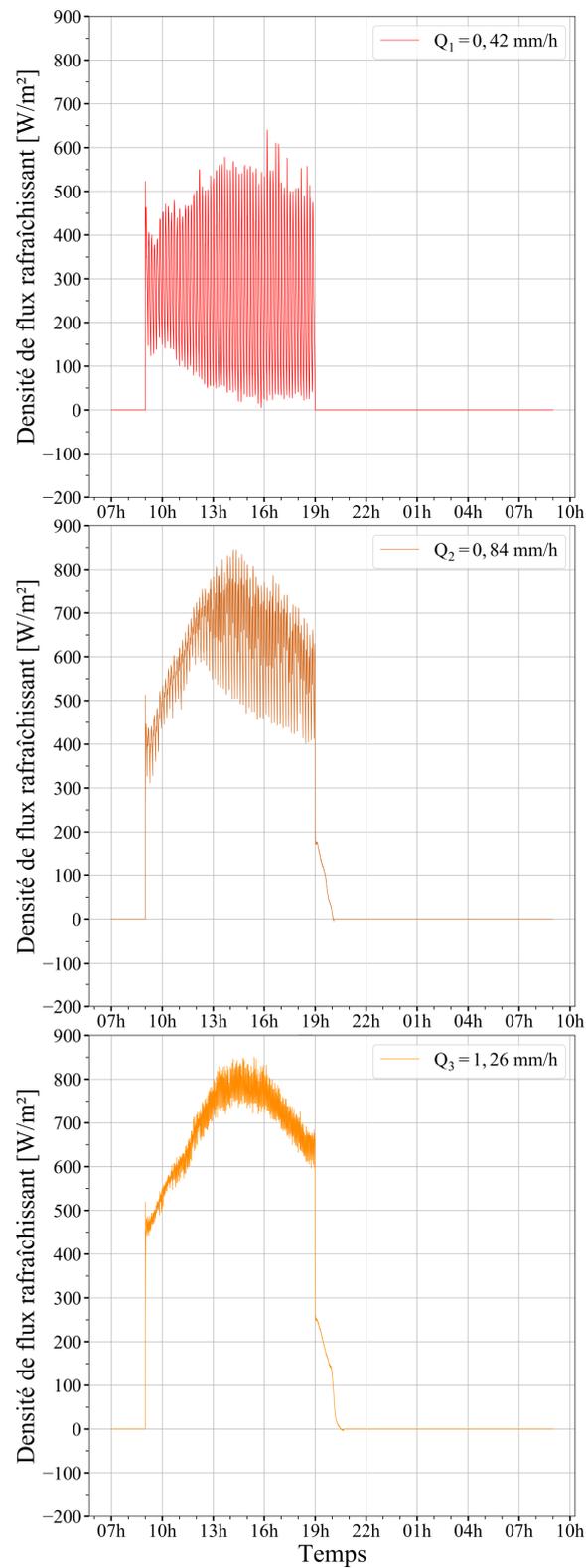


FIGURE 6.9 – Évolution temporelle de la densité de flux rafraîchissant en fonction du débit d'arrosage pour l'échantillon de toiture ITI standard.

le flux rafraîchissant ne fluctue presque pas. Pendant les trois premières heures de la journée, comme le débit est suffisamment important, la surface n'a pas le temps de sécher entre deux aspersion, elle est recouverte d'un film d'eau. Le taux d'évaporation augmente donc avec le rayonnement incident. À partir de 13 h, du fait des conditions climatiques et radiatives à l'intérieur de l'enceinte, la surface sèche suffisamment entre deux pulvérisations pour qu'elle ne soit plus recouverte d'un film d'eau continu mais de gouttelettes. Le taux d'évaporation chute donc en conséquence jusqu'à ce que la surface soit de nouveau arrosée et recouverte d'un film. Lorsque la lampe s'éteint, la surface n'est pas complètement sèche si bien que l'évaporation se poursuit pendant la première heure de la nuit.

Quand le débit Q_3 est mis en œuvre, la densité de flux rafraîchissant croît avec l'augmentation de l'éclairement pour atteindre un maximum aux alentours de 14 h 30, puis décroît jusqu'à l'extinction du simulateur solaire. Comme le débit est suffisamment important, la surface n'a pas le temps de sécher entre deux aspersion, elle est recouverte en permanence d'un film d'eau. Le taux d'évaporation augmente donc avec l'augmentation du rayonnement incident. On ne constate plus de fluctuation importante du flux rafraîchissant. Lorsque la lampe s'éteint, la surface n'est pas sèche, l'évaporation se poursuit durant la phase nocturne pendant 1 h 45 environ.

Enfin, peu importe le débit, la composante sensible du flux rafraîchissant (énergie échangée du fait de la différence de température entre l'eau et la surface) est négligeable devant la composante latente (énergie consacrée au changement d'état de l'eau en vapeur). En effet, même dans l'expérience avec le débit le plus faible, bien que l'écart de température entre la surface et l'eau soit relativement important comparé aux deux autres expérimentations avec arrosage, le flux de chaleur sensible ne représente que 6 W.m^{-2} . Pour l'expérience avec le plus grand débit, comme la température de surface est toujours plus faible que la température de l'eau, le flux de chaleur sensible est négatif et vaut au minimum -11 W.m^{-2} .

On notera que pour l'expérience avec le faible débit, il est possible d'estimer le flux rafraîchissant d'une seconde façon puisque l'on connaît exactement la quantité d'eau qui s'est évaporée pendant la phase diurne. Il est donc possible d'estimer l'énergie totale consacrée au changement d'état de l'eau. En revanche, cette seconde méthode

ne peut pas être appliquée aux deux autres expérimentations puisque la quantité d'eau évaporée n'est pas connue. Comme les deux méthodes convergent globalement, l'estimation du flux rafraîchissant à partir du résidu du bilan thermique est satisfaisante. Les deux méthodes sont comparées pour chacune des structures à l'Annexe B.

Finalement, l'ensemble des flux intervenant dans le bilan thermique de surface pour chacune des expériences est illustré Figure 6.10. Étant donné que les signaux des expérimentations avec arrosage fluctuent beaucoup, l'ensemble des flux ont été moyennés sur 5 minutes glissantes.

L'incertitude sur le rayonnement net est calculée en comptabilisant les incertitudes associées aux propriétés optiques de la membrane d'étanchéité lorsqu'elle est mouillée, à celle de la mesure de la température de surface et à celle de la mesure de l'éclairement. L'incertitude sur les échanges convectifs est calculée en comptabilisant les incertitudes associées au coefficient de convection thermique moyen, à la mesure de la température de surface et à la mesure de la température de l'air. L'incertitude sur la densité de flux conductif est calculée en comptabilisant les incertitudes associées à la conductance effective, à la mesure de la température de surface et à la température mesurée à 2 cm de profondeur. Enfin, l'incertitude sur le flux rafraîchissant est calculée en propageant les incertitudes associées au rayonnement net, au flux convectif et au flux conductif.

Globalement, pendant la journée, l'arrosage permet de réduire de façon significative la quantité de chaleur absorbée par la toiture ainsi que les échanges convectifs mais pas tout à fait dans les mêmes proportions. Entre l'expérience sans arrosage et celle avec le faible débit (Q_1), le maximum atteint par le flux conductif n'est abaissé que de 60 W.m^{-2} alors que celui atteint par les échanges convectifs diminue de plus de 170 W.m^{-2} . Lorsque le débit double (Q_2), la densité de flux conductif est cette fois abaissée au maximum de 140 W.m^{-2} et les échanges convectifs de presque 200 W.m^{-2} par rapport à l'expérimentation avec le débit Q_1 . Enfin, quand la surface est arrosée avec un débit important (Q_3), il semblerait que les deux flux diminuent dans les mêmes proportions, environ 50 W.m^{-2} au maximum par rapport à l'expérience avec un débit intermédiaire. Autrement dit, en dessous d'un certain débit, l'arrosage permet de réduire davantage les échanges convectifs bien qu'il permette aussi de diminuer de façon

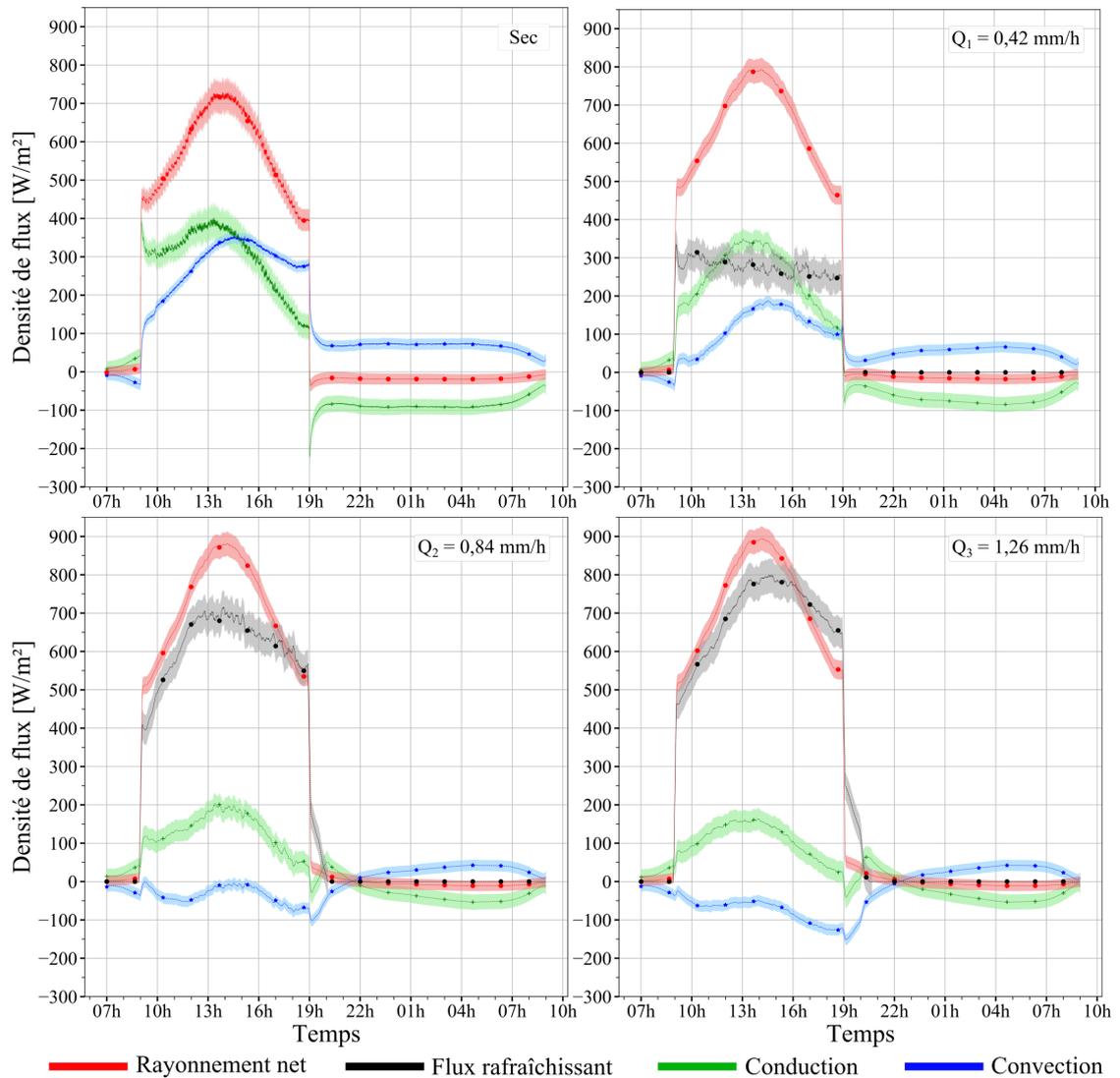


FIGURE 6.10 – Bilan thermique de surface en fonction du débit d'arrosage pour l'échantillon de toiture ITI standard.

significative la quantité de chaleur absorbée par la surface. Au-dessus de ce même débit, l'arrosage impacte faiblement les deux flux mais dans des proportions équivalentes.

On note aussi que l'arrosage augmente significativement le rayonnement net en journée. L'augmentation est de presque $180 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ au maximum lorsque la surface est arrosée avec le débit le plus important. Finalement, une partie du flux rafraîchissant est consacrée à compenser l'augmentation du rayonnement net due à l'arrosage (rétroac-

tion négative). On note que cette augmentation du rayonnement net est similaire à celle constatée dans l'étude de Parison et al. [87] bien que le simulateur solaire utilisé, et donc l'éclairement, diffère.

Pendant la phase nocturne et pour l'ensemble des quatre expériences, le rayonnement net et la densité de flux conductif sont négatifs alors que les échanges convectifs sont positifs. La nuit, la quantité de chaleur déstockée est réduite grâce à l'arrosage. En conséquence, les échanges convectifs le sont également. Finalement, plus le débit est important, plus la quantité de chaleur stockée en journée est faible et plus la quantité de chaleur restituée au milieu extérieur pendant la phase nocturne diminue.

6.1.3 Bilan énergétique

La Figure 6.11 illustre l'évolution du bilan énergétique de la toiture ITI standard sur 24 h lorsque la surface est arrosée à différents débits. Sur la totalité de l'énergie reçue pendant chacune des expériences, soit $19,3 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$, environ deux tiers sont reçus pendant la phase diurne (rayonnement CLO et GLO) et un tiers pendant la phase nocturne (rayonnement GLO uniquement).

En journée, plus le débit d'arrosage augmente, plus la radiosité diurne diminue. Alors qu'elle est de $6,8 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ pour l'expérience sans arrosage, elle n'est plus que de $5,3 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ lorsque la surface est arrosée avec le débit le plus important (Q_3), soit une diminution de $1,5 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$. En conséquence, le rayonnement net augmente de $1,5 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$. On note que cette augmentation est totalement compensée par le flux rafraîchissant dû à l'évaporation de l'eau.

En plus de compenser l'augmentation du rayonnement net, le flux rafraîchissant permet de réduire les échanges convectifs aussi bien la journée que la nuit. Pendant la phase diurne, ils diminuent de $1,5 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ lorsque la surface est arrosée avec un faible débit (Q_1) et deviennent négatifs pour les deux autres expériences. Finalement, lorsque la surface est suffisamment arrosée, elle n'échauffe plus l'air ambiant ni en journée ni la nuit. On constate même que, lorsque le débit est suffisant, l'arrosage permet de rafraîchir l'air ambiant.

On constate aussi que, plus le débit d'arrosage est important, moins la surface ab-

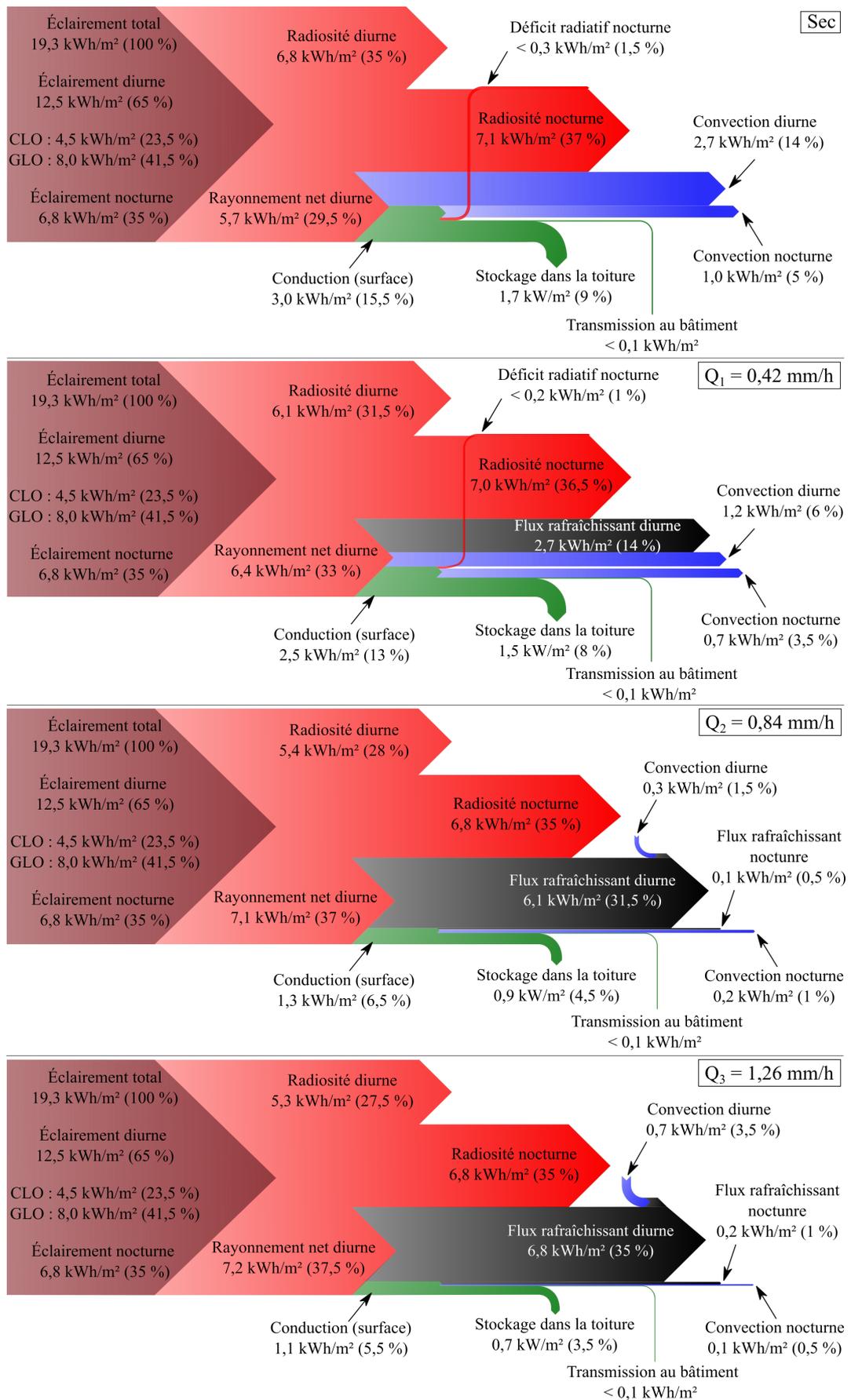


FIGURE 6.11 – Bilan énergétique en fonction du débit pour la toiture ITI standard.

sorbe d'énergie en journée. La quantité de chaleur absorbée est presque divisée par trois entre l'expérience sans arrosage et celle avec le débit le plus important (Q_3). Cette diminution se répercute principalement sur la quantité d'énergie qui reste stockée dans les couches de la toiture après 24 h d'expérience. En effet, ce stock passe de $1,7 \text{ kWh.m}^{-2}$ lorsque la toiture n'est pas arrosée à seulement $0,7 \text{ kWh.m}^{-2}$ lorsque la surface est arrosée avec un débit important. À partir de l'expérience avec le débit intermédiaire (Q_2), la quantité de chaleur restituée la nuit devient presque négligeable puisque qu'elle représente à peine 1,5 % de la quantité d'énergie totale reçue par la toiture pendant l'expérience.

Enfin, pour cet échantillon, bien que la quantité d'énergie transmise à l'intérieur du bâtiment soit faible pour les quatre expériences, elle est abaissée d'un tiers entre celle sans arrosage et celle avec le débit Q_3 passant de $0,089 \text{ kWh.m}^{-2}$ à $0,059 \text{ kWh.m}^{-2}$. On note que cette quantité d'énergie est égale à $0,060 \text{ kWh.m}^{-2}$ lorsque le débit Q_2 est appliqué. L'arrosage permet donc, jusqu'à un certain débit, de réduire la quantité d'énergie qui pénètre à l'intérieur du bâtiment, mais au-delà de ce débit, la réduction supplémentaire est moindre.

Un point important est à noter : pour le débit le plus important (Q_3), $1,4 \text{ g}$ d'eau est pulvérisé sur la surface toutes les 200 secondes soit environ $12,6 \text{ kg.m}^{-2}$ pendant les 10 heures de la phase diurne. L'énergie nécessaire pour évaporer cette quantité d'eau est d'environ $8,75 \text{ kWh}$. Or, on constate que la somme des flux rafraîchissants diurne et nocturne est de $7,1 \text{ kWh}$. Cela signifie que toute l'eau pulvérisée pendant l'expérience ne s'est pas évaporée. En effet, comme le débit est important, l'eau s'accumule sur la surface puis déborde sur les côtés de l'échantillon de toiture. La méthode employée pour estimer le flux rafraîchissant semble donc cohérente.

6.1.4 Débit optimal

D'après les résultats présentés précédemment, il semblerait qu'à partir d'un certain débit les effets rafraîchissants supplémentaires de l'arrosage soient moins marqués. L'objectif de cette section est d'estimer un débit d'arrosage optimal, c'est-à-dire qui maximise les effets rafraîchissants de l'arrosage tout en minimisant la consommation d'eau.

On propose pour cela d'adapter la méthode proposée par Parison et al. [97] qui s'intéressent à l'impact de l'arrosage sur le comportement thermique de matériaux de voirie. Ces travaux sont réalisés en laboratoire et la technique d'arrosage utilisée est identique à la nôtre. La méthode, adaptée à notre expérimentation, est illustrée Figure 6.12.

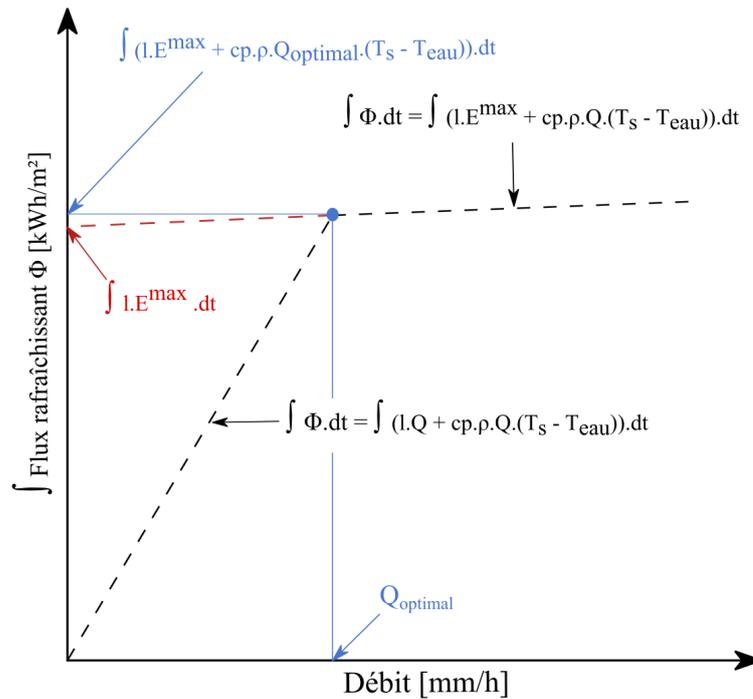


FIGURE 6.12 – Méthode pour estimer le débit optimal.

De manière analogue au travail de Parison et al. [97], on fait l'hypothèse de l'existence de deux régimes bien distincts qui sont matérialisés sur la Figure 6.12 par les lignes en pointillés noirs. Pendant le premier régime, la totalité de l'eau pulvérisée s'évapore. La surface est donc refroidie à la fois par l'évaporation de l'eau (contribution latente) et par la différence de température entre l'eau et la surface (contribution sensible). Plus la quantité d'eau pulvérisée est importante et plus le flux rafraîchissant est grand : la partie latente due à l'évaporation de l'eau augmente proportionnellement au débit (si on néglige la partie sensible). La pente du premier régime est donc connue. Lorsque le deuxième régime est atteint, toute l'eau pulvérisée ne s'évapore pas entre deux aspersion : la surface est en permanence recouverte d'un film d'eau. Le taux d'évaporation

est alors maximal. Une fois ce taux atteint, comme le refroidissement par évaporation a atteint son maximum, le refroidissement supplémentaire n'est plus dû qu'à la différence de température entre la surface et l'eau pulvérisée. Étant donné la faible contribution supplémentaire apportée par l'échauffement sensible du film d'eau, qui peut même être négatif (eau (et air) plus chaude que la surface humide), on néglige cette contribution. La pente au-delà du débit optimal est donc nulle. Finalement, pour tracer le second régime, il suffit d'une expérience avec un débit suffisamment important pour maintenir un film d'eau. L'abscisse du point d'inflexion qui marque le passage du premier au second régime correspond au débit optimal.

En traçant les points correspondant aux différents débits appliqués dans notre expérience selon le système de coordonnées de la Figure 6.12 et en adaptant le modèle retenu pour les débits d'arrosage permettant de maintenir un film d'eau continu à la surface de l'échantillon testé (Q3), on obtient la Figure 6.13 à partir de laquelle on peut déterminer le débit optimal Q_{opt} .

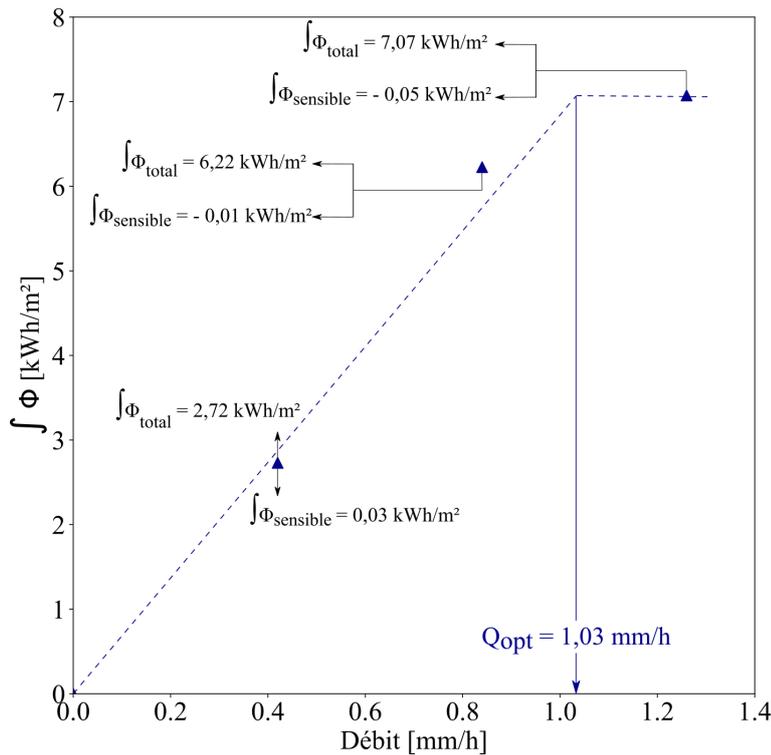


FIGURE 6.13 – Estimation du débit optimal pour l'échantillon de toiture ITI standard.

En appliquant le modèle proposé à nos données expérimentales, le débit optimal pour cet échantillon de toiture serait d'environ $1,03 \text{ mm.h}^{-1}$ et se situe donc entre le débit Q_2 et le Q_3 . Peu importe l'expérience, la contribution sensible représente moins de 1 % du flux rafraîchissant total ce qui confirme que cette contribution est négligeable. Finalement, cette représentation montre bien qu'arroser plus apporte un effet supplémentaire important tant que le débit Q_{opt} n'est pas dépassé. Mais au-dessus de ce débit, comme la contribution latente du flux rafraîchissant est maximale et que la contribution sensible additionnelle est négligeable, les effets rafraîchissants supplémentaires deviennent également négligeables.

Pour l'échantillon de toiture étudié dans ce chapitre, le modèle présenté dans cette section pour estimer le débit optimal semble satisfaisant. Pour confirmer l'allure du second régime, on pourrait réaliser une expérience supplémentaire avec un débit d'arrosage plus important bien que les travaux de Parison et al. [97] ont montré la robustesse du modèle puisque il a été appliqué avec succès sur un grand nombre d'échantillons de chaussée et pour 12 débits d'arrosage (allant de 0 mm.h^{-1} à 3 mm.h^{-1}). En revanche, ce modèle risque de ne pas être adapté pour d'autres types de toiture comme par exemple les toitures-terrasses avec des graviers ou les toitures végétalisées. Avec ces matériaux perméables, une partie importante de l'eau s'infiltrerait sans s'évaporer. A priori, il serait nécessaire de déterminer la pente du premier régime au cas par cas.

6.2 Discussion

L'impact de l'arrosage sur le comportement thermoclimatique de l'échantillon **ITI** présenté dans ce cas d'étude est comparable à d'autres résultats de la littérature notamment en ce qui concerne la réduction de la température de surface et l'augmentation du rayonnement net.

En revanche, on constate des différences importantes entre le maximum du flux rafraîchissant et le débit optimal obtenus dans notre expérience et ceux d'autres études. Notamment, dans les travaux de Parison et al. [87] qui appliquent la même technique d'arrosage sur un échantillon de route en asphalte, le maximum du flux rafraîchissant atteint 525 W.m^{-2} lorsque le débit d'arrosage est de $1,25 \text{ mm.h}^{-1}$. Dans notre cas,

lorsque que le même débit d'arrosage est imposé, le flux rafraîchissant atteint au maximum 800 W.m^{-2} . De plus, pour la structure étudiée dans ce chapitre, le débit optimal est de $1,03 \text{ mm.h}^{-1}$ alors qu'il est de $0,80 \text{ mm.h}^{-1}$ pour la route en asphalte de Parison et al. dont l'albédo est de 0,055 lorsque que la surface est recouverte d'un film d'eau. Donc, bien que les propriétés optiques des deux structures soient semblables et que le débit d'arrosage imposé pendant les expériences soit identique, on constate que les différences entre les deux études sont importantes.

Il est possible de les expliquer grâce aux conditions climatiques imposées pendant les expérimentations et notamment grâce à la température de l'air. Dans notre cas, la température de l'air atteint un maximum de $40 \text{ }^\circ\text{C}$ alors que dans le cas de Parison et al. ce maximum est de $35 \text{ }^\circ\text{C}$. Or, plus l'air est chaud et plus la quantité d'eau sous forme de vapeur qu'il peut contenir est grande. Lorsque la température est maximale dans notre enceinte, l'air peut contenir au maximum environ 50 grammes de vapeur d'eau par mètre cube (50 g.m^{-3}) alors que dans le cas de Parison et al., cette quantité est d'environ 39 g.m^{-3} . Alors que l'humidité absolue imposée est identique, les conditions en température dans notre expérience permettent donc à une plus grande quantité d'eau de s'évaporer. De plus, comme l'éclairement est également plus important, la surface reçoit davantage d'énergie, l'eau s'évapore donc plus rapidement. Cela explique que le débit optimal soit plus important dans notre cas.

6.3 Conclusion

Sur la base du protocole précédent, l'impact de l'arrosage avec trois débits différents a été étudié pour une toiture de faible albédo isolée par l'intérieur.

Globalement, l'impact de l'arrosage constaté sur le comportement thermoclimatique de la structure étudiée dans ce chapitre est comparable à celui observé dans d'autres études sur le sujet, bien qu'il existe certaines différences imputables en grande partie aux conditions expérimentales. La méthodologie présentée semble donc satisfaisante et permet bien de quantifier la modification du comportement thermoclimatique d'une toiture lorsque sa surface extérieure est arrosée.

Pour ce type de toiture, c'est-à-dire isolée par l'intérieur et de faible albédo, l'arro-

sage permet principalement de réduire le flux de chaleur absorbé par la surface pendant la journée. Lorsque le débit optimal est atteint, la quantité de chaleur absorbée par la surface est divisé par trois environ par rapport à l'expérience sans arrosage. En conséquence, la quantité de chaleur restituée pendant la phase nocturne est divisée par dix et celle qui reste stockée dans la couche de béton après 24 h d'expérience par deux et demi.

L'arrosage permet aussi de réduire sensiblement les échanges convectifs en journée. On note même qu'à partir d'un certain débit, les échanges convectifs deviennent négatifs, c'est-à-dire qu'une partie du flux évaporatif rafraîchit l'air ambiant.

En journée, plus le débit d'arrosage augmente et plus les échanges convectifs ainsi que flux de chaleur qui pénètre par la surface diminuent. En revanche, lorsque le débit augmente de $0,84 \text{ mm.h}^{-1}$ à $1,26 \text{ mm.h}^{-1}$, les bénéfices supplémentaires sont moindres. Effectivement, les effets rafraîchissants de l'arrosage continuent d'augmenter et d'être important tant que le taux d'évaporation n'est pas maximal. Or, ce taux atteint son maximum dès lors que la surface est recouverte en permanence d'un film d'eau, donc pour un certain débit d'arrosage. Lorsque ce débit optimal est dépassé, l'eau en excès ne s'évapore plus, donc seule la partie sensible du flux rafraîchissant varie légèrement. Comme la contribution sensible est très faible devant la contribution latente, on peut considérer que les effets rafraîchissants supplémentaires de l'arrosage sont négligeables lorsque le débit optimal est dépassé. Pour l'échantillon de toiture étudié dans ce chapitre le débit optimal est de $1,03 \text{ mm.h}^{-1}$.

Du point de vue du bâtiment, comme la structure est isolée, la quantité de chaleur qui y pénètre est faible, que la toiture soit arrosée ou non. Néanmoins, quand le débit mis en œuvre est suffisant, l'arrosage permet tout de même de réduire d'un tiers cette quantité.

Le chapitre suivant propose d'appliquer la même méthodologie aux quatre échantillons de toiture décrits section 3.2 afin de comparer leur comportement thermoclimatique lorsque leur surface extérieure est arrosée.

Chapitre 7

Comportement thermoclimatique de différentes toitures arrosées

Ce chapitre est dédié à l'étude du comportement thermoclimatique des quatre structures de toiture lorsque leur surface est arrosée. Les structures ainsi que les propriétés thermiques des couches qui les composent sont présentées section 3.2. Les résultats sont obtenus en appliquant strictement la même méthodologie que celle présentée dans le chapitre précédent.

7.1 Résultats expérimentaux

7.1.1 Température et densité de flux de chaleur

Température de surface

La Figure 7.1 illustre l'évolution de la température de surface en fonction du débit d'arrosage pour les quatre échantillons de toiture présentés section 3.2.

En journée, indépendamment de la structure étudiée, plus le débit est important, plus l'augmentation de la température de surface est progressive et moins le maximum atteint est élevé.

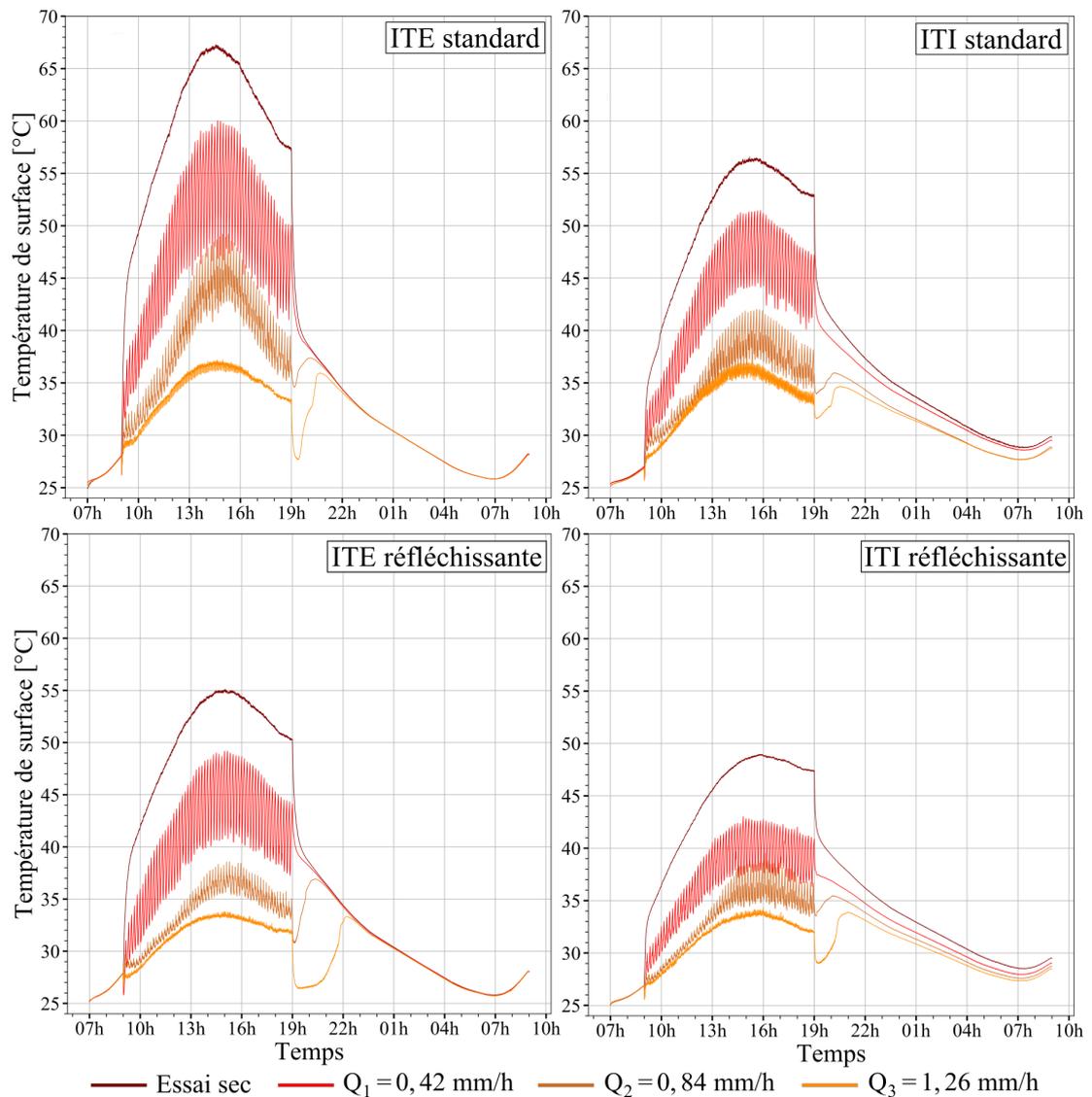


FIGURE 7.1 – Évolution temporelle de la température de surface pour les quatre structures de toiture pour différents débits d’arrosage.

Lorsque le débit d’arrosage est faible (Q_1), la température maximale mesurée en surface est abaissée de plus de 7 °C pour la toiture ITE standard et de 5 °C pour la toiture ITI standard (Table 7.1). Pour les deux toitures réfléchissantes, le maximum atteint par la surface est abaissé de 5,9 °C. On constate aussi que les fluctuations de la température de surface sont plus importantes lorsque la toiture est isolée par l’extérieur. Au maximum, l’amplitude des fluctuations est respectivement de 13 °C et 9 °C pour les échantillons

ITE standard et réfléchissant alors qu'elle n'est que de 7 °C et 6 °C au maximum pour les échantillons ITI. On note aussi que ces fluctuations sont moins importantes pour les deux structures réfléchissantes comparées à leur équivalent standard.

Lorsque le débit d'arrosage double (Q_2), la température de surface en journée est de nouveau abaissée pour les quatre échantillons de toiture par rapport aux expériences avec le débit Q_1 . Cependant, les structures ITE sont davantage affectées par l'augmentation du débit. Effectivement, comparée aux expériences sans arrosage, la température maximale atteinte par la surface est abaissée respectivement de 18 °C et de 16,5 °C pour les échantillons ITE standard et réfléchissant alors que cette baisse est de 14,5 °C et 9,5 °C pour les échantillons ITI.

Échantillons de toiture	Débit	$T_{s\ sec}^{max} - T_{s\ arr}^{max}$	$F_{T_s}^{max}$
ITI standard	Q_1	5 °C	7 °C
	Q_2	14,5 °C	5,5 °C
	Q_3	20 °C	1,5 °C
ITE standard	Q_1	7 °C	13 °C
	Q_2	18 °C	7 °C
	Q_3	30 °C	1 °C
ITI réfléchissant	Q_1	6 °C	6 °C
	Q_2	9,5 °C	4 °C
	Q_3	15 °C	<0,5 °C
ITE réfléchissant	Q_1	6 °C	9 °C
	Q_2	16,5 °C	3,5 °C
	Q_3	21 °C	<0,5 °C

TABLE 7.1 – Réduction et fluctuation maximales ($F_{T_s}^{max}$) de la température de surface en fonction du débit d'arrosage pour les quatre échantillons de toiture.

L'augmentation du débit d'arrosage permet aussi de réduire l'amplitude des fluctuations de la température de surface. De nouveau, les échantillons isolés par l'extérieur sont davantage affectés. En effet, au maximum, l'amplitude des fluctuations est réduite de 54 % pour la toiture ITE standard et de 66 % pour la toiture ITE réfléchissante. Pour les deux échantillons isolés par l'intérieur, l'amplitude des fluctuations n'est réduite que de 38 % pour la toiture standard et de 29 % pour la toiture réfléchissante. Enfin, mis à part l'échantillon ITE standard, l'amplitude des fluctuations de la température de surface pendant la matinée (entre 9 h et 13 h) est très faible, ce qui indique que, pour ce

débit (Q_2), la surface n'a plus le temps de sécher entre deux aspersion.

Lorsque le débit d'arrosage est important (Q_3), la température de surface ne fluctue presque plus (la surface est recouverte en permanence d'un film d'eau continu) et atteint au maximum 37 °C pour les deux échantillons standards et environ 34 °C pour les échantillons réfléchissants.

Lorsque le simulateur solaire s'éteint et que la surface n'a pas ou peu été arrosée en journée, la température de surface décroît pendant la totalité de la phase nocturne pour les quatre échantillons de toiture. Pour l'ensemble des expériences avec les débits Q_2 et Q_3 , la température de surface connaît quelques variations entre l'extinction du simulateur solaire à 19 h et 22 h (explications détaillées section 6.1.1 page 83). On note qu'une fois la lampe éteinte, le temps de séchage est plus important pour les échantillons réfléchissants comparés aux échantillons standards.

Globalement, une fois que la surface est totalement sèche, on constate que l'arrosage en journée n'impacte pas la température de surface des deux échantillons **ITE** pendant la phase nocturne. Pour les structures isolées par l'intérieur, plus le débit d'arrosage est important en journée, plus la température de surface est faible pendant la phase nocturne.

Température et flux de chaleur à 2 cm de profondeur

La Figure 7.2 présente l'évolution de la température et du flux de chaleur mesurés à 2 cm de profondeur en fonction du débit d'arrosage pour les quatre échantillons de toiture.

Dans l'ensemble, les observations faites dans la section précédente sont valables pour les températures mesurées à 2 cm de profondeur. On remarque tout de même quelques différences. Peu importe l'échantillon et le débit d'arrosage imposé, contrairement aux températures mesurées en surface, les températures mesurées à 2 cm de profondeur ne fluctuent que très peu pendant la journée lorsque l'arrosage est activé.

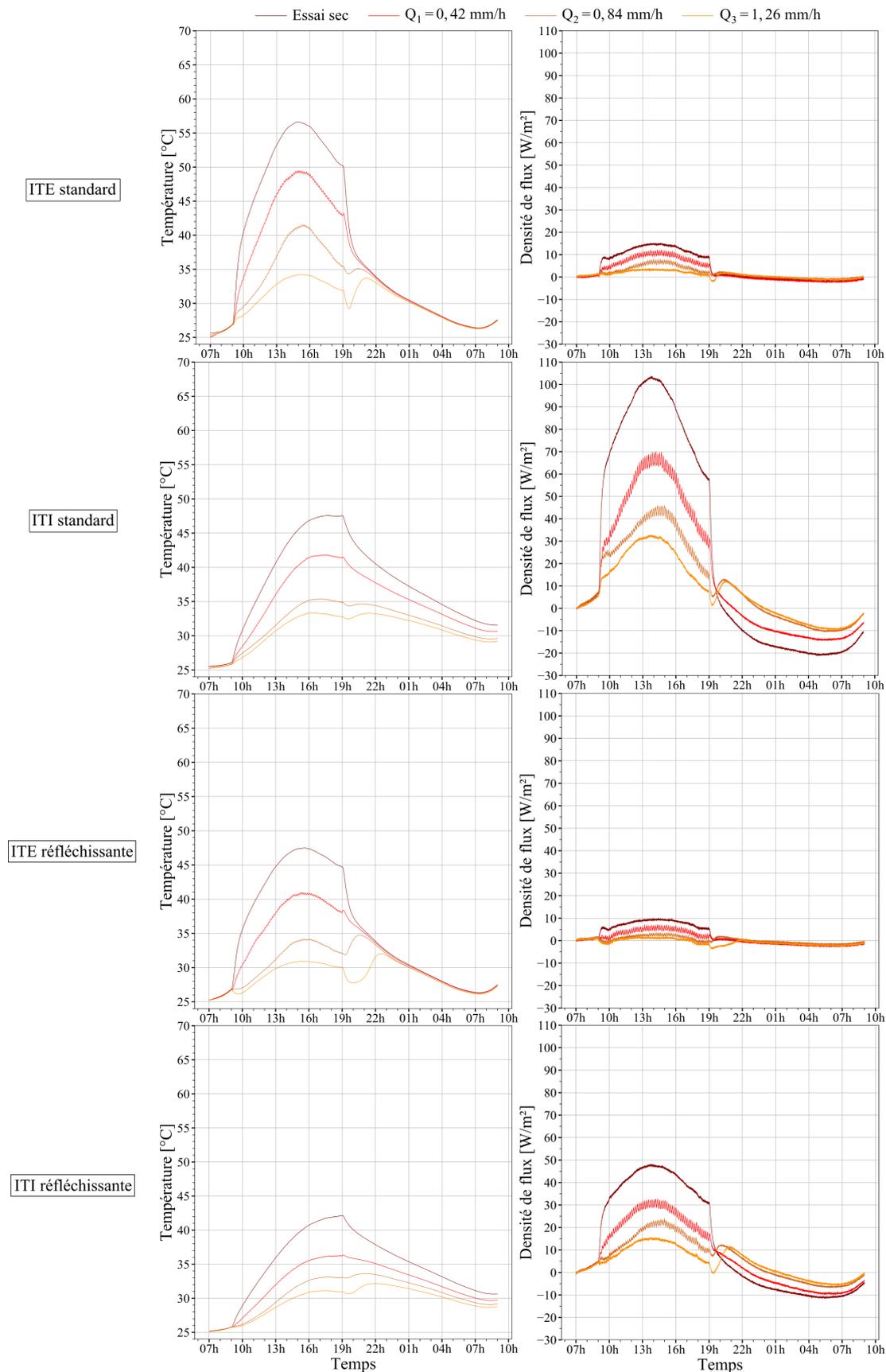


FIGURE 7.2 – Évolution temporelle des températures (à gauche) et des densité de flux de chaleur (à droite) mesurées à 2 cm de profondeur en fonction du débit d'arrosage pour les quatre configurations de toiture.

114 Chapitre 7 : Comportement thermoclimatique de différentes toitures arrosées

Par ailleurs, les variations de la température de surface constatées entre 19 h et 22 h pour les débits Q_2 et Q_3 sont presque inexistantes à 2 cm de profondeur pour les échantillons **ITI**. Pour les échantillons **ITE**, l'amplitude de ces variations est moindre. Enfin, pour les expériences avec les débits Q_2 et Q_3 , la température maximale à 2 cm de profondeur pour les structures réfléchissantes n'est plus atteinte pendant la phase diurne mais pendant les premières heures de la nuit.

Pendant la phase diurne, lorsque le débit d'arrosage n'est pas suffisant, on constate que le flux de chaleur mesuré à 2 cm de profondeur au sein des quatre structures fluctue légèrement, ce qui est cohérent avec les observations réalisées sur les températures mesurées en surface.

En journée, le flux de chaleur mesuré à 2 cm de profondeur au sein des deux structures **ITE** n'est que peu affecté par l'arrosage en valeur absolue. Effectivement, le maximum du flux est abaissé de 12 W.m^{-2} entre l'expérience sans arrosage et l'expérience avec le débit Q_3 pour l'échantillon **ITE** standard et de 8 W.m^{-2} pour l'échantillon **ITE** réfléchissant. Néanmoins, si on s'intéresse à la quantité de chaleur qui a traversé l'échantillon à 2 cm de profondeur pendant la totalité de la journée, l'arrosage a un effet plus important sur la structure réfléchissante. En effet, lorsque le débit d'arrosage Q_3 est appliqué, cette quantité de chaleur est réduite de 80 % pour la structure standard et de 96 % pour la structure réfléchissante par rapport aux expériences sans arrosage. La nuit, l'arrosage n'a aucun impact ou presque.

Le flux de chaleur mesuré à 2 cm de profondeur au sein des structures **ITI** est fortement impacté par l'arrosage de la surface extérieure de la toiture. On constate que le maximum du flux est abaissé de 70 W.m^{-2} entre l'expérience sans arrosage et l'expérience avec le débit Q_3 pour l'échantillon **ITI** standard et de 33 W.m^{-2} pour l'échantillon **ITI** réfléchissant. La quantité de chaleur ayant traversé l'échantillon à 2 cm de profondeur pendant la journée est réduite de 73 % pour les deux structures **ITI**. La nuit, plus le débit d'arrosage appliqué en journée est important, plus le flux de chaleur est faible (en valeur absolue) et plus il change de signe tard dans la nuit. Pour les deux échantillons, la différence d'amplitude des flux nocturnes entre l'expérience avec le débit Q_2 et celle avec le débit Q_3 est presque négligeable.

Température et flux de chaleur plus en profondeur

Pour compléter cette étude, l'évolution des températures et des flux de chaleur mesurés plus en profondeur sont présentés en annexe (C).

Globalement, pour les échantillons **ITE**, l'arrosage n'a plus vraiment d'effet sur les températures et les flux de chaleur mesurés en dessous de l'interface isolant/béton. Même quand le débit est important (Q_3), les différences observées avec l'expérience sans arrosage sont minimales. A titre d'exemple, à 16 cm de profondeur, la différence de température entre l'expérience sans arrosage et celle avec le débit Q_3 n'est que de 2 °C au maximum pour l'échantillon standard et de 1,5 °C pour l'échantillon réfléchissant. Toujours à cette profondeur, la différence d'amplitude du flux de chaleur entre les deux expériences (sec vs Q_3) n'est que de 4 W.m⁻² pour l'échantillon standard et est négligeable pour l'échantillon réfléchissant. Pour cette configuration de toiture, le flux mesuré à 26 cm de profondeur est finalement plus impacté par le changement de réflectivité solaire que par l'arrosage.

En ce qui concerne les échantillons **ITI**, l'arrosage a un effet important sur toute la couche de béton mais devient négligeable à partir de l'interface béton/isolant. Au sein de la couche de béton, plus le débit est important plus les signaux mesurés sont faibles et plats. Il semblerait que l'arrosage n'a aucun effet sur le flux de chaleur mesuré à 26 cm de profondeur au sein de l'isolant.

7.1.2 Conductance effective moyenne

On rappelle que la densité de flux conductif est estimée à partir du résidu du bilan thermique pour les expériences sans arrosage et, lorsque la surface est arrosée, elle est calculée à l'aide de la conductance effective moyenne (détails section 6.1.2). Elle est estimée par régression linéaire comme illustré Figure 7.3.

On notera que cette conductance effective caractérise seulement la partie supérieure de l'échantillon (les deux premiers centimètres) et non la totalité de l'échantillon. On constate qu'elle est plus élevée pour les deux toitures **ITI**. Ce résultat semble cohérent puisque la partie supérieure des échantillons **ITI** est composée de béton alors que celle des échantillons **ITE** est composée d'isolant. On remarque aussi que la conduc-

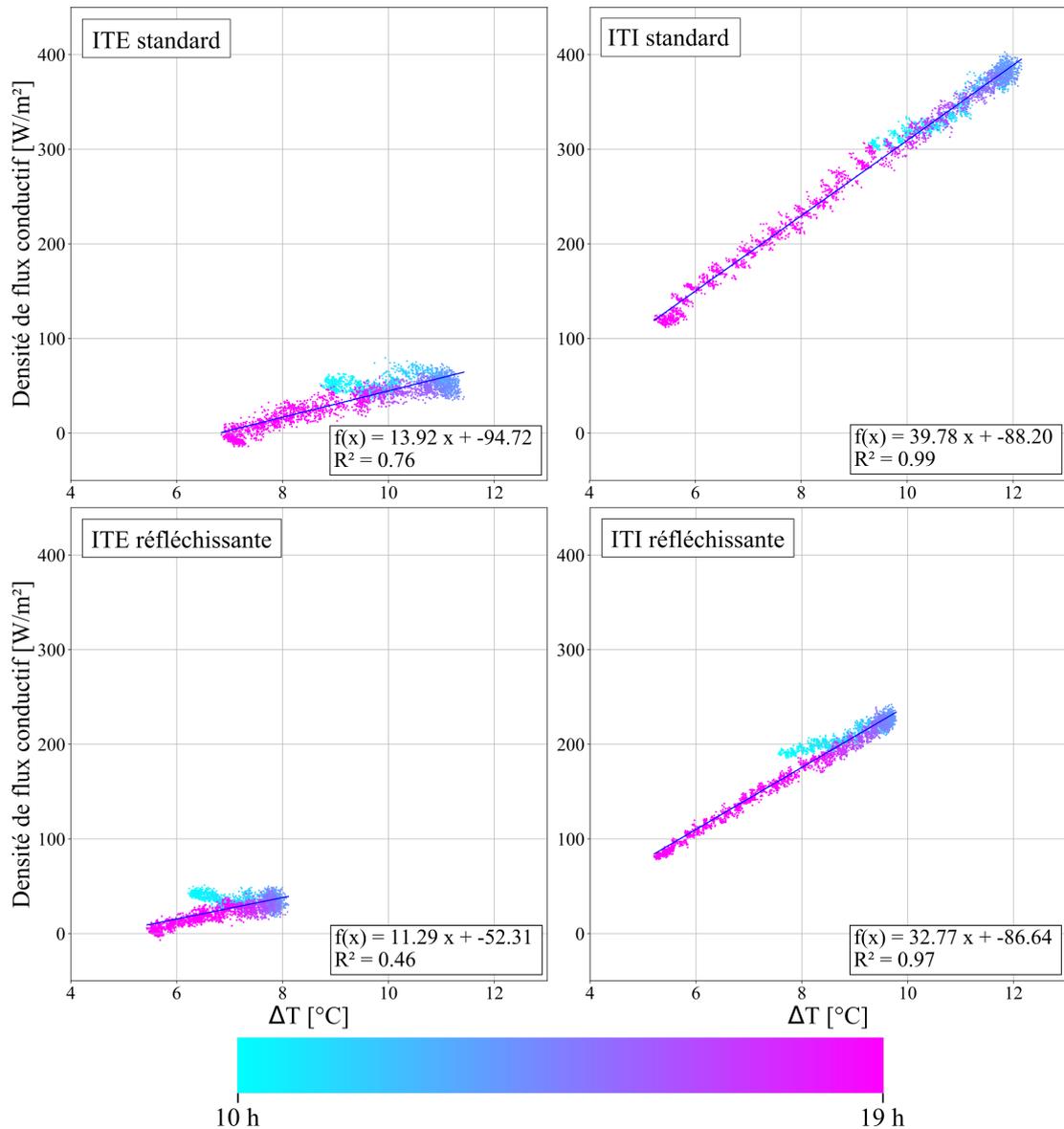


FIGURE 7.3 – Densité de flux conductif en fonction de la différence entre la température mesurée en surface et celle mesurée à 2 cm de profondeur pour les quatre échantillons de toiture lors des expérimentations sans arrosage.

tance des échantillons réfléchissants est moins élevée d'environ 20 % comparée à celle des échantillons standards. Comme cette différence est identique peu importe la place de l'isolant dans la structure, cette différence est attribuée à la membrane d'étanchéité blanche.

7.1.3 Bilan thermique de surface

L'évolution du bilan thermique, lorsque la surface extérieure de la toiture est arrosée aux différents débits, est présentée Figure 7.5 et Figure 7.4 pour les échantillons standards et Figure 7.7 et Figure 7.6 pour les échantillons réfléchissants.

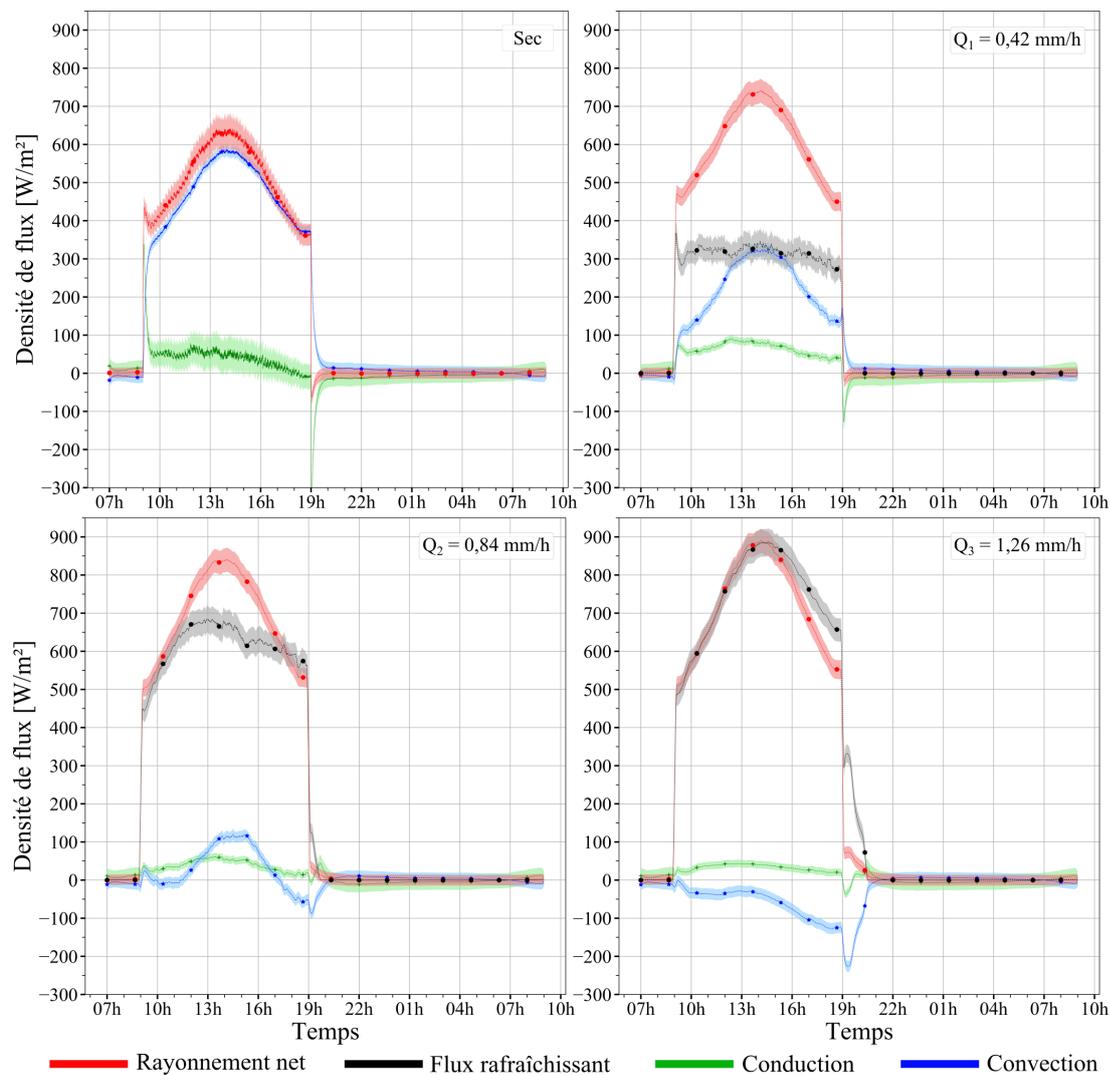


FIGURE 7.4 – Évolution temporelle du bilan thermique de surface pour l'échantillon de toiture ITE standard pour différents débits d'arrosage.

Peu importe l'échantillon de toiture, l'arrosage a pour effet d'augmenter de façon significative le rayonnement net diurne. Néanmoins, on remarque que les échantillons

isolés par l'extérieur sont plus impactés par rapport à leurs équivalents isolés par l'intérieur. Effectivement, entre l'expérience sans arrosage et celle avec le débit Q_3 , le maximum du rayonnement net augmente respectivement de 250 W.m^{-2} et de 150 W.m^{-2} pour les échantillons **ITE** standard et réfléchissant alors que cette augmentation n'est que de 175 W.m^{-2} et 105 W.m^{-2} pour les échantillons **ITI**. Cette différence s'explique en partie de par le comportement thermique des deux configurations de toiture lorsqu'elles sont sèches. Sans arrosage, la température de surface des structures **ITE** est plus importante comparée à leur équivalent **ITI** si bien qu'elles émettent plus de rayonnement **GLO**. Les pertes radiatives en journée sont donc plus importantes, ce qui implique que le rayonnement net est plus faible.

On observe aussi que l'augmentation du rayonnement net due à l'arrosage est plus importante pour les structures standards que pour les structures réfléchissantes. Pour l'ensemble des échantillons de toiture, l'arrosage en journée n'a que peu d'impact sur le rayonnement net pendant la phase nocturne.

Pour les quatre échantillons, plus le débit augmente, plus les échanges convectifs diurnes diminuent. Toutefois, mis à part pour l'échantillon **ITE** standard, la réduction supplémentaire des échanges convectifs devient relativement faible voire négligeable lorsque le débit augmente de $0,84 \text{ mm.h}^{-1}$ à $1,26 \text{ mm.h}^{-1}$. Sauf pour l'échantillon **ITE** standard, les échanges convectifs deviennent négatifs pendant la totalité de la journée à partir d'un certain débit compris entre le débit Q_1 et le débit Q_2 (car $T_s < T_a$). A partir de ce débit, la toiture n'échauffe donc plus l'air extérieur pendant la journée.

Globalement, l'effet de l'arrosage sur les échanges convectifs diurnes est plus marqué pour les structures **ITE**. En revanche, la nuit, l'arrosage n'a pas d'impact significatif sur les échanges convectifs des échantillons **ITE** alors qu'il permet de réduire ceux des échantillons **ITI**.

En ce qui concerne le flux de chaleur qui pénètre l'échantillon en surface, on observe deux comportements bien distincts. Pour les toitures isolées par l'extérieur, le flux absorbé par la surface n'est que peu affecté par l'arrosage. Lorsque le débit d'arrosage est faible (Q_1), la quantité de chaleur absorbée pendant la journée est même plus importante comparée à celle de l'expérience sans arrosage. Il semblerait que cette dernière

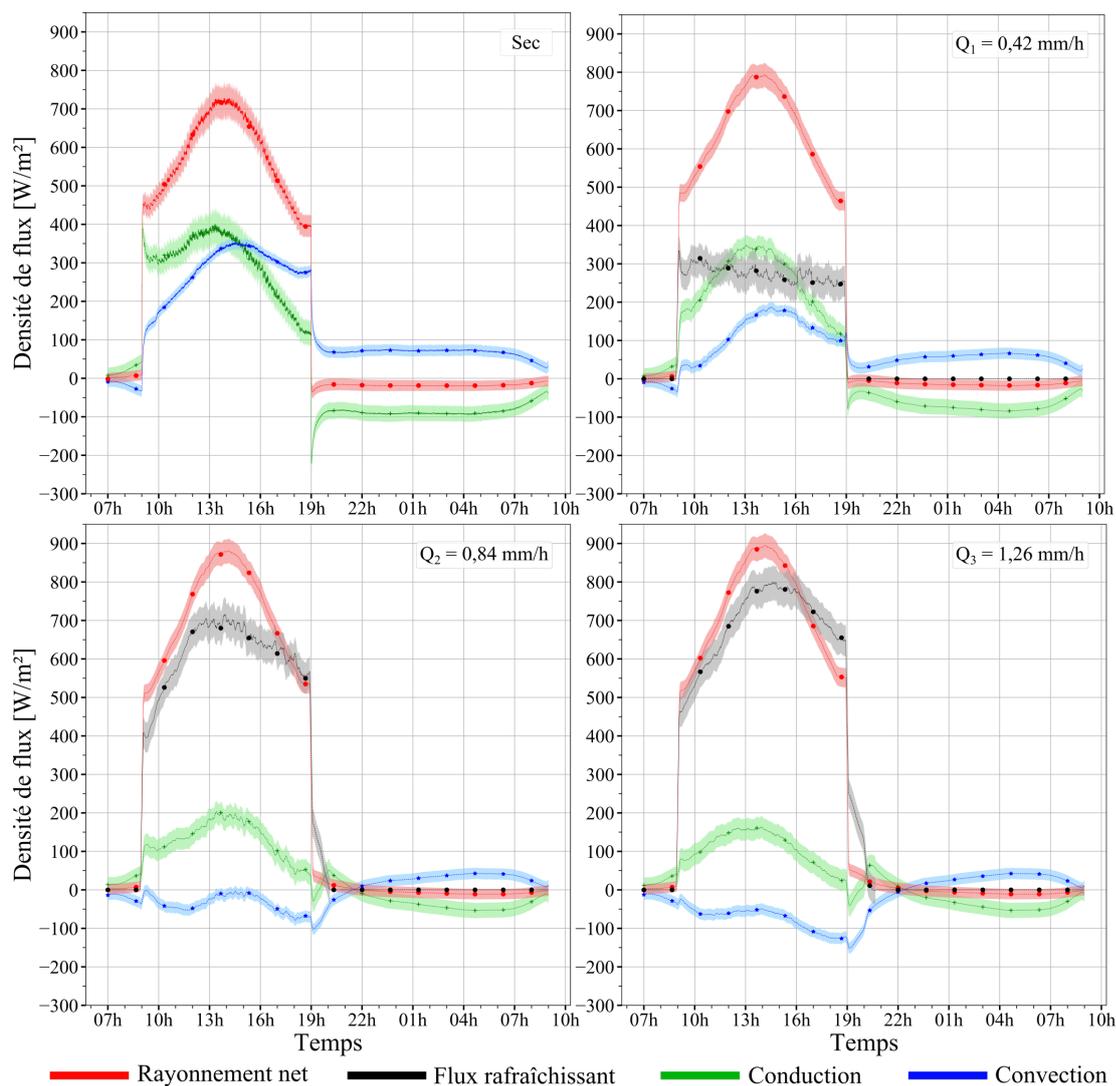


FIGURE 7.5 – Évolution temporelle du bilan thermique de surface pour l'échantillon de toiture ITI standard pour différents débits d'arrosage.

observation ne corresponde pas à une réalité physique mais soit due à l'incertitude liée à l'estimation de la conductance effective. Pour les deux échantillons ITE, le flux conductif devient presque nul dans les premières heures qui suivent l'extinction du simulateur (une fois que la surface est totalement sèche) et le reste pendant la totalité de la phase nocturne.

Pour les deux échantillons isolés par l'intérieur, l'arrosage permet de réduire de

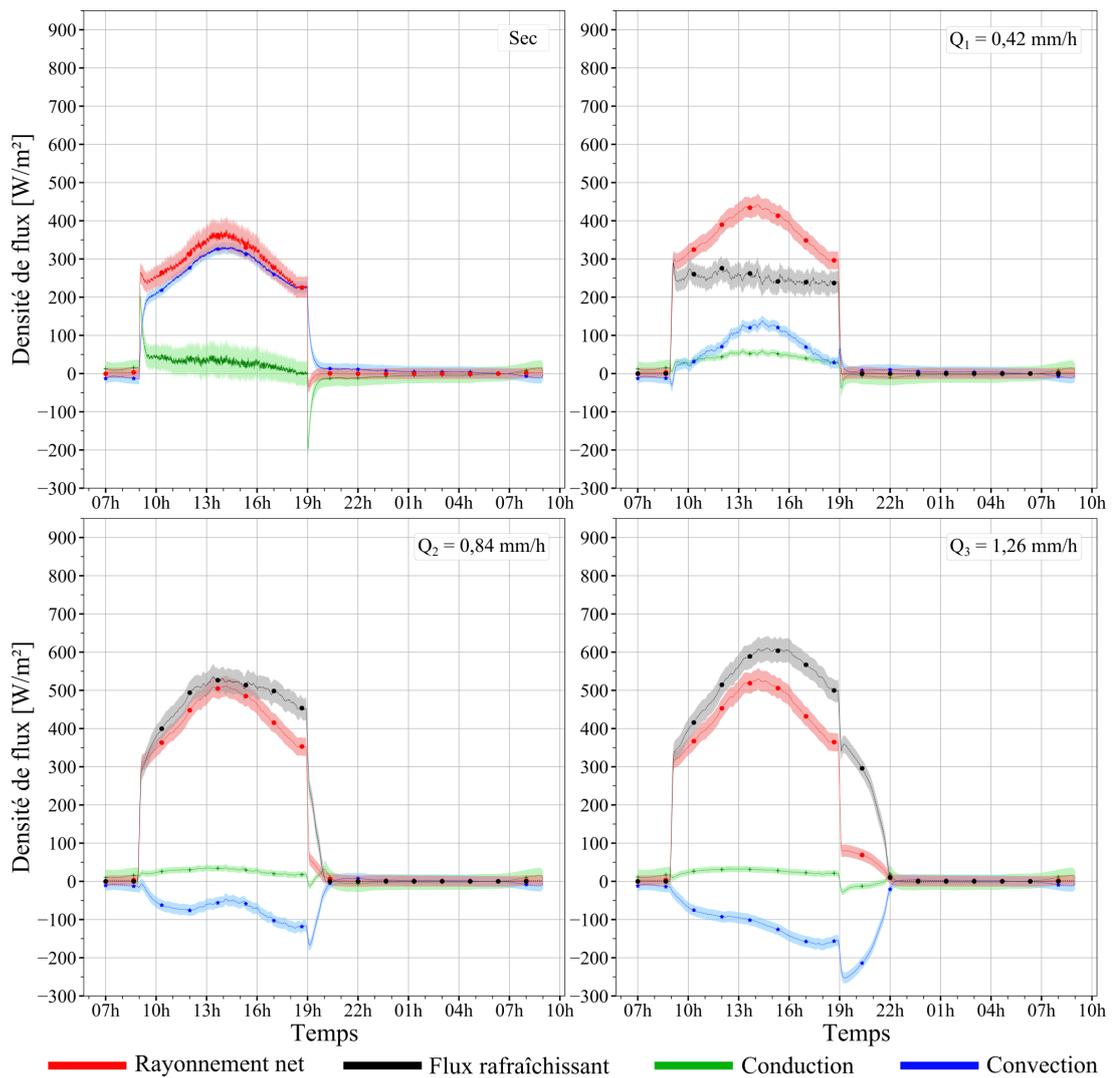


FIGURE 7.6 – Évolution temporelle du bilan thermique de surface pour l'échantillon de toiture ITE réfléchissant pour différents débits d'arrosage.

manière importante le flux de chaleur qui pénètre par la surface en journée puisque les maximums atteints sont divisés par deux entre l'expérience sans arrosage et celle avec le débit Q_3 . Aussi, on remarque que le passage du débit Q_1 au débit Q_2 entraîne une baisse importante du flux conductif alors que le passage du débit Q_2 au débit Q_3 n'a que peu d'effet supplémentaire sur ce dernier. La nuit, plus le débit d'arrosage imposé pendant la phase diurne est important, plus le flux conductif change de signe tard et plus la quantité de chaleur restituée pendant la phase nocturne est faible.

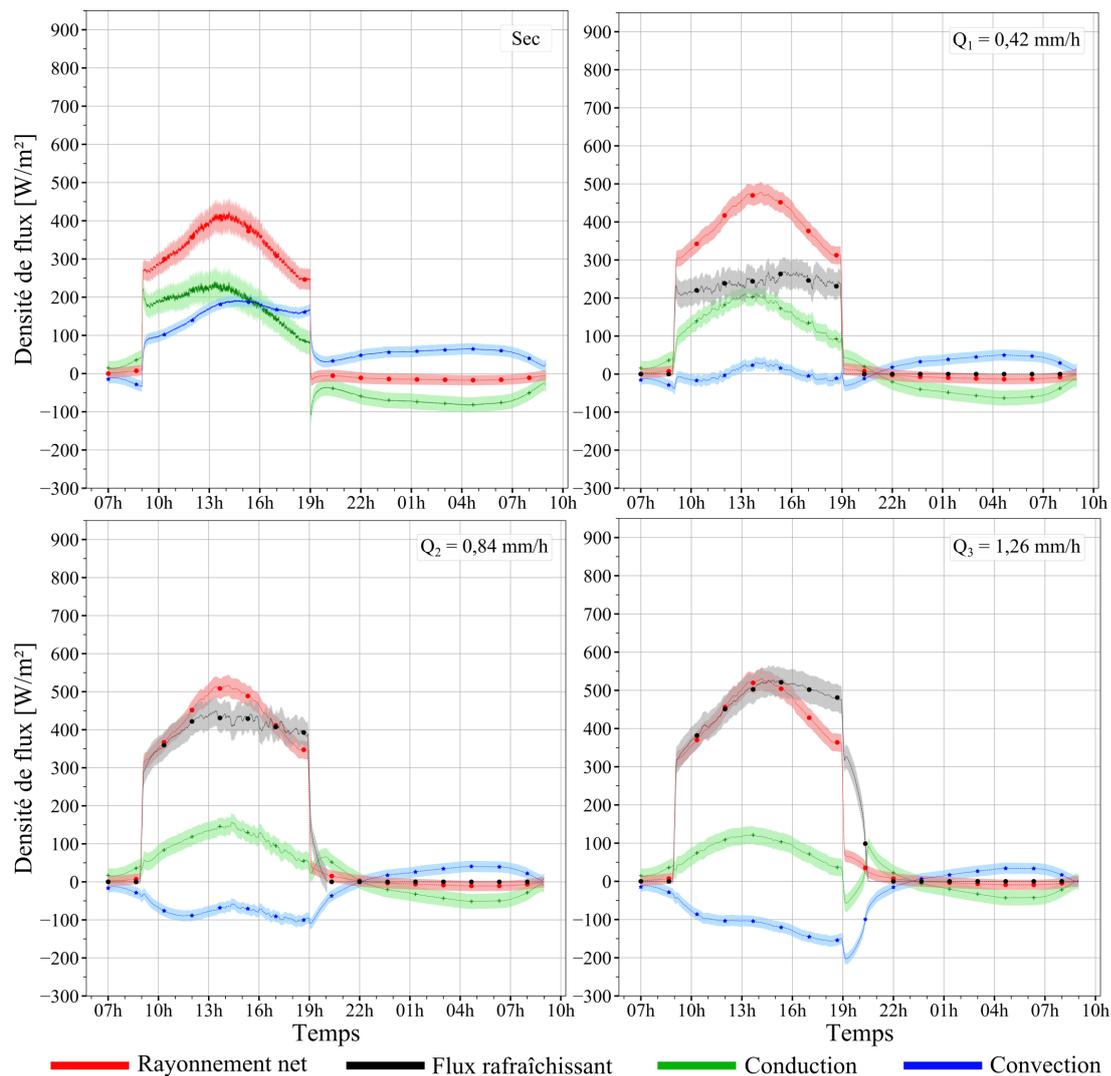


FIGURE 7.7 – Évolution temporelle du bilan thermique de surface pour l'échantillon de toiture ITI réfléchissant pour différents débits d'arrosage.

Enfin, lorsque le débit est faible (Q_1), on constate que le flux rafraîchissant est presque constant et équivalent pour les quatre échantillons. En théorie, pour ce débit, la totalité de l'eau pulvérisée s'évapore pendant la phase diurne et il n'y a aucune perte. Le flux rafraîchissant devrait donc être strictement identique d'un échantillon à l'autre. Les faibles écarts constatés sont principalement dus aux incertitudes. Quand le débit Q_2 est appliqué, le flux rafraîchissant augmente plus franchement pour les deux structures standards comparé aux structures réfléchissantes.

Lorsque le débit Q_3 est appliqué, le flux rafraîchissant évolue comme le rayonnement net entre 9 h du matin et le maximum d'éclairement pour les quatre échantillons. Ensuite, le flux rafraîchissant devient plus important que le rayonnement net et le reste jusqu'à l'extinction du simulateur. Le flux rafraîchissant atteint respectivement un maximum d'environ 800 W.m^{-2} et de 525 W.m^{-2} pour les échantillons **ITI** standard et réfléchissant, et d'environ 875 W.m^{-2} et de 600 W.m^{-2} pour les échantillons **ITE**. Donc, peu importe la place de l'isolant dans la structure, la mise en place de la membrane d'étanchéité réfléchissante entraîne une réduction du maximum du flux rafraîchissant d'environ 275 W.m^{-2} .

Plus le débit d'arrosage est important en journée, plus le flux rafraîchissant devient nul tard dans la nuit. On note d'ailleurs que, pour l'expérience avec le débit Q_3 , il devient nul vers 22 h pour l'échantillon **ITE** réfléchissant alors que pour les trois autres échantillons, le flux rafraîchissant devient nul aux alentours de 20 h 30. Une fois la surface sèche, le flux rafraîchissant est nul pour le reste de la nuit.

7.1.4 Bilan énergétique

La Figure 7.8 illustre l'évolution du bilan énergétique sur 24 h des deux structures de toiture standards lorsque la surface est arrosée à différents débits et la Figure 7.9 celui des deux structures réfléchissantes.

Peu importe la structure, la radiosité diurne diminue avec l'augmentation du débit. Plus la température de surface est élevée lors de l'expérience sans arrosage, plus la diminution de la radiosité diurne due à l'arrosage est importante. Ainsi, pour l'échantillon **ITE** standard cette diminution atteint 30 % entre l'expérience sans arrosage et celle avec le débit Q_3 alors qu'elle n'est que de 11 % pour l'échantillon **ITI** réfléchissant. Cette diminution entraîne une augmentation du rayonnement net. Les bilans radiatifs des structures standards sont davantage affectés par l'arrosage que ceux des structures réfléchissantes tout comme ceux des structures **ITE** par rapport aux structures **ITI** (à réflectivité solaire équivalente).

En journée, pour les quatre échantillons de toiture, les échanges convectifs diminuent de façon plus importante que la quantité de chaleur absorbée par la surface lorsque

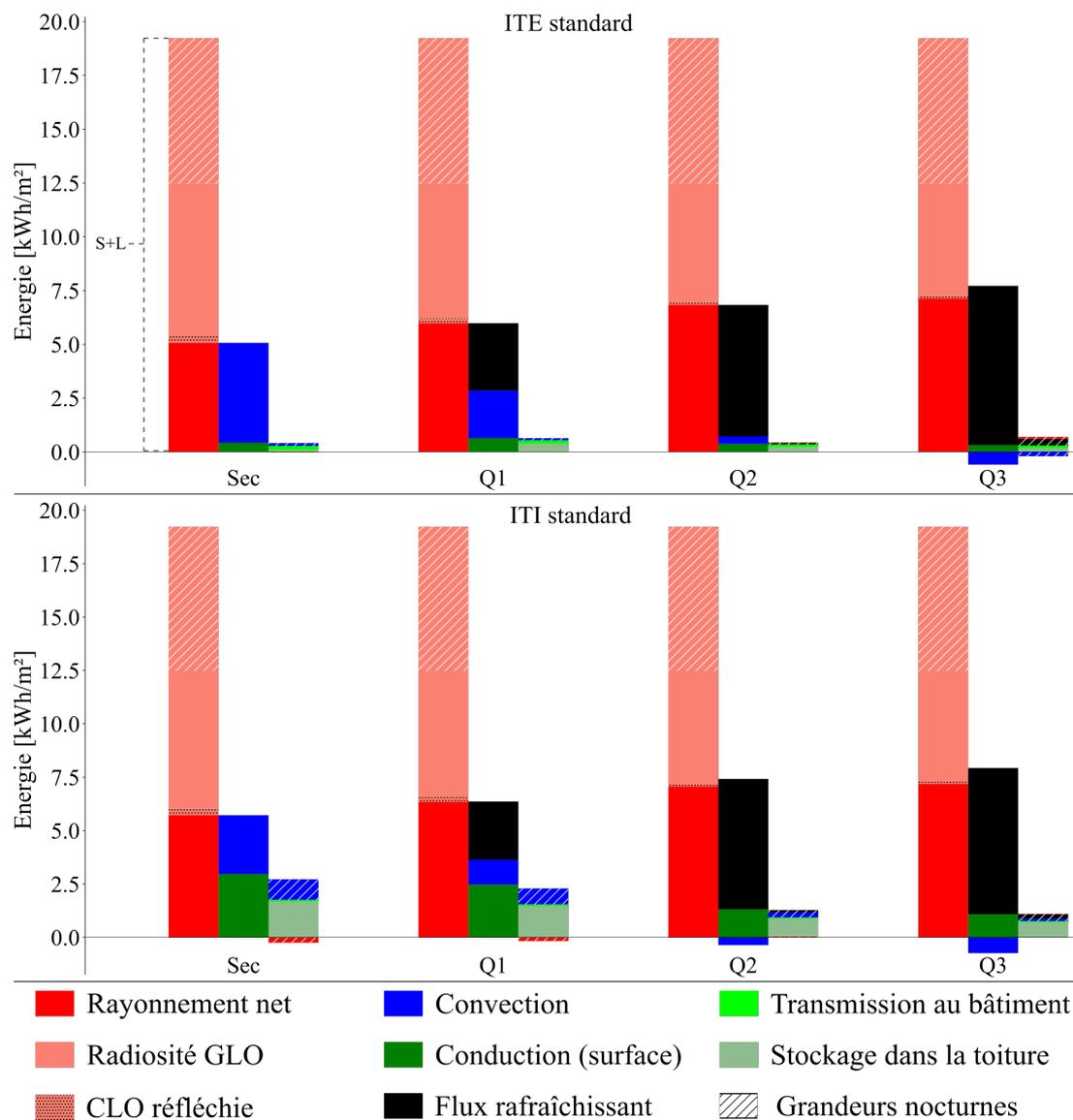


FIGURE 7.8 – Bilan énergétique pour les deux toitures standards en fonction du débit d'arrosage.

cette dernière est arrosée.

Entre l'expérience sans arrosage et celle avec le débit Q_1 , la quantité de chaleur absorbée par la surface diminue de $0,5 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ (17 %) pour l'échantillon ITI standard et de $0,27 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ (15 %) pour celui réfléchissant alors que les échanges convectifs diminuent eux respectivement de $1,59 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ (58 %) et $1,53 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$

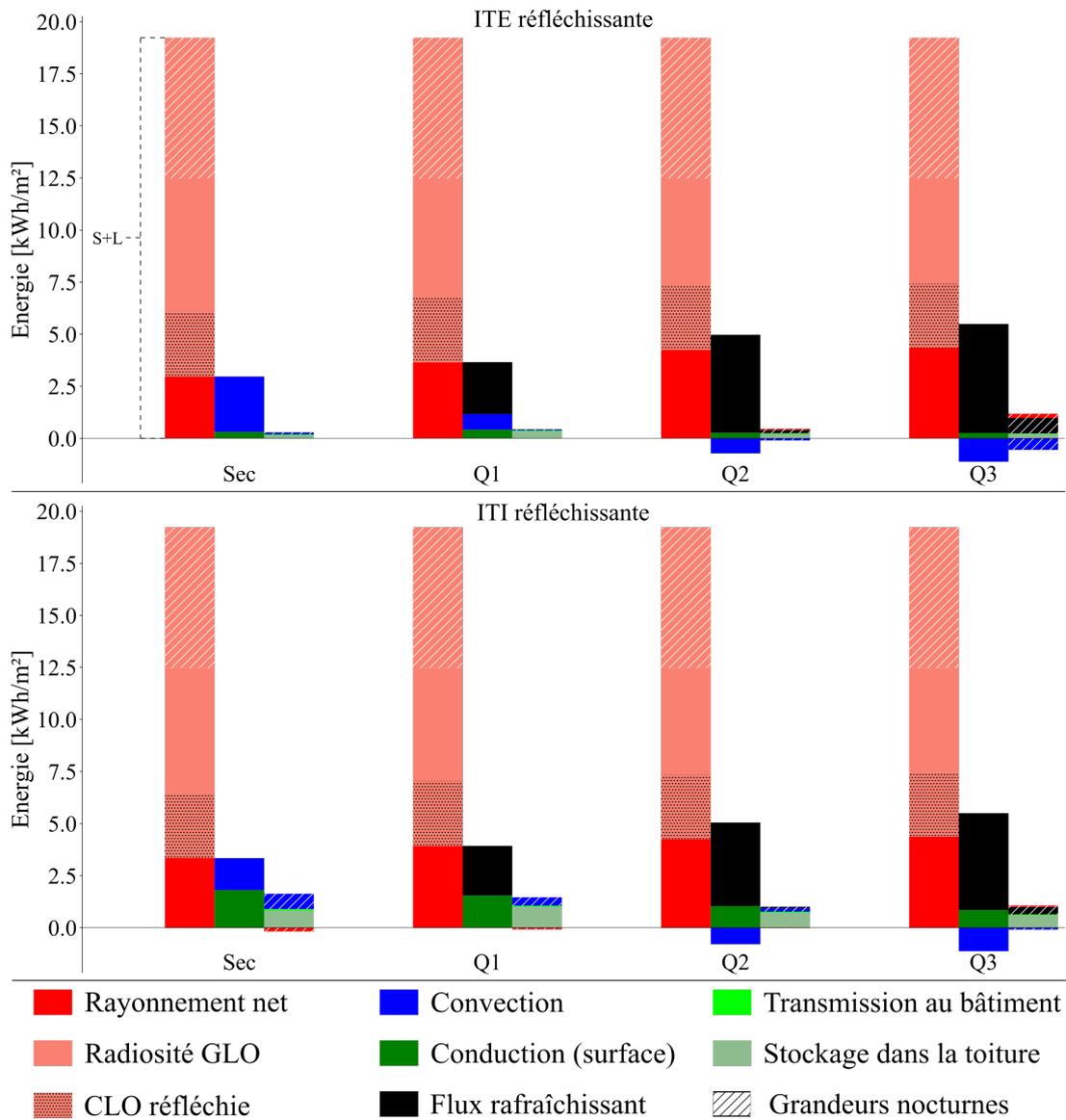


FIGURE 7.9 – Bilan énergétique pour les deux toitures réfléchissantes en fonction du débit d'arrosage.

(100 %). Quand le débit Q_2 est imposé, les échanges convectifs sont toujours plus affectés par l'arrosage que la quantité de chaleur absorbée par la toiture mais dans des proportions moins importantes. Par exemple, pour la toiture ITI standard les échanges convectifs diminuent de $1,52 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ et la quantité de chaleur absorbée est abaissée de $1,16 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$. Enfin, pour les deux échantillons isolés par l'intérieur, l'augmentation

du débit de $0,84 \text{ mm.h}^{-1}$ à $1,26 \text{ mm.h}^{-1}$ n'entraîne qu'une faible diminution supplémentaire des échanges convectifs et de la quantité de chaleur absorbée.

Pour les deux échantillons isolés par l'extérieur, les observations précédentes concernant l'évolution des échanges convectifs en fonction du débit sont similaires. En revanche, on constate que la quantité d'énergie absorbée par ces structures n'est presque pas impactée par l'arrosage contrairement aux structures **ITI**. On observe même qu'entre l'expérience sans arrosage et celle avec le débit Q_1 la quantité totale d'énergie absorbée pendant la journée par la toiture augmente légèrement. Cette dernière constatation est probablement due à la méthode employée pour estimer les termes du bilan thermique. A priori, elle ne représente pas une réalité physique puisque l'écart entre la température de surface et celle mesurée à 2 cm de profondeur est plus important dans le cas de l'expérience sans arrosage.

La nuit, le bilan énergétique des structures **ITE** n'est presque pas impacté par l'arrosage. On constate seulement que, l'évaporation de l'eau qui perdure après l'extinction du simulateur solaire, permet de rafraîchir l'air proche de la surface notamment lorsque le débit est important. Pour les structures **ITI**, plus le débit imposé pendant la phase diurne est important, plus la quantité de chaleur restituée au milieu ambiant la nuit est faible. Ainsi, plus le débit est important, plus les échanges convectifs nocturnes sont faibles. On note aussi que la quantité de chaleur qui reste stockée dans la couche de béton au bout de 24 h d'expérience est d'autant plus faible que le débit est important. Notamment, pour l'échantillon standard, la quantité de chaleur qui reste stockée dans le béton diminue de 60 % entre l'expérience sans arrosage et celle avec le débit Q_3 . Cette diminution est de 28 % pour l'échantillon réfléchissant.

Enfin, l'arrosage permet aussi de réduire la quantité de chaleur qui pénètre dans le bâtiment. Lorsque le débit Q_3 est imposé, elle est réduite de 30 % pour les deux structures standards. Pour les structures réfléchissantes elle est abaissée de 60 % pour la toiture isolée par l'extérieur et de 43 % pour celle isolée par l'intérieur.

Peu importe l'échantillon de toiture étudié, il semblerait que les effets de l'arrosage sur les différentes grandeurs du bilan thermique sont importants jusqu'à un certain débit mais que dépassé ce débit les effets supplémentaires sont faibles. Effectivement,

on observe que l'arrosage impacte fortement le comportement thermique des structures jusqu'au débit Q_2 mais que les différences de comportement thermique constatées entre l'expérience avec le débit Q_2 et celle avec le débit Q_3 sont faibles. Il semblerait donc qu'il existe un débit optimal qui permet de maximiser les effets de l'arrosage tout en minimisant la consommation d'eau. La section suivante cherche à l'estimer plus précisément.

7.1.5 Débit optimal

La Figure 7.10 présente une estimation du débit optimal pour les quatre échantillons de toiture lorsque la méthode employée dans la section 6.1.4 du chapitre précédent est appliquée.

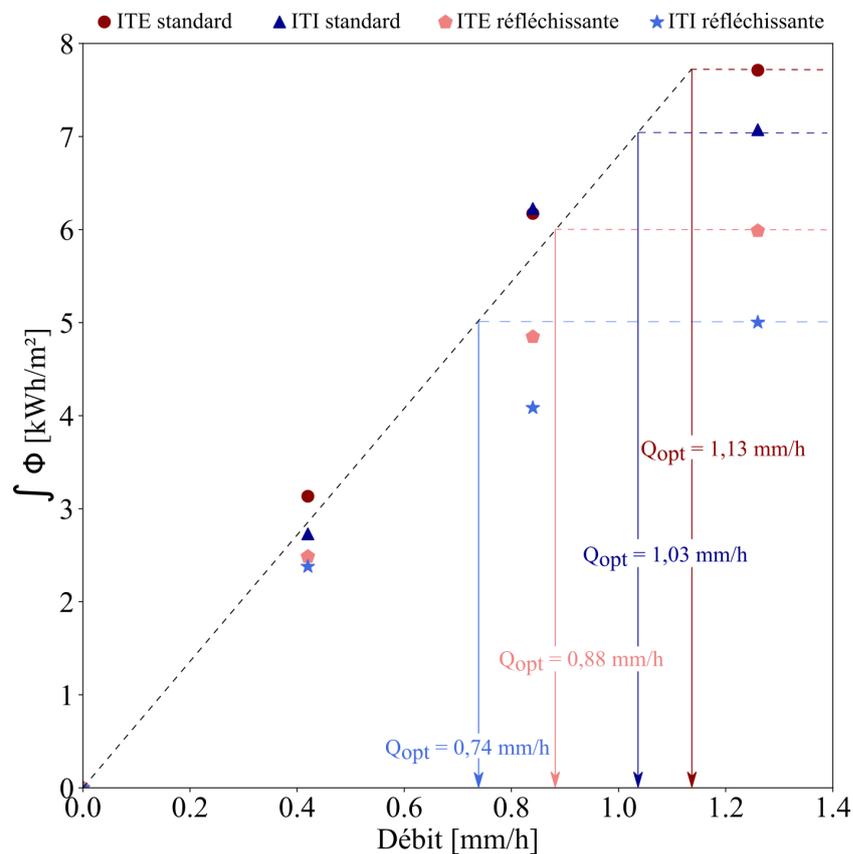


FIGURE 7.10 – Estimation du débit optimal pour les quatre échantillons de toiture.

Le débit optimal est donc plus élevé pour les échantillons standards que pour les

échantillons réfléchissants, et, à réflectivité solaire constante, il est plus élevé pour les échantillons isolés par l'extérieur que pour ceux isolés par l'intérieur. On constate que plus la température de surface est importante lors de l'expérience sans arrosage et plus le débit optimal est élevé. Effectivement, pour des conditions climatiques identiques, plus la surface est chaude et plus l'eau s'évapore rapidement, le débit optimal est donc plus élevé.

Pour les deux échantillons réfléchissants, les points associés à l'expérience avec le débit intermédiaire ne semblent correspondre à aucun des deux régimes. Cette anomalie est due au fait que pour ces débits, la surface est recouverte d'un film d'eau pendant les premières heures de la journée alors qu'à partir de midi environ la surface a le temps de sécher entre deux aspersion. Les oscillations des températures de surface confirment cette analyse : elles sont presque nulles au début de l'expérience puis augmentent à partir de midi environ.

7.2 Conclusion

Ce chapitre s'est donc focalisé sur le comportement thermoclimatique des quatre structures de toiture lorsque leur surface extérieure est arrosée à différents débits.

Tout d'abord, l'arrosage permet pour l'ensemble des structures étudiées de réduire considérablement les échanges convectifs pendant la phase diurne. Si le débit est suffisamment important, aucune des quatre toitures n'échauffe l'air ambiant en journée. Au-delà d'un certain débit les échanges convectifs deviennent même négatifs, c'est-à-dire que la toiture rafraîchit l'air ambiant.

Cette étude montre aussi que la quantité de chaleur absorbée par la surface des structures **ITI** en journée est réduite de façon conséquente réduisant d'autant la quantité de chaleur restituée la nuit par les échantillons **ITI**. Leur contribution à l'**ICU** nocturne est donc réduite. Toujours pour ce type de toiture, l'arrosage permet aussi de réduire la quantité de chaleur qui reste stockée dans la couche structurelle. Le stockage de chaleur des structures **ITE**, déjà très faible sans arrosage, n'est pas significativement modifié.

On constate que le rayonnement net est d'autant plus grand que le débit est impor-

128 Chapitre 7 : Comportement thermoclimatique de différentes toitures arrosées

tant. L'arrosage abaisse l'albédo des membranes d'étanchéité ainsi que le rayonnement thermique émis. On note que le bilan radiatif des membranes d'étanchéité sombres est davantage dégradé comparé à celui des membranes réfléchissantes. Finalement, pour les quatre structures, une partie du flux rafraîchissant dû à l'évaporation de l'eau est consacrée à compenser la détérioration du bilan radiatif des surfaces.

Ce dernier chapitre montre aussi que, pour chacune des structures, il existe un débit optimal différent qui permet de maximiser les effets de l'arrosage tout en minimisant la consommation d'eau. Il semblerait que, pour des conditions climatiques données, ce débit optimal dépende essentiellement de la température de la surface lorsqu'elle n'est pas arrosée. Plus la température de surface est élevée lorsque la surface n'est pas arrosée, plus le débit optimal est important lorsque la surface l'est. Or, l'échauffement de la surface dépend majoritairement de ses propriétés optiques et, comme le montrent ces travaux, de la résistance thermique de la couche qui se situe juste en dessous de la surface.

Du point de vue du bâtiment, peu importe la structure, l'arrosage permet de réduire de façon significative la quantité de chaleur qui pénètre dans le bâtiment. Finalement, lorsque l'arrosage est activé et suffisant, la configuration qui minimise la quantité de chaleur qui pénètre dans le bâtiment est la structure **ITE** réfléchissante ($<0,02 \text{ kWh.m}^{-2}$ lorsque le débit Q_3 est appliqué). On notera cependant qu'en valeur absolue c'est pour la configuration **ITE** standard que l'arrosage permet de faire le plus de gains énergétiques. Effectivement, lorsque le débit Q_3 est appliqué, la quantité de chaleur pénétrant dans le bâtiment est réduite de $0,06 \text{ kWh.m}^{-2}$, donc davantage que ce qui pénètre dans le bâtiment dans le cas de la structure **ITE** réfléchissante sans arrosage.

Chapitre 8

Conclusions et perspectives

Un dispositif expérimental de laboratoire a été mis au point pour comparer le comportement thermoclimatique d'échantillons de toitures soumis à des conditions caniculaires. Pour cela, un pilotage de la température et de l'humidité de l'air est assuré par une enceinte et un ensoleillement artificiel d'intensité variable. L'instrumentation en surface et en profondeur des différents échantillons de toiture ainsi que la méthodologie proposée permettent de quantifier à la fois l'impact de ces structures sur le bâtiment sous-jacent et sur le climat local. Cette étude s'est focalisée sur l'impact de trois paramètres, à savoir, la position de l'isolant dans la structure, la réflectivité solaire de la toiture et l'arrosage de la couche superficielle.

Les résultats montrent clairement que la position de l'isolant dans la structure joue un rôle important dans la contribution des toitures à l'échauffement urbain en période caniculaire. En journée, la structure de faible albédo isolée par l'extérieur échauffe davantage l'air à proximité de la surface par l'intermédiaire des échanges convectifs en comparaison à la structure isolée par l'intérieur. En revanche, comme la structure **ITI** restitue la chaleur emmagasinée en journée, elle contribue également à échauffer l'air la nuit. Cette structure participe donc à l'**ICU** nocturne.

Du point de vue du climat local, la structure isolée par l'extérieur est donc recommandée puisque, contrairement à celle isolée par l'intérieur, elle n'échauffe pas l'air ambiant pendant la nuit. Sa contribution à l'échauffement urbain pendant la nuit est

donc moindre, ce qui semble préférable d'un point de vue sanitaire. L'isolation par l'extérieur est donc à privilégier pour les nouvelles constructions, ou quand cela est possible, lors des travaux de rénovation.

Pour le bâtiment sous-jacent, du fait de l'isolation, la quantité de chaleur qui pénètre dans le bâtiment est faible dans les deux cas. Bien que la différence soit minime, les résultats indiquent que, au bout d'une journée caniculaire, la quantité de chaleur qui pénètre dans le bâtiment est plus importante lorsque la structure est isolée par l'extérieur. Mais, comme notre expérience ne dure que 24 h, ce résultat est susceptible d'évoluer et la tendance observée pourrait s'inverser si l'expérience était répétée sur plusieurs jours. Effectivement, l'accumulation de chaleur jour après jour dans la couche de béton impacterait fortement la dynamique du flux de chaleur qui traverse la toiture. Aussi, seul un échantillon de toiture est étudié et non un bâtiment entier. L'impact de l'isolation sur les ponts thermiques n'est donc pas pris en compte. Pourtant, l'isolation par l'extérieur permet de les réduire considérablement contrairement à l'isolation par l'intérieur. Enfin, pour les climats tempérés comme celui de la France, il est impératif de prendre en compte la saison hivernale. Durant cette saison, l'isolation par l'extérieur procure un meilleur confort thermique en évitant, par exemple, le phénomène de paroi froide. En considérant l'ensemble de ces remarques, l'isolation par l'extérieur semble finalement plus optimale pour maximiser le confort thermique intérieur et minimiser la consommation énergétique annuelle d'un bâtiment.

En ce qui concerne l'augmentation de la réflectivité solaire, elle permet de réduire considérablement l'absorption du rayonnement incident par la surface en journée. En conséquence, les échanges convectifs diurnes sont réduits presque de moitié dans le cas de la toiture **ITE** et d'un tiers pour la toiture **ITI**. Les différences de comportement constatées entre les échantillons standards pendant la phase diurne sont donc lissées grâce à la mise en place du revêtement réfléchissant. La nuit, le bilan thermique de la toiture **ITE** n'est presque pas affecté par le changement d'albédo. Pour la configuration **ITI**, comme la quantité de chaleur absorbée par la surface en journée est fortement réduite, celle restituée pendant la phase nocturne l'est également. Pour cette configuration, la membrane réfléchissante permet donc de réduire sa contribution nocturne à l'**ICU**.

Comme pour les échantillons de faible albédo, la structure réfléchissante isolée

par l'extérieur est préférable puisqu'elle ne contribue pas à échauffer l'air ambiant pendant la nuit. En revanche, pour le bâti déjà existant isolé par l'intérieur, l'augmentation de la réflectivité solaire constitue une bonne solution pour réduire sa contribution à l'échauffement urbain durant la nuit.

L'augmentation de l'albédo n'a pas de conséquence significative sur le flux de chaleur transmis au bâtiment pour la structure **ITI**, mais permet de diviser ce flux par trois environ pour l'échantillon **ITE**. Entre les deux structures réfléchissantes, celle qui minimise le flux de chaleur transmis au bâtiment est la toiture isolée par l'extérieur.

Finalement, parmi les quatre toitures étudiées, la toiture réfléchissante isolée par l'extérieur est à la fois la structure qui participe le moins à l'échauffement urbain en période caniculaire et à la fois celle qui minimise le flux de chaleur qui pénètre dans le bâtiment. Pour les nouvelles constructions, ce type de toiture est donc recommandé à condition de tenir compte des éventuelles réflexions sur le bâti environnant.

Pour des raisons architecturales et économiques il n'est pas toujours possible de choisir ou de modifier la position de l'isolant dans la structure ou de mettre en place un revêtement réfléchissant. Dans ce cas, la technique d'arrosage étudiée dans ces travaux constitue une solution relativement rapide, peu onéreuse et efficace pour rafraîchir ces surfaces. Effectivement, à condition que la toiture soit parfaitement étanche, il suffit d'installer un système d'arrosage (composé de tuyaux et de buses) qui se déclenche automatiquement lorsque la température de surface dépasse une valeur seuil. Ce système d'arrosage peut être relié au réseau d'eau mais lorsque la disponibilité en eau est limitée, il est possible de relier ce système d'arrosage à un récupérateur d'eau de pluie.

Les résultats présentés dans ce manuscrit indiquent que l'arrosage des toitures en journée permet de réduire les échanges convectifs ainsi que la quantité de chaleur absorbée par la surface. Cette technique de rafraîchissement permet donc de réduire la contribution des toitures à l'échauffement urbain d'une part, et d'autre part, la quantité de chaleur qui pénètre dans le bâtiment.

Quand le débit d'arrosage est faible, peu importe la structure, les échanges convectifs diminuent de façon importante. Et, lorsque le débit d'arrosage est suffisant, peu importe l'échantillon de toiture étudié, les échanges convectifs deviennent négatifs en

journée. La toiture rafraîchit donc l'air. Pour les échantillons **ITE**, comme ils ne restituent pas de chaleur pendant la phase nocturne et que cet effet rafraîchissant se poursuit durant les premières heures de la nuit, cette technique permet de refroidir l'air de jour comme de nuit. Pour les structures **ITI**, l'arrosage permet de réduire de façon importante la chaleur emmagasinée en journée : la quantité de chaleur restituée la nuit est donc fortement réduite. Donc, pour ces structures, cette technique permet de refroidir l'air en journée et limite leur contribution à l'**ICU** nocturne. En revanche, lorsque la toiture est mouillée, le rayonnement net augmente puisque les propriétés optiques de la surface sont dégradées, notamment pour les échantillons de faible albédo. Cela implique qu'une partie de la chaleur latente nécessaire au changement d'état de l'eau compense l'augmentation du rayonnement net. Ce n'est qu'après que l'évaporation de l'eau rafraîchira la toiture.

Du point de vue du bâtiment, lorsque le débit est suffisant, l'arrosage permet de réduire d'un tiers le flux de chaleur qui y pénètre pour les deux échantillons standards. Pour les structures réfléchissantes cette réduction est encore plus importante, environ 60% pour la toiture isolée par l'extérieur et 45% pour celle isolée par l'intérieur. Finalement, la toiture réfléchissante **ITE** est celle qui minimise le flux de chaleur qui pénètre dans le bâtiment lorsque sa surface est suffisamment arrosée.

Peu importe la grandeur étudiée, l'arrosage a des effets rafraîchissants importants jusqu'à un certain débit, mais au-delà les effets rafraîchissants supplémentaires sont moindres. Comme l'objectif est de maximiser les effets rafraîchissants tout en minimisant la consommation d'eau, l'estimation du débit optimal est primordiale. Ces travaux montrent que ce débit optimal n'est pas constant d'un échantillon à l'autre et qu'il dépend à la fois de la réflectivité solaire de la surface et de l'agencement des couches au sein de la structure. Effectivement, le débit optimal est moins important pour les structures dont la réflectivité solaire est élevée comparé aux structures de faible albédo et, à réflectivité solaire constante, il est plus élevé pour les échantillons isolés par l'extérieur que pour ceux isolés par l'intérieur. Il ne dépend donc pas uniquement des conditions météorologiques imposées.

Finalement, lors de l'arrosage au débit optimal, la toiture réfléchissante isolée par l'extérieur est la configuration la plus favorable aussi bien du point de vue du climat

local que du bâtiment sous-jacent. D'une part la chaleur qui pénètre dans le bâtiment est très faible (inférieure à $0,02 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$) et, d'autre part, cette structure n'échauffe plus l'air extérieur aussi bien en journée que la nuit. Au contraire, elle contribue à diminuer localement l'intensité de l'ICU. Le cumul sur une même structure des deux techniques de rafraîchissement étudiées dans ce travail semble donc être le moyen le plus efficace pour lutter contre l'échauffement urbain. Cela permet en plus de réduire la consommation d'eau liée à l'arrosage puisque le débit optimal nécessaire pour maximiser les effets rafraîchissants est moins important pour les deux toitures réfléchissantes comparés aux toitures standards.

En définitive, à condition de tenir compte des caractéristiques du bâtiment, de son utilisation et de son environnement climatique, le déploiement sur les toitures des techniques de rafraîchissement étudiées dans ce manuscrit constitue une solution efficace pour réduire à la fois la consommation énergétique des bâtiments et modérer l'intensité de l'îlot de chaleur urbain.

Plusieurs perspectives sont envisagées pour la poursuite de ces travaux. Elles peuvent porter sur le dispositif expérimental, la méthodologie proposée pour quantifier les différentes grandeurs d'intérêt ou encore sur les futures expérimentations.

En ce qui concerne le dispositif expérimental, le simulateur solaire pourrait être amélioré en termes d'homogénéité de son éclairage. Cela permettrait de le mesurer en temps réel pendant chacune des expérimentations et ainsi contrôler l'évolution de son intensité. Aussi, plutôt que de réguler la température de la face inférieure des échantillons (donc côté bâtiment) par contact avec l'échangeur de chaleur, il pourrait être intéressant d'ajouter une lame d'air dont la température serait régulée. Le protocole expérimental pourrait également être amélioré en imposant un premier cycle de 24 h d'initialisation sous conditions climatiques estivales moyennes. Enfin, une des limites du dispositif expérimental développé dans cette étude concerne les échanges radiatifs nocturnes entre la voûte céleste et la toiture : la nuit, le déficit radiatif de nos échantillons de toiture est moins important comparé à la réalité. Pour remédier à cette limite, on pourrait s'inspirer des travaux de Trosseille et al. [98] qui ont développé un dispositif expérimental en laboratoire permettant de produire de l'eau de rosée par refroidissement radiatif. Globalement, l'ensemble de ces modifications du dispositif expérimental et du

protocole permettraient de se rapprocher des conditions réelles et ainsi d'affiner les résultats obtenus.

D'autres perspectives concernent l'instrumentation du dispositif expérimental. Par exemple, la plaque en aluminium située entre la membrane d'étanchéité et le reste de l'échantillon de toiture pourrait être remplacée par un thermofluxmètre (plaque de cuivre) de surface identique à celle des échantillons de toiture. Peu importe que la surface soit arrosée ou pas, cela permettrait de mesurer le flux conductif de surface directement, sans le déduire des autres termes du bilan thermique ou de le calculer à partir de la conductance effective. Aussi, l'installation d'une balance de précision placée en dessous des échantillons pendant les expérimentations rendrait l'estimation du flux évaporatif beaucoup plus simple en mesurant en temps réel le gain ou la perte de masse dû à l'arrosage et à l'évaporation. Ces différentes améliorations du dispositif expérimental permettraient de réduire les incertitudes et de simplifier la méthodologie mise en place dans cette étude pour estimer à chaque instant les différents termes du bilan thermique.

À propos des futures expérimentations, un point qui mérite d'être étudié est leur durée, notamment pour les échantillons isolés par l'intérieur. Réaliser la même étude sur plusieurs jours permettrait de comprendre davantage l'impact de l'accumulation de la chaleur jour après jour dans la couche structurelle de béton sur le comportement thermoclimatique des structures. Aussi, comme ces travaux ont mis en évidence le rôle des différentes couches qui composent la toiture sur l'échauffement local de l'air ambiant, l'étude d'autres structures permettrait d'identifier les paramètres clés qui influencent le plus cet échauffement. Par exemple, il serait intéressant d'étudier d'autres types de toiture plate mais dont la membrane d'étanchéité n'est pas directement en contact avec l'air extérieur comme par exemple les toitures-terrasses recouvertes de dalles en béton ou de gravier. L'étude mériterait aussi d'être étendue aux toitures inclinées puisque leur composition et la nature de leur couche superficielle en contact avec l'atmosphère diffèrent significativement de celles des toitures plates.

Quant aux expérimentations avec arrosage de la couche superficielle, il pourrait être pertinent d'étudier d'autres structures afin de tester une éventuelle corrélation entre le débit optimal et certaines propriétés de la toiture comme, par exemple, sa réflectivité solaire. Par ailleurs, tester l'arrosage nocturne sur certaines structures serait judicieux.

Effectivement, sur les toitures isolées par l'intérieur, cela permettrait de déstocker davantage de chaleur et ainsi éviter qu'elle ne s'accumule tout au long de la vague de chaleur. Enfin, pour une toute autre application, l'arrosage pourrait être utilisé seulement aux heures les plus chaudes de la journée pour éviter que les matériaux de surface n'atteignent des températures trop élevées, en vue d'améliorer la durée de vie de l'étanchéité par exemple.

La suite de ces travaux a aussi pour objectif de réaliser des études similaires sur les autres facettes urbaines et notamment sur les façades. Le déploiement sur ces facettes de techniques de rafraîchissement présente un potentiel intéressant, notamment parce qu'elles jouent un rôle prépondérant dans le phénomène de piégeage radiatif. Leur contribution à l'échauffement urbain est donc important. Néanmoins, certaines techniques de rafraîchissement risquent d'être plus compliquées à déployer. Par exemple, l'arrosage de ces surfaces nécessitera une méthodologie et une instrumentation différentes de celles utilisées pour les toitures puisque l'eau pulvérisée s'écoulera le long de la paroi. Maintenir en permanence un film d'eau pour maximiser l'effet rafraîchissant de l'arrosage risque d'être plus complexe. Et, du fait de cet écoulement, la quantité d'eau requise pour maintenir la paroi mouillée sera bien plus importante. Certains auteurs comme Frere et al. [99] qui s'intéressent à cette problématique ont développé un système permettant de récupérer l'eau en bas de la façade pour la réinjecter en haut. Ce système permet de minimiser la consommation d'eau liée à cette technique de rafraîchissement lorsqu'elle est appliquée aux façades.

Annexe A

Caractérisation du flux radiatif incident

Cette annexe détaille la caractérisation de l'éclairement du simulateur solaire et des correctifs apportés au dispositif expérimental.

A.1 Répartition énergétique du flux radiatif incident

La photo [A.1](#) est une photographie illustrant l'éclairement produit par le simulateur solaire à la surface d'un échantillon.

On observe deux zones bien distinctes : une zone centrale sombre et une zone périphérique plus éclairée. On remarque que cette dernière est marquée par d'autres anneaux sombres et clairs moins contrastés. La couronne claire déborde légèrement au-delà de la surface de l'échantillon. On remarque aussi l'ombre portée par le fil d'alimentation de l'ampoule xénon et une tâche plus sombre dans la zone centrale créée par une irrégularité de l'ampoule. Leur surface représente respectivement 15 % et 85 % de la surface totale.

Pour caractériser précisément la répartition énergétique du flux radiatif incident, quatre expériences d'environ 8 heures ont été effectuées. Sept capteurs radiatifs de

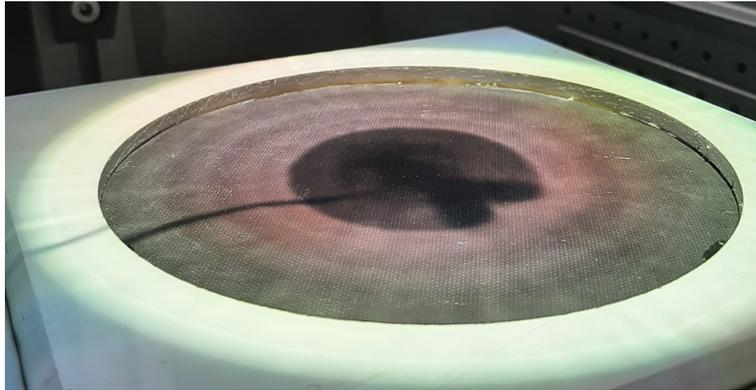


FIGURE A.1 – Photo de la surface supérieure des échantillons éclairée par le simulateur solaire.

1 cm² sont placés le long d'un rayon du disque d'angle θ comme illustré Figure A.2. Au cours d'un essai, l'éclairement varie progressivement de son minimum jusqu'à son maximum de puissance avant de revenir à son minimum. Les 4 expériences sont réalisées à l'intérieur de l'enceinte climatique où la température est maintenue à 25 °C et l'humidité relative à 50 %.

Les résultats présentés Figure A.3 montrent que l'éclairement n'est homogène ni radialement, ni par rotation autour du centre du disque.

Pour les 4 expériences, les minimums d'intensité sont systématiquement dans la zone sombre, contrairement aux maximums d'intensité toujours mesurés dans la couronne périphérique. On remarque aussi que l'intensité croît et décroît plus rapidement pour tous les capteurs placés dans cette zone en comparaison à l'intensité pour les capteurs placés dans la zone centrale. D'autre part, pour une direction donnée, on constate que la différence entre les courbes au sein d'une même zone (zone centrale ou couronne périphérique) est presque constante au cours du temps.

On remarque aussi que, pour l'ensemble des courbes, l'éclairement a un comportement linéaire par morceaux. Il existe trois régimes bien distincts. Le premier est observé pour un rapport cyclique compris entre 0 et 15 %, où l'éclairement est constant. Quand le rapport cyclique augmente de 15 % à 88 %, l'éclairement augmente de façon linéaire (bien que la pente soit légèrement différente entre les capteurs de la zone centrale et ceux de la zone plus éclairée). Enfin lorsque le rapport cyclique atteint 90 %, l'éclairement est constant.

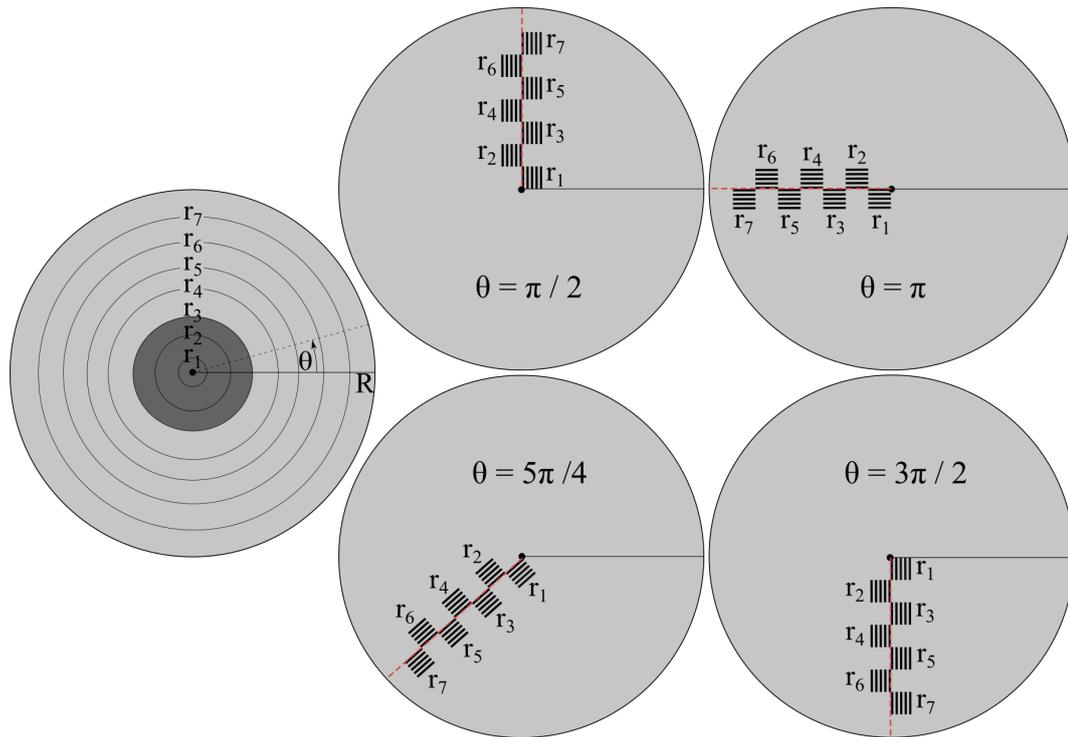


FIGURE A.2 – Emplacement des capteurs radiatifs pour les quatre directions étudiées.

l'éclairement augmente brutalement puis reste constante malgré l'augmentation du rapport cyclique jusqu'à 99 %. Le cycle imposé pendant les expérimentations est piloté au sein du régime linéaire de régulation de la lampe, c'est-à-dire pour un rapport cyclique entre 15 % et 88 %.

Cette hétérogénéité spatiale a plusieurs conséquences. D'une part, la température de surface n'est pas uniforme. Elle peut donc être fortement sous-estimée ou surestimée selon l'emplacement du capteur de surface. La mesure du rayonnement incident est affectée de la même façon. Enfin, comme la température de surface n'est pas uniforme, le flux de chaleur qui pénètre par conduction dans les couches profondes de l'échantillon ne l'est pas non plus. Sa mesure, effectuée à différentes profondeurs par des thermofluxmètres disposés au niveau de l'axe de révolution des échantillons cylindriques, est donc elle aussi dépendante de l'emplacement des capteurs, notamment proche de la surface. On note que cette dernière assertion est d'autant plus vraie que le matériau proche de la surface possède une conductivité thermique faible.

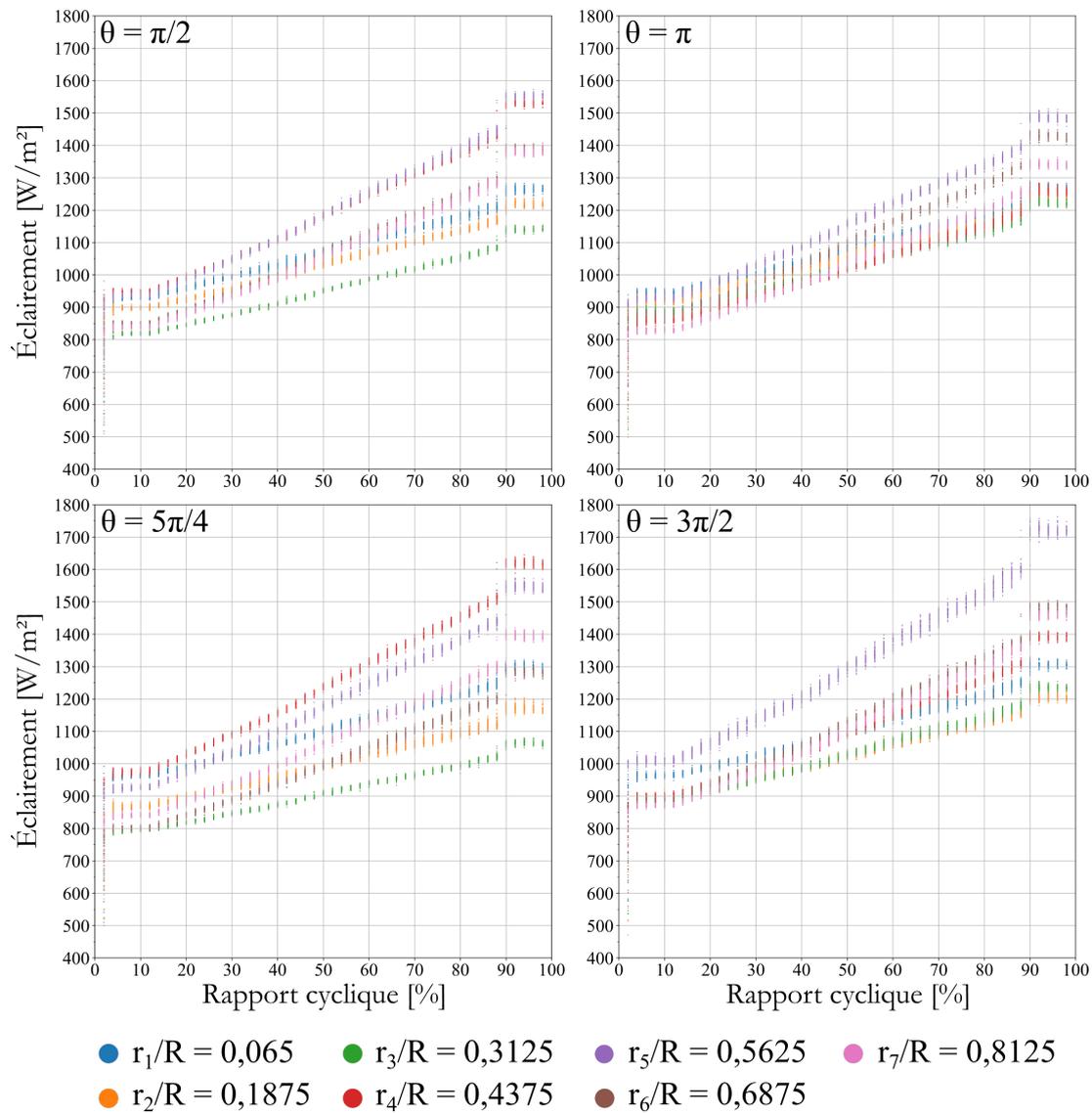


FIGURE A.3 – Variation de l'éclairement en fonction de la distance au centre pour quatre directions.

La section suivante présente la manière dont le dispositif expérimental est adapté pour pallier à ces différents constats.

A.2 Correctifs appliqués

A.2.1 Uniformisation de la température de surface

Pour uniformiser la température de surface, un disque en aluminium de 3 mm d'épaisseur et de surface égale à celle des échantillons de toiture, est inséré entre la couche d'étanchéité et la couche sous-jacente (isolant ou béton selon la configuration). Pour mesurer l'impact de ce disque en aluminium, deux expériences sont réalisées, l'une avant la mise en place du disque et l'autre après. Chacune de ces deux expériences dure deux heures : la première avec le simulateur solaire allumé à pleine puissance puis la seconde simulateur éteint. Une caméra thermique permet de suivre l'évolution de la température de surface en trois points comme illustré sur la Figure A.4. Le point 1 est positionné sur la partie la plus chaude de la surface, le point 2 sur la partie la moins chaude. Cette expérience est réalisée pour les quatre échantillons de toiture étudiés dans ce manuscrit.

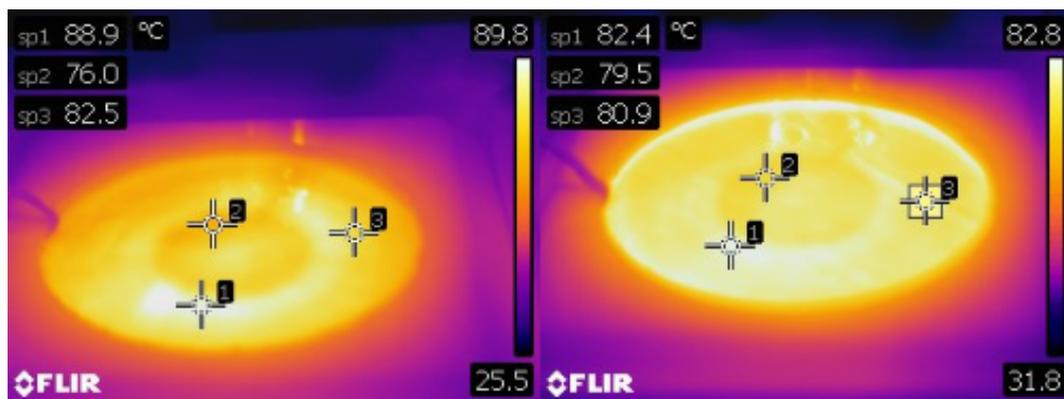


FIGURE A.4 – Photographies infrarouge de la surface supérieure de l'échantillon ITE après une heure de chauffe sans la plaque en aluminium sous la membrane d'étanchéité (gauche) et avec (droite).

Comme la configuration de toiture ITE standard est la structure qui favorise le plus les écarts de température entre la zone centrale sombre et le reste de la surface plus éclairée, les résultats détaillés sont présentés uniquement pour cette structure. Effectivement, le faible albédo de cette structure favorise l'absorption du rayonnement incident ce qui entraîne un échauffement de la surface plus important que dans le cas d'une structure réfléchissante. D'autre part, du fait de l'isolant, la chaleur pénètre difficilement dans

les couches profondes de la toiture entraînant un échauffement de la couche superficielle plus important comparé à une structure isolée par l'intérieur.

La Figure A.5 présente l'évolution de la température de surface aux trois points de mesure, avec et sans la plaque en aluminium dans le cas de l'échantillon de toiture ITE standard. Les résultats montrent que la plaque permet d'homogénéiser la température de surface même si une différence de température persiste entre la zone la plus chaude et la zone la moins chaude de la surface. On constate aussi que l'allure des courbes est différente. Avec la plaque, les températures croissent progressivement et continuent d'augmenter pendant toute la durée de fonctionnement du simulateur solaire alors que sans la plaque, les températures croissent soudainement puis décroissent ensuite légèrement avant de se stabiliser.

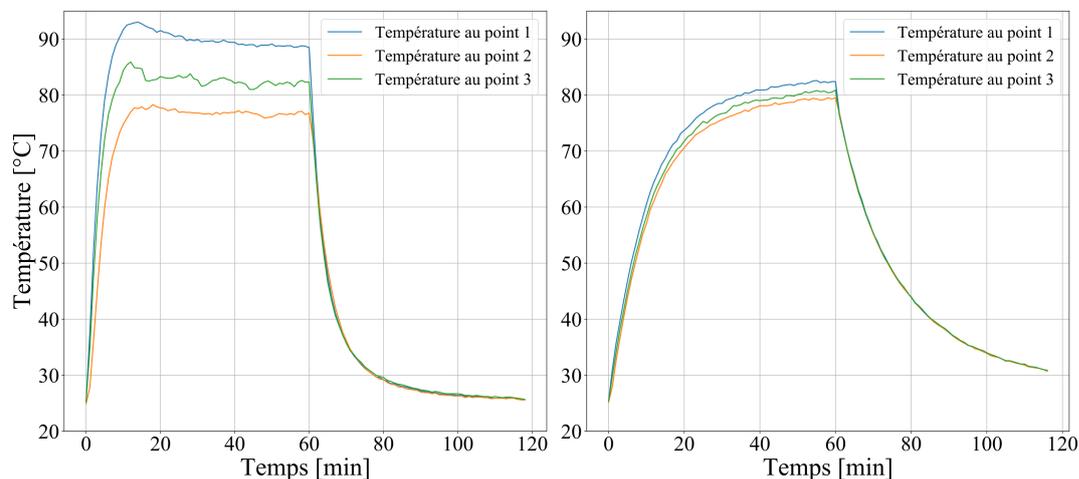


FIGURE A.5 – Évolution de la température de surface en trois points de mesure, sans (gauche) et avec la plaque (droite) pour l'échantillon de toiture ITE standard.

Avant la mise en place du disque en aluminium, l'écart maximal de température entre le point le plus chaud de la surface et le point le moins chaud est d'environ 20 °C au début de l'expérience puis se stabilise autour de 12 °C. Avec le disque, cet écart n'est plus que d'environ 3 °C et reste constant tant que le simulateur solaire fonctionne puis devient nul lorsqu'il s'éteint (Figure A.6). On note que le point le plus froid correspond, avec ou sans la plaque, à l'image de l'irrégularité de l'ampoule.

La Figure A.7 compare la température moyenne de la zone centrale à celle de

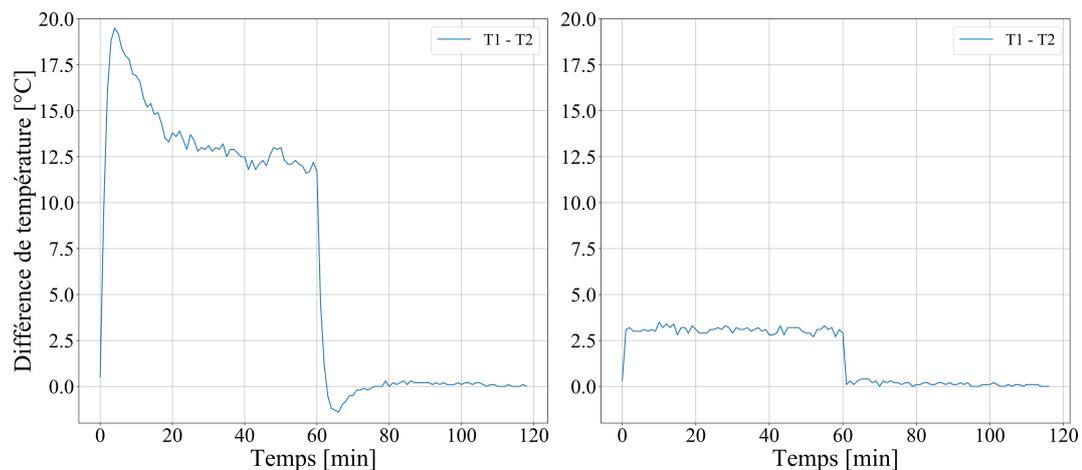


FIGURE A.6 – Évolution de la différence de température de surface entre le point le plus chaud de la surface et le point le moins chaud, sans (à gauche) et avec la plaque (à droite).

la totalité de la surface après 2 h de chauffe avec et sans la plaque en aluminium. On constate que la température moyenne de la zone centrale est presque équivalente à celle de la surface totale qu'il y ait la plaque ou non. Finalement, la plaque permet surtout de lisser les écarts de température entre les points les plus chauds et les points les plus froids et permet d'homogénéiser globalement la température sur l'ensemble de la surface.

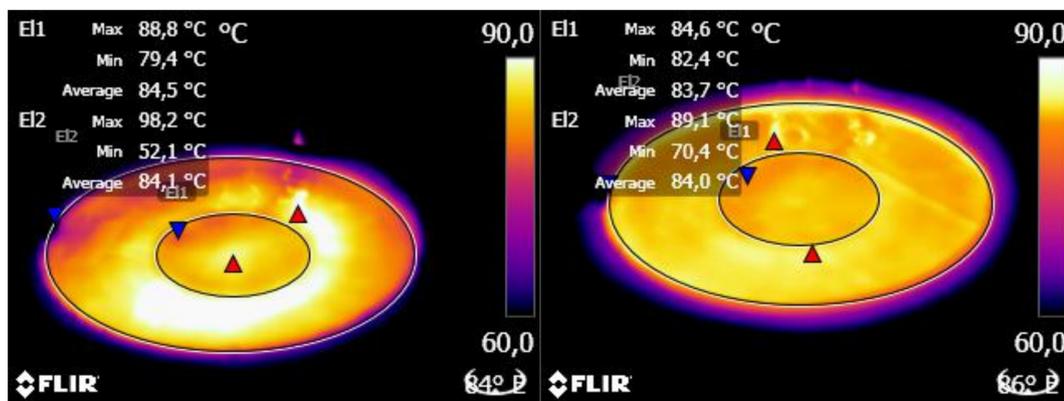


FIGURE A.7 – Température moyenne de la zone centrale (E1) par rapport à la surface totale (E2), sans (à gauche) et avec la plaque (à droite).

Cette étude renseigne donc sur les zones de la surface où le capteur ne doit pas être placé au risque de sur ou sous-estimer la température de manière significative. On

constate qu'avec la plaque, hormis l'endroit qui correspond à l'image de l'irrégularité du verre de la lampe (qui est toujours le point le plus froid), la zone centrale est celle où la température est la plus homogène. Le constat est le même pour l'ensemble des échantillons de toiture. Pour la totalité des expérimentations, la mesure de température de surface sera donc réalisée dans la zone centrale en évitant soigneusement le point froid.

A.2.2 Calcul du rayonnement net

Le rayonnement net de la surface pendant la phase diurne des expérimentations dépend, notamment, du flux radiatif incident. Or, il est mesuré dans la zone centrale sombre de la surface supérieure des échantillons et est donc significativement sous-évalué par rapport au rayonnement incident moyen reçu par la totalité de la surface (voir Figure A.3). Pour se rapprocher de la valeur moyenne, le rayonnement net est finalement calculé à partir d'une mesure du flux radiatif incident réalisée par un capteur radiatif dont la surface est égale à la surface supérieure des échantillons (Figure A.8). Cette mesure est réalisée pendant la phase de caractérisation du dispositif dans des conditions climatiques identiques à celles imposées pendant les expérimentations sur les échantillons de toiture.

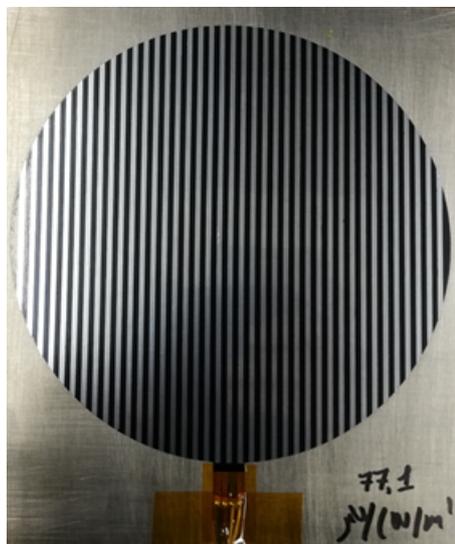


FIGURE A.8 – Capteur radiatif de 16 cm de diamètre utilisé pour mesurer le flux radiatif incident moyen.

Annexe B

La méthode

Le calcul du flux rafraîchissant repose en partie sur l'estimation de la conductance effective de la structure, réalisée à partir de l'expérience sans arrosage. On fait donc l'hypothèse que cette conductance effective, bien que l'on ne soit pas en régime stationnaire, est constante pendant la phase diurne et qu'elle n'est pas affectée par l'arrosage (dans la mesure où il s'agit d'une structure imperméable). On propose donc de vérifier la validité de cette hypothèse. Pour ce faire, certains termes du bilan thermique sont calculés d'une autre manière que celle présentée dans la section méthodologie.

Le rayonnement net et les échanges convectifs sont calculés en suivant la même méthodologie que celle présentée section 3.4.2. En revanche, plutôt que de calculer le flux rafraîchissant à partir du résidu du bilan thermique ($\Phi = R_n - H - V_0$), il est calculé directement à partir de la quantité d'eau évaporée pendant la phase diurne. Pour l'expérience avec le débit le plus faible (Q_1), la totalité de l'eau pulvérisée sur la surface s'évapore pendant la journée. Or, cette quantité est connue. Le flux de chaleur latent moyen peut donc être calculé à partir de la chaleur latente de vaporisation et du taux moyen d'évaporation. Le flux de chaleur sensible absorbé par le film d'eau est pris en compte. Finalement la somme des deux termes permet de calculer le flux rafraîchissant moyen ($\Phi = lE + c_e \rho_e \frac{V_e}{t_0} (T_s^a - T_e)$) pendant la phase diurne. Enfin, le flux conductif est quant à lui déduit du bilan thermique ($V_0 = R_n - H - \Phi$). La Figure B.1 compare le résultat obtenu avec chacune des deux méthodologies pour les quatre échantillons de toiture. On notera que le flux rafraîchissant déduit du bilan thermique a été moyenné sur 5 minutes.

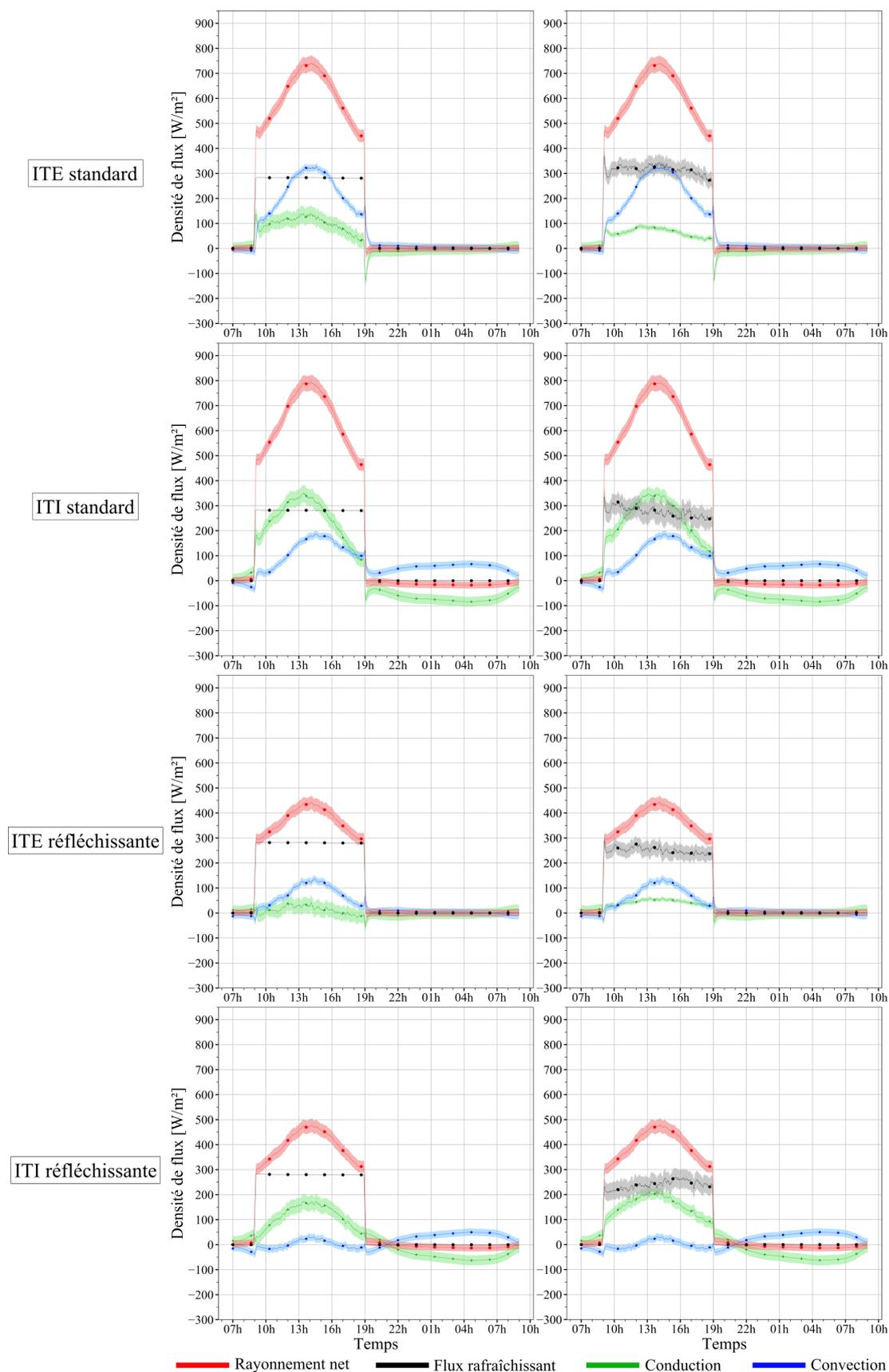


FIGURE B.1 – Comparaison des deux méthodes permettant de calculer les quatre termes du bilan thermique lorsque le débit est faible (Q_1) pour les quatre échantillons de toiture.

Pour les quatre échantillons, les deux méthodologies convergent puisque, dans les deux cas, les flux conductifs et rafraîchissants obtenus sont semblables pendant toute la phase diurne. Notamment, peu importe la méthodologie appliquée, le flux rafraîchissant est constant ou presque sur toute la période de fonctionnement du simulateur solaire. Et, bien que les flux obtenus avec les deux méthodes ne soient pas parfaitement égaux, on constate que l'incertitude associée au flux rafraîchissant de la première méthode englobe celui obtenu avec la seconde.

On note que cette seconde méthode qui permet de calculer le bilan thermique ne peut être utilisée pour les deux autres expériences à débit important puisque l'on ne connaît pas exactement la quantité d'eau évaporée pendant la phase diurne. En effet, pour les deux autres débits (Q_2 et Q_3), comme entre deux aspersion la totalité de l'eau n'a pas le temps de s'évaporer, l'eau s'accumule jusqu'à déborder. Il n'est donc pas possible de calculer un flux évaporatif moyen.

Comme les deux méthodes convergent globalement dans le cas de l'expérience avec le débit le plus faible, on considère que la conductance effective moyenne de chacune des structures est conservée peu importe le débit. Il semble donc raisonnable de l'utiliser pour calculer le flux conductif absorbé par la surface pendant la phase diurne lors des expérimentations avec arrosage.

Annexe C

Mesures complémentaires

Cette annexe présente les mesures expérimentales de température et de flux de chaleur aux profondeurs intermédiaires qui n'ont pas été présentées dans le corps du texte par souci de synthèse.

Globalement, pour les échantillons **ITE**, l'arrosage n'a plus vraiment d'effet sur les températures et les flux de chaleur mesurés en dessous de l'interface isolant/béton. Même quand le débit est important (Q_3), les différences observées avec l'expérience sans arrosage sont minimales. A titre d'exemple, à 16 cm de profondeur, la différence de température entre l'expérience sans arrosage et celle avec le débit Q_3 n'est que de 2 °C au maximum pour l'échantillon standard et de 1,5 °C pour l'échantillon réfléchissant. Toujours à cette profondeur, la différence d'amplitude du flux de chaleur entre les deux expériences (sec vs Q_3) n'est que de 4 W.m⁻² pour l'échantillon standard et est négligeable pour l'échantillon réfléchissant. Pour cette configuration de toiture, le flux mesuré à 26 cm de profondeur est finalement plus impacté par le changement de réflectivité solaire que par l'arrosage.

En ce qui concerne les échantillons **ITI**, l'arrosage a un effet important sur toute la couche de béton mais devient négligeable à partir de l'interface béton/isolant. Au sein de la couche de béton, plus le débit est important plus les signaux mesurés sont faibles et plats. Il semblerait que l'arrosage n'a aucun effet sur le flux de chaleur mesuré à 26 cm de profondeur au sein de l'isolant.

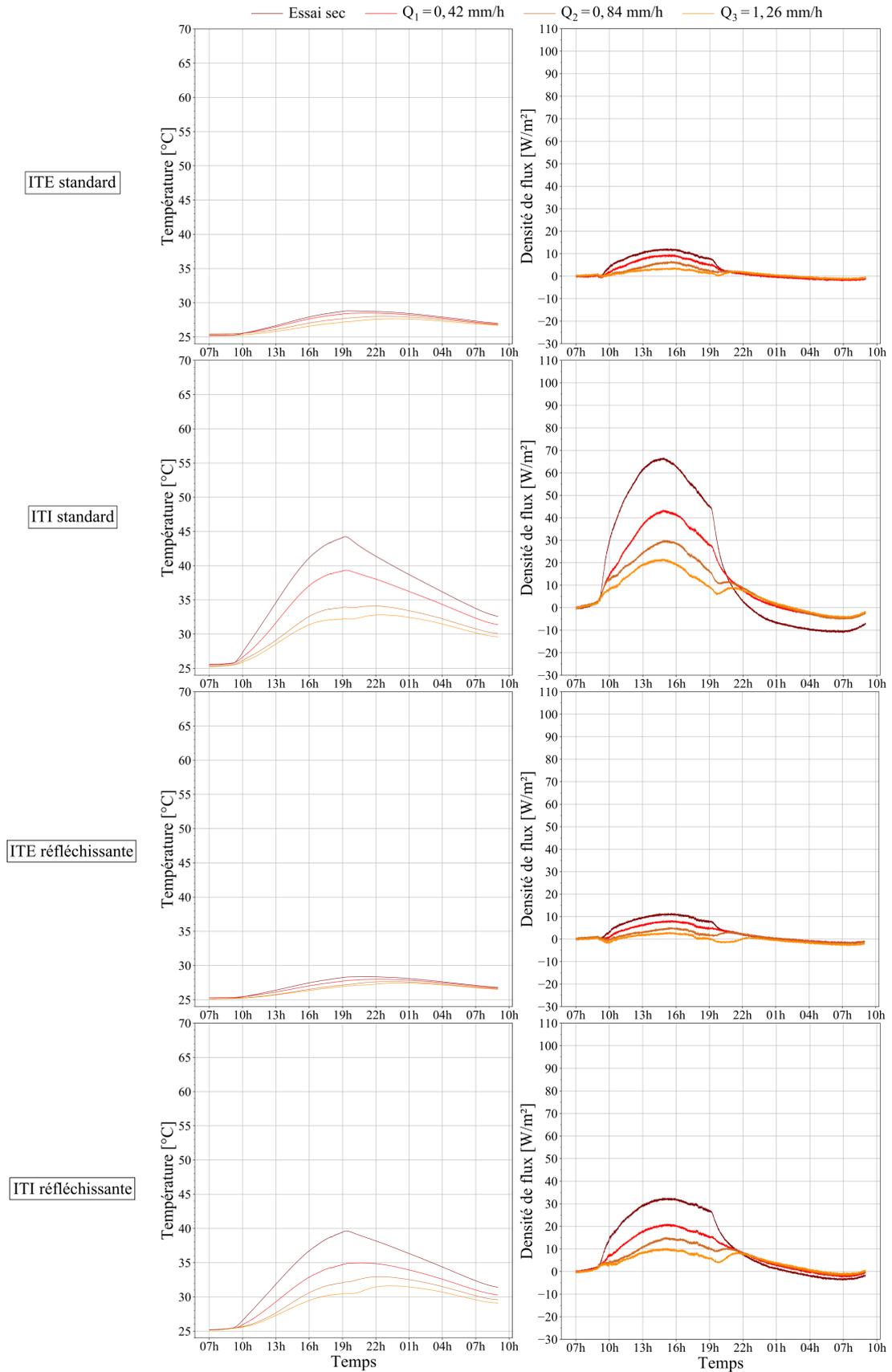


FIGURE C.1 – Température (à gauche) et densité de flux de chaleur (à droite) à 8 cm de profondeur en fonction du débit d'arrosage pour les quatre configurations de toiture.

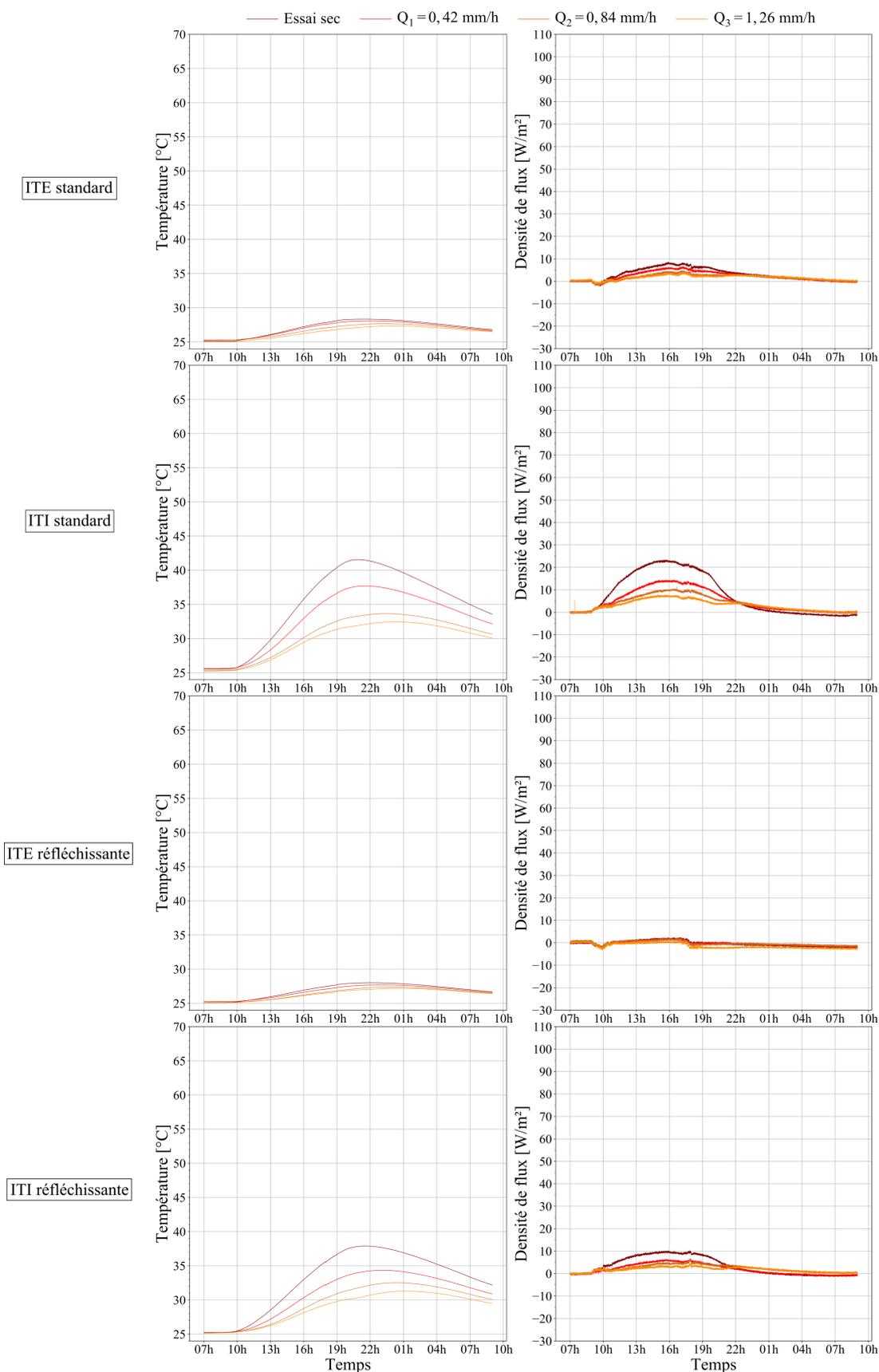


FIGURE C.2 – Température (à gauche) et densité de flux de chaleur (à droite) à 12 cm (ITI) et à 16 cm (ITE) de profondeur en fonction du débit d'arrosage pour les quatre configurations de toiture.

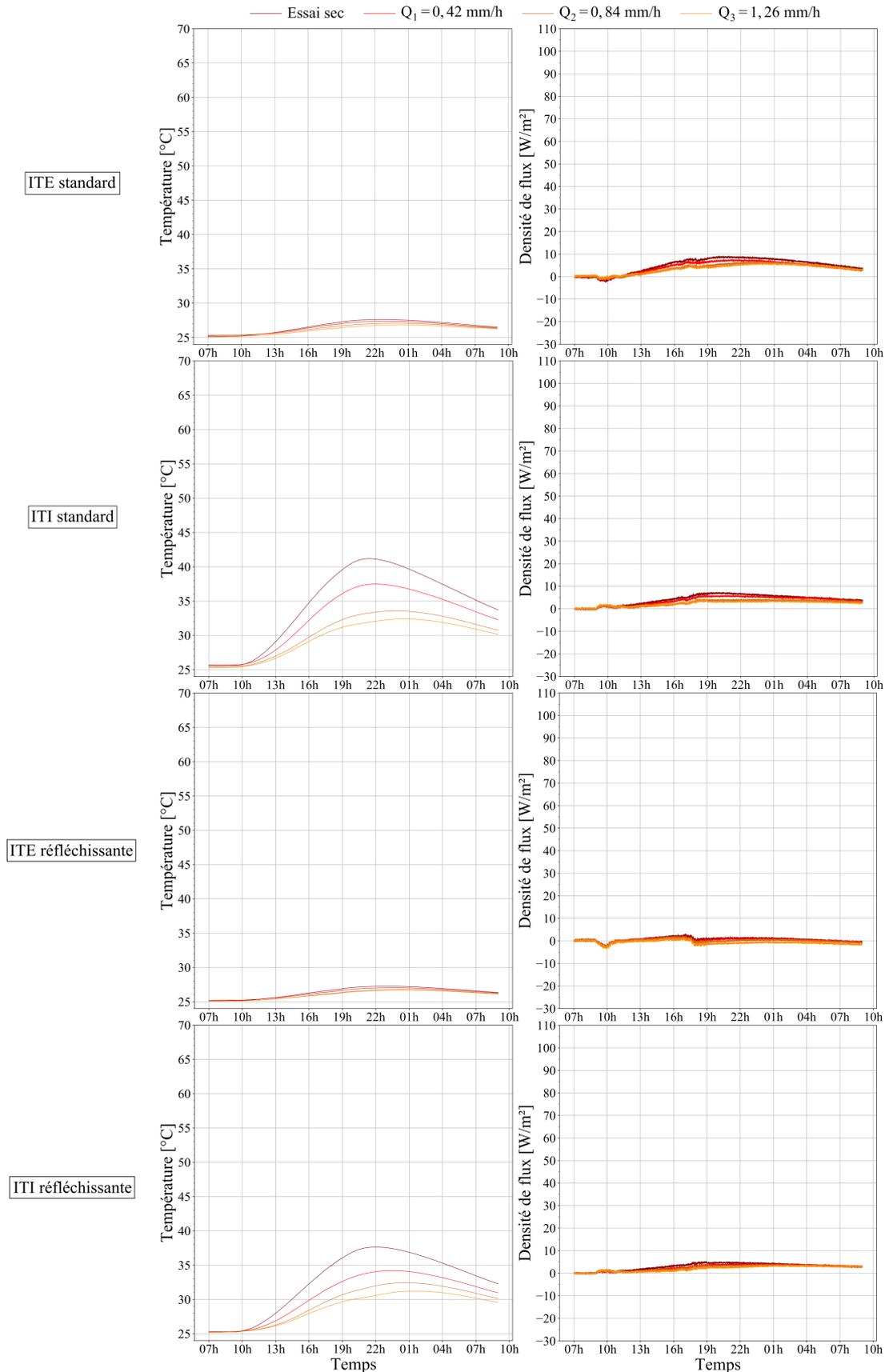


FIGURE C.3 – Température (à gauche) et densité de flux de chaleur (à droite) à 20 cm de profondeur en fonction du débit d’arrosage pour les quatre configurations de toiture.

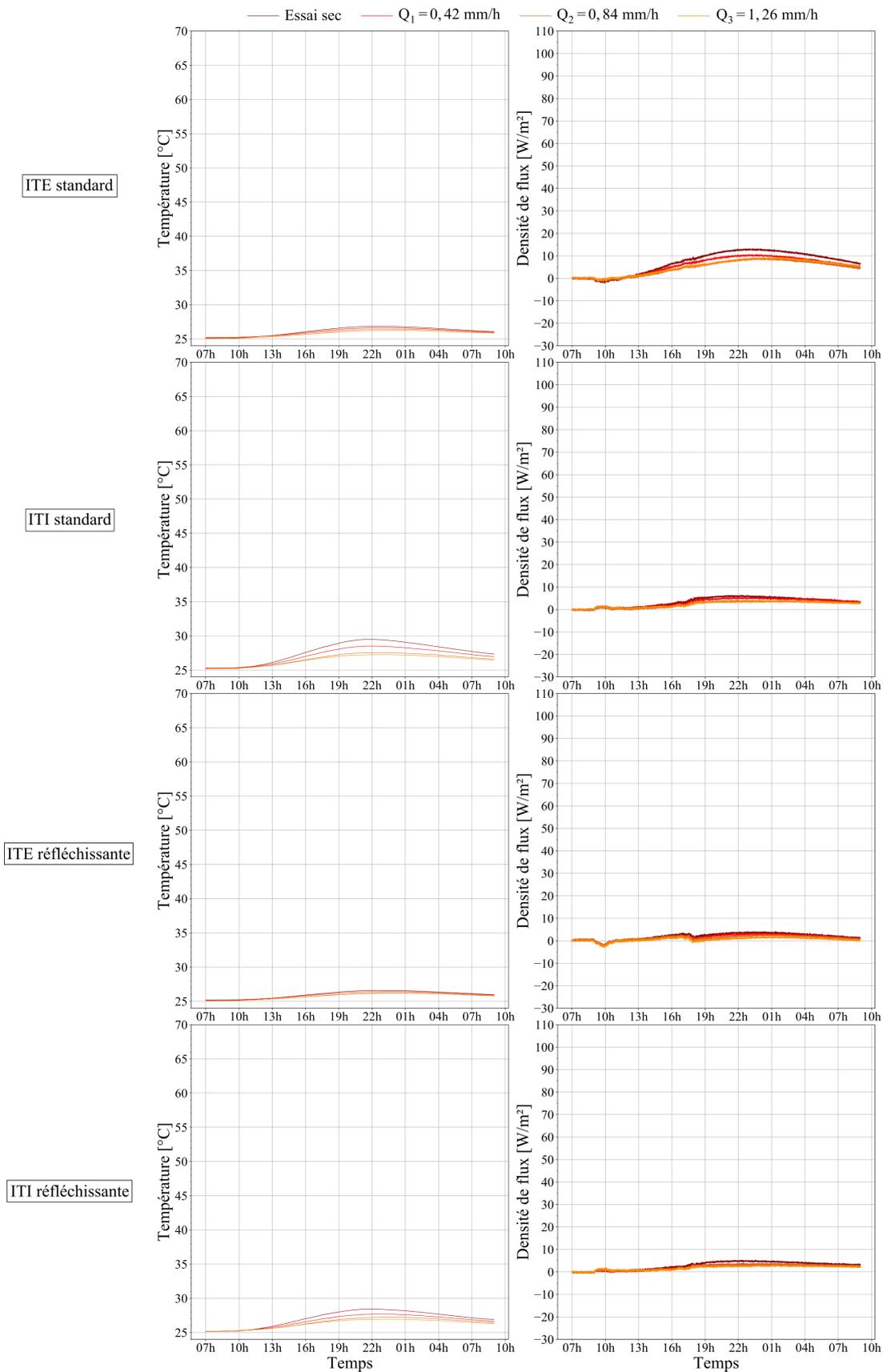


FIGURE C.4 – Température (à gauche) et densité de flux de chaleur (à droite) à 26 cm de profondeur en fonction du débit d'arrosage pour les quatre configurations de toiture.

Bibliographie

- [1] Michel Beaurepaire. « L'observation thermique de l'atmosphère en France et dans les pays proches aux dix-septième et dix-huitième siècles : L'invention du thermomètre. Le traitement des données anciennes. » Thèse de doct. Université Paris-Sorbonne-Paris IV, 1994.
- [2] Daniel Rousseau. « Les moyennes mensuelles de températures à Paris de 1658 à 1675-D'Ismaël Boulliau à Louis Morin ». In : *La météorologie* 2013.81 (2013), p. 11-22.
- [3] Luke Howard. *The climate of London : deduced from meteorological observations made in the metropolis and at various places around it*. T. 3. Harvey, Darton, J. et A. Arch, Longman, Hatchard, S. Highley [and] R. Hunter, 1833.
- [4] Olivier Cantat. « L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps ». In : *Norois. Environnement, aménagement, société* 191 (2004), p. 75-102.
- [5] Xiaoma Li et al. « Urban heat island impacts on building energy consumption : A review of approaches and findings ». In : *Energy* 174 (2019), p. 407-419.
- [6] Maria Kolokotroni et al. « London's urban heat island : Impact on current and future energy consumption in office buildings ». In : *Energy and buildings* 47 (2012), p. 302-311.
- [7] Ministère de la Transition énergétique. *Exigences réglementaires pour la construction des bâtiments (RT 2012)*. 2021. URL : <https://www.ecologie.gouv.fr/exigences-reglementaires-construction-des-batiments-rt-2012>.
- [8] Ministère de la Transition énergétique. *Loi énergie-climat*. 2020. URL : <https://www.ecologie.gouv.fr/loi-energie-climat>.

- [9] Ministère de la Transition énergétique. *Énergie dans les bâtiments*. 2021. URL : <https://www.ecologie.gouv.fr/construction-et-performance-environnementale-du-batiment>.
- [10] Santé publique France. *Influence de caractéristiques urbaines sur la relation entre température et mortalité en Île-de-France*. 2020. URL : <https://www.santepubliquefrance.fr/view/content/286723/full/1/343680..>
- [11] Denis Hemon et Eric Jouglu. « Estimation de la surmortalité et principales caractéristiques épidémiologiques ». In : *Paris : ISERM 25.2003* (2003), p. 1-57.
- [12] Institut national de la santé et de la recherche médicale. *La chaleur record de l'été 2022 a fait plus de 61 000 morts en Europe dont près de 5000 en France*. 2023. URL : <https://presse.inserm.fr/la-chaleur-record-de-lete-2022-a-fait-plus-de-61-000-morts-en-europe-dont-pres-de-5000-en-france/67249/..>
- [13] Météo France. *Vagues de chaleur et changement climatique*. 2023. URL : <https://meteofrance.com/changement-climatique/observer/changement-climatique-et-vagues-de-chaleur>.
- [14] L'Atelier parisien d'urbanisme. *Les Toits de Paris*. 2022. URL : <https://www.apur.org/fr/nos-travaux/toits-paris>.
- [15] Petros Choidis et al. « Thermal analysis of flat roof systems with regards to their thermal insulation and exterior surface emissivity coefficient ». In : *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*. T. 410. 1. IOP Publishing. 2020, p. 012103.
- [16] Meral Ozel. « Effect of insulation location on dynamic heat-transfer characteristics of building external walls and optimization of insulation thickness ». In : *Energy and Buildings* 72 (2014), p. 288-295.
- [17] Elisabeth Kossecka et Jan Kosny. « Influence of insulation configuration on heating and cooling loads in a continuously used building ». In : *Energy and buildings* 34.4 (2002), p. 321-331.
- [18] Emad Al-Regib et Syed M Zubair. « Transient heat transfer through insulated walls ». In : *Energy* 20.7 (1995), p. 687-694.

- [19] SA Al-Sanea et MF Zedan. « Effect of insulation location on thermal performance of building walls under steady periodic conditions ». In : *International journal of ambient energy* 22.2 (2001), p. 59-72.
- [20] M Ozel et K Pihtili. « Optimum location and distribution of insulation layers on building walls with various orientations ». In : *building and environment* 42.8 (2007), p. 3051-3059.
- [21] H Asan. « Investigation of wall's optimum insulation position from maximum time lag and minimum decrement factor point of view ». In : *energy and buildings* 32.2 (2000), p. 197-203.
- [22] Ali Bolattürk. « Optimum insulation thicknesses for building walls with respect to cooling and heating degree-hours in the warmest zone of Turkey ». In : *Building and environment* 43.6 (2008), p. 1055-1064.
- [23] Ö Altan Dombaycı, Mustafa Gölcü et Yaşar Pancar. « Optimization of insulation thickness for external walls using different energy-sources ». In : *Applied Energy* 83.9 (2006), p. 921-928.
- [24] Agis M Papadopoulos. « State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments ». In : *Energy and buildings* 37.1 (2005), p. 77-86.
- [25] Basim Abu-Jdayil et al. « Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials : An overview ». In : *Construction and Building Materials* 214 (2019), p. 709-735.
- [26] Mohammad S Al-Homoud. « Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials ». In : *Building and environment* 40.3 (2005), p. 353-366.
- [27] Samuel Schiavoni, F Bianchi, F Asdrubali et al. « Insulation materials for the building sector : A review and comparative analysis ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 62 (2016), p. 988-1011.
- [28] Zoltán Pásztor et al. « An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials ». In : *Journal of Building Engineering* 44 (2021), p. 102604.
- [29] Hashem Akbari et Ronnen Levinson. *Evolution of cool-roof standards in the US*. Routledge, 2013.

- [30] Anna Laura Pisello et Franco Cotana. « The thermal effect of an innovative cool roof on residential buildings in Italy : Results from two years of continuous monitoring ». In : *Energy and Buildings* 69 (2014), p. 154-164.
- [31] Anna Laura Pisello, Mattheos Santamouris et Franco Cotana. « Active cool roof effect : Impact of cool roofs on cooling system efficiency ». In : *Advances in building energy research* 7.2 (2013), p. 209-221.
- [32] Emmanuel Bozonnet, Maxime Doya et Francis Allard. « Cool roofs impact on building thermal response : A French case study ». In : *Energy and Buildings* 43.11 (2011), p. 3006-3012.
- [33] Kishor T. Zingre et al. « Modeling of cool roof heat transfer in tropical climate ». In : *Renewable Energy* 75 (2015), p. 210-223.
- [34] C Romeo et M Zinzi. « Impact of a cool roof application on the energy and comfort performance in an existing non-residential building. A Sicilian case study ». In : *Energy and Buildings* 67 (2013), p. 647-657.
- [35] Vishal Garg et al. « Assessment of the impact of cool roofs in rural buildings in India ». In : *Energy and Buildings* 114 (2016), p. 156-163.
- [36] Dionysia Kolokotsa et al. « Numerical and experimental analysis of cool roofs application on a laboratory building in Iraklion, Crete, Greece ». In : *Energy and Buildings* 55 (2012), p. 85-93.
- [37] M Kolokotroni, BL Gowreesunker et R Giridharan. « Cool roof technology in London : An experimental and modelling study ». In : *Energy and Buildings* 67 (2013), p. 658-667.
- [38] A Synnefa, M Santamouris et H Akbari. « Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions ». In : *Energy and Buildings* 39.11 (2007), p. 1167-1174.
- [39] Kishor T Zingre et al. « Modelling of cool roof performance for double-skin roofs in tropical climate ». In : *Energy* 82 (2015), p. 813-826.
- [40] Dionysia–Denia Kolokotsa et al. « Cool roofs and cool pavements application in Acharnes, Greece ». In : *Sustainable Cities and Society* 37 (2018), p. 466-474.
- [41] Hashem Akbari, Ronnen Levinson et Leo Rainer. « Monitoring the energy-use effects of cool roofs on California commercial buildings ». In : *Energy and Buildings* 37.10 (2005), p. 1007-1016.

- [42] Tengfang Xu et al. « Quantifying the direct benefits of cool roofs in an urban setting : Reduced cooling energy use and lowered greenhouse gas emissions ». In : *Building and Environment* 48 (2012), p. 1-6.
- [43] Yang He et al. « Thermal and energy performance of green roof and cool roof : A comparison study in Shanghai area ». In : *Journal of Cleaner Production* 267 (2020), p. 122205.
- [44] Vincenzo Costanzo, Gianpiero Evola et Luigi Marletta. « Energy savings in buildings or UHI mitigation ? Comparison between green roofs and cool roofs ». In : *Energy and buildings* 114 (2016), p. 247-255.
- [45] Junjing Yang et al. « Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in tropical climate ». In : *Solar Energy* 173 (2018), p. 597-609.
- [46] Jong-Jin Baik et al. « Cool-roof effects on thermal and wind environments during heat waves : A case modeling study in Seoul, South Korea ». In : *Urban Climate* 41 (2022), p. 101044.
- [47] Hideki Takebayashi et Masakazu Moriyama. « Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island ». In : *Building and environment* 42.8 (2007), p. 2971-2979.
- [48] F Abass et al. « A review of green roof : definition, history, evolution and functions ». In : *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. T. 713. 1. IOP Publishing. 2020, p. 012048.
- [49] Muhammad Shafique, Reeho Kim et Muhammad Rafiq. « Green roof benefits, opportunities and challenges—A review ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 90 (2018), p. 757-773.
- [50] Timothy Carter et C Rhett Jackson. « Vegetated roofs for stormwater management at multiple spatial scales ». In : *Landscape and urban planning* 80.1-2 (2007), p. 84-94.
- [51] Daniel Roehr et Yuewei Kong. « Runoff reduction effects of green roofs in Vancouver, BC, Kelowna, BC, and Shanghai, PR China ». In : *Canadian Water Resources Journal* 35.1 (2010), p. 53-68.
- [52] Jun Yang, Qian Yu et Peng Gong. « Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago ». In : *Atmospheric environment* 42.31 (2008), p. 7266-7273.

- [53] Maureen Connelly et Murray Hodgson. « Experimental investigation of the sound transmission of vegetated roofs ». In : *Applied Acoustics* 74.10 (2013), p. 1136-1143.
- [54] Robert A Francis et Jamie Lorimer. « Urban reconciliation ecology : the potential of living roofs and walls ». In : *Journal of environmental management* 92.6 (2011), p. 1429-1437.
- [55] P Karachaliou, Mat Santamouris et Helli Pangalou. « Experimental and numerical analysis of the energy performance of a large scale intensive green roof system installed on an office building in Athens ». In : *Energy and Buildings* 114 (2016), p. 256-264.
- [56] SeyedehNiloufar Mousavi et al. « A novel smart framework for optimal design of green roofs in buildings conforming with energy conservation and thermal comfort ». In : *Energy and Buildings* 291 (2023), p. 113111.
- [57] Lisandra Fachinello Krebs. « Extensive green roofs in Porto Alegre, Brazil : Effect on indoor thermal comfort in residential buildings ». In : (2018).
- [58] Laura Cirrincione, Antonino Marvuglia et Gianluca Scaccianoce. « Assessing the effectiveness of green roofs in enhancing the energy and indoor comfort resilience of urban buildings to climate change : Methodology proposal and application ». In : *Building and Environment* 205 (2021), p. 108198.
- [59] Saranathan Pragati et al. « Simulation of the Energy Performance of a Building with Green Roofs and Green Walls in a Tropical Climate ». In : *Sustainability* 15.3 (2023), p. 2006.
- [60] Aikaterini Niachou et al. « Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance ». In : *Energy and buildings* 33.7 (2001), p. 719-729.
- [61] Holly Faye Castleton et al. « Green roofs ; building energy savings and the potential for retrofit ». In : *Energy and buildings* 42.10 (2010), p. 1582-1591.
- [62] Issa Jaffal, Salah-Eddine Ouldboukhitine et Rafik Belarbi. « A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance ». In : *Renewable energy* 43 (2012), p. 157-164.
- [63] Aparna Dwivedi et Buddhiraju Krishna Mohan. « Impact of green roof on micro climate to reduce Urban Heat Island ». In : *Remote Sensing Applications : Society and Environment* 10 (2018), p. 56-69.

- [64] Piero Bevilacqua et al. « Surface temperature analysis of an extensive green roof for the mitigation of urban heat island in southern mediterranean climate ». In : *Energy and Buildings* 150 (2017), p. 318-327.
- [65] Steffen Lehmann. « Low carbon districts : Mitigating the urban heat island with green roof infrastructure ». In : *City, Culture and Society* 5.1 (2014), p. 1-8.
- [66] Lilliana LH Peng et Chi Yung Jim. « Green-roof effects on neighborhood micro-climate and human thermal sensation ». In : *Energies* 6.2 (2013), p. 598-618.
- [67] Guglielmina Mutani et Valeria Todeschi. « The effects of green roofs on outdoor thermal comfort, urban heat island mitigation and energy savings ». In : *Atmosphere* 11.2 (2020), p. 123.
- [68] Gabriele Lobaccaro et Juan A Acero. « Comparative analysis of green actions to improve outdoor thermal comfort inside typical urban street canyons ». In : *Urban Climate* 14 (2015), p. 251-267.
- [69] Edward Ng et al. « A study on the cooling effects of greening in a high-density city : An experience from Hong Kong ». In : *Building and environment* 47 (2012), p. 256-271.
- [70] Justyna Czemieli Berndtsson, Lars Bengtsson et Kenji Jinno. « Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs ». In : *Ecological engineering* 35.3 (2009), p. 369-380.
- [71] Justyna Czemieli Berndtsson, Tobias Emilsson et Lars Bengtsson. « The influence of extensive vegetated roofs on runoff water quality ». In : *Science of the Total Environment* 355.1-3 (2006), p. 48-63.
- [72] GN Tiwari, A Kumar et MS Sodha. « A review—cooling by water evaporation over roof ». In : *Energy conversion and Management* 22.2 (1982), p. 143-153.
- [73] Sekhar N Kondepudi. « A simplified analytical method to evaluate the effects of roof spray evaporative cooling ». In : *Energy conversion and management* 34.1 (1993), p. 7-16.
- [74] F. C. Houghten, H. T. Olsen et C. GutbertN. In : *ASHVE Trans.* 46 (1940), p. 231.
- [75] Ayyoob Sharifi et Yoshiki Yamagata. « Roof ponds as passive heating and cooling systems : A systematic review ». In : *Applied energy* 160 (2015), p. 336-357.
- [76] MS Sodha et al. « Periodic theory of an open roof pond ». In : *Applied Energy* 7.4 (1980), p. 305-319.

- [77] Ahmed Hamza H Ali. « Passive cooling of water at night in uninsulated open tank in hot arid areas ». In : *Energy conversion and management* 48.1 (2007), p. 93-100.
- [78] S Raeissi et M Taheri. « Skytherm : an approach to year-round thermal energy sufficient houses ». In : *Renewable Energy* 19.4 (2000), p. 527-543.
- [79] Runsheng Tang et Y Etzion. « Cooling performance of roof ponds with gunny bags floating on water surface as compared with a movable insulation ». In : *Renewable energy* 30.9 (2005), p. 1373-1385.
- [80] Simos Yannas, Evyatar Erell et Jose Luis Molina. *Roof cooling techniques : a design handbook*. Earthscan, 2006.
- [81] Baruch Givoni. « Indoor temperature reduction by passive cooling systems ». In : *Solar Energy* 85.8 (2011), p. 1692-1726.
- [82] Artemisia Spanaki et al. « Assessing the passive cooling effect of the ventilated pond protected with a reflecting layer ». In : *Applied energy* 123 (2014), p. 273-280.
- [83] Ajaya ketan Nayak, Aya Hagishima et Jun Tanimoto. « A simplified numerical model for evaporative cooling by water spray over roof surfaces ». In : *Applied Thermal Engineering* 165 (2020), p. 114514.
- [84] A Carrasco et al. « Evaluation of a direct evaporative roof-spray cooling system ». In : (1987).
- [85] Huijun Mao et al. « Cooling effects of a mist-spraying system on ethylene tetrafluoroethylene cushion roofs in hot-humid areas : A case study in Guangzhou, China ». In : *Sustainable Cities and Society* 74 (2021), p. 103211.
- [86] Martin Hendel et al. « Improving a pavement-watering method on the basis of pavement surface temperature measurements ». In : *Urban Climate* 10 (2014), p. 189-200.
- [87] Sophie Parison et al. « A lab experiment for optimizing the cooling efficiency and the watering rate of pavement-watering ». In : *Urban Climate* 31 (2020), p. 100543.
- [88] Madi Kaboré, Emmanuel Bozonnet et Patrick Salagnac. « Building and urban cooling performance indexes of wetted and green roofs—a case study under current and future climates ». In : *Energies* 13.23 (2020), p. 6192.

- [89] Payam Shafigh, Iman Asadi et Norhayati Binti Mahyuddin. « Concrete as a thermal mass material for building applications-A review ». In : *Journal of Building Engineering* 19 (2018), p. 14-25.
- [90] Prathap Ramamurthy et al. « The joint influence of albedo and insulation on roof performance : An observational study ». In : *Energy and Buildings* 93 (2015), p. 249-258.
- [91] Hamid Montazeri et Bert Blocken. « New generalized expressions for forced convective heat transfer coefficients at building facades and roofs ». In : *Building and Environment* 119 (2017), p. 153-168.
- [92] Aya Hagishima et Jun Tanimoto. « Field measurements for estimating the convective heat transfer coefficient at building surfaces ». In : *Building and environment* 38.7 (2003), p. 873-881.
- [93] Takashi Asaeda, Vu Thanh CA et Akio Wake. « Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere. » In : *Atmospheric environment*. 30.3 (1996), p. 413-427.
- [94] I. Hernández-Pérez et al. « Thermal performance of a concrete cool roof under different climatic conditions of Mexico. » In : *Energy Procedia* 57 (2014), p. 1753-1762.
- [95] Dionysios I Kolaitis et al. « Comparative assessment of internal and external thermal insulation systems for energy efficient retrofitting of residential buildings ». In : *Energy and buildings* 64 (2013), p. 123-131.
- [96] SP Jain et KR Rao. « Experimental study on the effect of roof spray cooling on unconditioned and conditioned buildings ». In : *Building Science* 9.1 (1974), p. 9-16.
- [97] Sophie Parison et al. « Analysis of the heat budget of standard, cool and watered pavements under lab heat-wave conditions ». In : *Energy and Buildings* 228 (2020), p. 110455.
- [98] Joachim Trosseille. « Refroidissement radiatif et texturation de surfaces pour condenseurs de rosée à haut rendement ». Thèse de doct. Sorbonne université, 2019.
- [99] Maxime Frere, Martin Hendel et Laurent Royon. « Couplage de matériaux frais, perméables et arrosage urbain : évaluation d'un démonstrateur d'îlot de fraî-

cheur urbain ». In : *Publications de l'Association Internationale de Climatologie* (2020).