



HAL
open science

Optimisation du réseau poreux de dispositifs de rafraîchissement de l'air en milieu urbain (pavés rafraîchissants)

Youssef Wardeh

► **To cite this version:**

Youssef Wardeh. Optimisation du réseau poreux de dispositifs de rafraîchissement de l'air en milieu urbain (pavés rafraîchissants). Génie civil. INSA de Toulouse; Université libanaise, 2023. Français. NNT : 2023ISAT0038 . tel-04471746

HAL Id: tel-04471746

<https://theses.hal.science/tel-04471746>

Submitted on 21 Feb 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.



THÈSE

En vue de l'obtention du
DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE
Délivré par l'Institut National des Sciences Appliquées de
Toulouse

Cotutelle internationale : Université libanaise

Présentée et soutenue par
Youssef WARDEH

Le 4 juillet 2023

**Optimisation du réseau poreux de dispositifs de rafraîchissement
de l'air en milieu urbain (pavés rafraîchissants)**

Ecole doctorale : **MEGEP - Mécanique, Energétique, Génie civil, Procédés**

Spécialité : **Génie civil**

Unité de recherche :

LMDC - Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions de Toulouse

Thèse dirigée par

Stephane GINESTET et Pierre RAHME

Jury

M. Emmanuel ANTCZAK	Rapporteur	Professeur - Université d'Artois
M. Chadi MAALOUF	Rapporteur	MCF HDR - Université de Reims
Mme Marie DUQUESNE	Examinatrice (Présidente)	Professeure - Université de La Rochelle
M. Youssef DIAB	Examinateur	Professeur - Université Gustave Eiffel
M. Stephane GINESTET	Directeur de thèse	Professeur - INSA Toulouse
M. Pierre RAHME	Directeur de thèse	Professeur - Université Libanaise
M. Gilles ESCADEILLAS	Co-directeur de thèse	Professeur - Université Paul Sabatier
M. Elias KINAB	Co-directeur de thèse	MCF - Université Libanaise
Mme Marion BONHOMME	Invitée	MCF - INSA Toulouse

Remerciements

Cette thèse s'est déroulée en cotutelle entre l'Université Libanaise et l'INSA Toulouse. La partie expérimentale s'est réalisée au sein du LMDC. Je tiens tout d'abord à remercier les personnes qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

Je remercie Monsieur Emmanuel Antczak, Professeur à l'Université d'Artois, et Monsieur Chadi Maalouf, MCF et HDR à l'Université de Reims, de l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être rapporteurs de cette thèse.

Je remercie Madame Marie Duquesne, Professeure à l'Université de La Rochelle, et Monsieur Youssef Diab, Professeur à l'Université Gustave Eiffel, qui ont bien voulu être les examinateurs de ce travail.

J'exprime ma gratitude à mes directeurs de thèse, Monsieur Stéphane Ginestet, Professeur à l'INSA Toulouse, et Monsieur Pierre Rahme, Professeur à l'Université Libanaise, qui m'ont encadré tout au long de cette thèse, et qui m'ont fait partager leurs idées créatives pour dépasser les difficultés envisagées pendant cette durée. Qu'ils soient aussi remerciés de leurs disponibilités et leurs patiences pour répondre à toutes mes questions.

Je remercie également mes co-directeurs de thèse, Monsieur Gilles Escadeillas, Professeur à l'Université Paul Sabatier, et Monsieur Elias Kinab, MCF à l'Université Libanaise, de leurs propositions permanentes et leurs remarques constructives qui ont joué un rôle prépondérant dans le renforcement de ce travail.

Je tiens aussi à remercier Madame Marion Bonhomme, MCF à l'INSA Toulouse, de l'intérêt qu'elle ma fournit à mon sujet et qui m'a fait plonger davantage dans ses subtilités.

Ce travail n'a pas été possible sans le financement des établissements partenaires, l'INSA Toulouse et l'Université Libanaise. Un grand merci à leurs cadres administratifs et financiers qui ont géré toutes les démarches de suivi de thèse, de la première inscription jusqu'à la soutenance.

Je remercie aussi les personnels techniques de l'INSA Toulouse, et surtout Monsieur Fabien Nougarolles, qui m'ont aidé d'une manière substantielle à achever la partie expérimentale dans les meilleurs délais.

Je n'oublie pas de remercier les doctorants et les chercheurs à l'INSA Toulouse et à l'Université Paul Sabatier, avec lesquels on a partagé des moments inoubliables.

Tous ces remerciements restent incomplets si je ne mentionne pas mes parents, mes sœurs et mon frère qui ont été toujours mon support permanent pour atteindre mes objectifs, à travers le soutien incessant et l'encouragement précieux qu'ils m'ont prodigué.

Résumé

Les îlots de chaleur urbains (ICU) représentent un phénomène local qui apparaît dans les villes à forte densité. Il se traduit par une élévation de la température ambiante dans la zone urbaine par rapport aux zones rurales voisines. Il entraîne des effets négatifs sur le confort extérieur, la qualité de l'air et la consommation énergétique des bâtiments.

Il est donc primordial d'intégrer des dispositifs passifs pour atténuer ce phénomène dans la conception des projets et des espaces urbains. Les différentes stratégies de limitation d'ICU sont basées sur l'augmentation de l'albédo des sols et des enveloppes des bâtiments, sur l'élargissement des surfaces végétalisées, ainsi que sur la mise en place de sources d'eau comme les fontaines et les brumisateurs.

Les pavés rafraîchissants constituent une technique innovante et prometteuse pour atténuer les îlots de chaleur urbains. Les pavés rafraîchissants étudiés dans ce travail, permettent de limiter l'augmentation de la température de surface, grâce à l'évaporation de l'eau conduite à travers les pores capillaires, de la base alimentée par l'eau vers la surface exposée au rayonnement solaire. L'effet rafraîchissant du pavé se traduit par la valeur de sa température de surface, qui dépend principalement de ses propriétés thermo-physiques, des conditions météo et des conditions initiales (température initiale, état de saturation).

Dans le contexte de cette thèse, la qualification du pavé pour son effet rafraîchissant est réalisée à travers une étude expérimentale divisée en deux étapes. L'objectif initial de cette étude, est de trouver les propriétés thermo-physiques du pavé qui contrôlent sa température de surface, quand ce dernier est soumis aux conditions climatiques extérieures.

Dans un premier temps, plusieurs pavés sont caractérisés à travers leurs propriétés thermo-physiques étant en relation avec l'effet rafraîchissant selon la littérature.

Dans un second temps, ces pavés initialement saturés et alimentés d'une manière continue par l'eau à travers leurs bases, sont exposés au rayonnement solaire pendant trois jours estivaux et ensoleillés et leurs températures de surface sont surveillées.

Finalement, un modèle numérique de transfert de chaleur et de masse est développé, en introduisant certaines propriétés thermo-physiques mesurées et les conditions climatiques enregistrées par une station météo proche du lieu d'exposition. La validation de ce modèle est réalisée en comparant les courbes expérimentales et numériques de variation de la température de surface, pendant les jours d'exposition.

Les résultats issus de la campagne expérimentale montrent l'existence d'un couplage entre les propriétés thermo-physiques du pavé, qui contrôle sa température de surface et qui dépend du type de pavés (pavé drainant ou non drainant). De plus, la validation du modèle implique que ce

dernier pourra être adopté comme outil pour prédire les comportements hygrothermiques des pavés et pour les qualifier selon leurs effets de rafraîchissement surfacique.

Mots clés : îlots de chaleur urbains, pavés rafraîchissants, température de surface, propriétés thermo-physiques, évaporation.

Abstract

Urban heat islands (UHI) represent a local phenomenon that occurs in high-density cities. It results in an increase in ambient temperature in the urban area compared to the surrounding rural areas and leads to negative effects on outdoor comfort, air quality and energy consumption of buildings.

It is therefore essential to integrate passive devices to mitigate this phenomenon in the design of projects and urban spaces. The different strategies to limit UHI are based on increasing the albedo of soils and building envelopes, increasing vegetated surfaces, as well as on the implementation of water sources such as fountains and misters.

Cool pavements are an innovative and promising technique to mitigate urban heat islands. The cool pavements studied in this work, allow to limit the increase in the surface temperature, thanks to the evaporation of the water conducted through the capillary pores, from the base supplied by water towards the surface exposed to the solar radiation. The cooling effect of the pavement is reflected in the value of its surface temperature, which depends mainly on its thermo-physical properties, the weather conditions and the initial conditions (initial temperature, saturation state).

In the context of this thesis, the qualification of the pavement for its cooling effect, is carried out through an experimental study divided into two steps. The primary objective of this study is to find the thermo-physical properties of the pavement that control its surface temperature when it is subjected to external climatic conditions.

For this purpose, several pavements are initially characterized through their thermo-physical properties that may be relevant to the cooling effect.

Secondly, these pavements initially saturated and continuously supplied with water through their bases, are simultaneously exposed to solar radiation for three sunny summer days and their surface temperatures are monitored.

Finally, a numerical model of heat and mass transfer is developed, by introducing some measured thermo-physical properties and the climatic conditions recorded by a weather station close to the exposure site. The validation of this model is performed by comparing the experimental and numerical curves of surface temperature variation during the exposure days.

The results of the experimental campaign show the existence of a coupling between the thermo-physical properties of the pavement, which controls its surface temperature and which depends on the type of the pavement (draining or non-draining). Moreover, the validation of the model implies that it can be adopted as a tool to predict the hygrothermal behaviors of the pavements and to qualify them according to their surface cooling effects.

Keywords: urban heat islands, cool pavements, surface temperature, thermo-physical properties, evaporation.

Liste des figures

Figure I.1. Formes communes des pavés rafraîchissants [15] : (a) poreux, (b) priora et (c) alvéolé	5
Figure I.2. Phénomènes produits sur le pavé rafraîchissant [17]	6
Figure I.3. Variation du taux d'évaporation des échantillons en fonction du temps [29].....	14
Figure I.4. Variation de la température de surface des échantillons en fonction du temps [29]	15
Figure I.5. Variation de la température de surface en fonction du taux d'évaporation [20]	16
Figure I.6. Taux d'évaporation moyen pendant trois jours d'exposition à l'extérieur [29]. (a) en fonction de la perméabilité, et (b) en fonction de la porosité	20
Figure I.7. Variation du taux d'évaporation moyen pendant trois jours d'exposition à l'extérieur en fonction de la profondeur du niveau d'eau [29]. (a) pour l'asphalte et le béton, et (b) pour le gravier et le sable	20
Figure I.8. Variation du flux d'évaporation (E) en fonction de la teneur en eau (θ) de 1 Juillet à 11 Juillet [18].....	21
Figure I.9. Configurations des pavés étudiés [34]. (a) pavé retenant l'eau à tubes drainants, (b) pavé perméable drainant, (c) pavé dense, et (d) positions des tubes drainants	22
Figure I.10. Variation des flux de chaleur latente, sensible, et de rayonnement net en fonction du temps. (a) pour la céramique, et (b) pour le béton [35]	23
Figure I.11. Pavé perméable conventionnel (gauche) et pavé perméable à colonnes capillaires (droite) [36].....	25
Figure I.12. (a) Variation des taux d'évaporation, et (b) Variation des températures de surface en fonction du temps [36]	25
Figure I.13. Variation de la perte en masse des matériaux testés en fonction du temps [38]	27
Figure I.14. (a) Variation des taux d'évaporation, et (b) Variation des pertes en masse cumulées en fonction du temps [39]	27
Figure I.15. Approches suivies pour atténuer le phénomène d'ICU à travers la technique des pavés rafraîchissants.....	28
Figure I.16. Variation de la température de surface maximale en fonction de l'albédo	30

Figure I.17. Variation de l'intensité du réchauffement surfacique en fonction de l'albédo	31
Figure I.18. Variation de la température de surface maximale en fonction de la conductivité thermique	32
Figure I.19. Variation de l'intensité du réchauffement surfacique en fonction de la conductivité thermique	32
Figure I.20. Variation de la température de surface moyenne en fonction du taux d'évaporation moyen	34
Figure I.21. Variation de l'intensité du réchauffement surfacique en fonction du taux d'évaporation moyen.....	34
Figure II.1. Aspect des matériaux utilisés dans les pavés à base de sable recyclé	53
Figure II.2. Aspect de la surface sciée des pavés à base de sable recyclé	54
Figure II.3. Aspect de la surface sciée des pavés en béton isolant structurel	55
Figure II.4. Constituants d'un matériau poreux non saturé	56
Figure II.5. Schéma illustratif d'un matériau poreux	57
Figure II.6. Montage expérimental d'essai de porosité ouverte et masses volumiques.....	59
Figure II.7. Effet de la tension superficielle sur une goutte d'eau en l'absence de la gravité.....	60
Figure II.8. Liquide mouillant (gauche) et liquide non mouillant (droite)	61
Figure II.9. Phénomène d'ascension capillaire	62
Figure II.10. Matériau poreux à tubes cylindriques verticaux identiques	63
Figure II.11. Variation temporelle théorique de la masse d'eau capillaire absorbée	65
Figure II.12. Schéma d'essai d'absorption capillaire [72]	66
Figure II.13. Montage expérimental d'essai d'absorption capillaire	67
Figure II.14. Schéma d'essai de conductivité hydraulique à charge constante.....	69
Figure II.15. Montage expérimental d'essai de conductivité hydraulique à charge constante ...	70
Figure II.16. Schéma d'essai de conductivité hydraulique à charge variable.....	71

Figure II.17. Montage expérimental d'essai de conductivité hydraulique à charge variable	73
Figure II.18. Schéma d'essai d'exposition au simulateur solaire	74
Figure II.19. Montage expérimental d'essai d'exposition au simulateur solaire	76
Figure II.20. Mesure du flux surfacique par le pyranomètre	76
Figure II.21. Montage expérimental d'essai d'albédo	79
Figure II.22. Montage expérimental d'essai de conductivité thermique	81
Figure II.23. Section du flux de conduction mesuré par le lambda-mètre	81
Figure II.24. Montage expérimental d'essai d'effusivité thermique	84
Figure II.25. Montage expérimental d'essai de mesure des températures de surface à l'état humide : à gauche pavés exposés au soleil, à droite image infrarouge des pavés	86
Figure II.26. Montage expérimental d'essai de mesure des températures de surface à l'état sec : à gauche pavés exposés au soleil, à droite image infrarouge des pavés	87
Figure III.1. Porosité ouverte et masse volumique apparente	91
Figure III.2. Masse volumique apparente en fonction de la porosité ouverte	92
Figure III.3. Evolution de la masse d'eau absorbée en fonction de la racine carrée du temps....	93
Figure III.4. Teneur en eau capillaire et coefficient d'absorption capillaire	94
Figure III.5. Teneur en eau capillaire en fonction du coefficient d'absorption capillaire.....	95
Figure III.6. Conductivité hydraulique des pavés drainants	96
Figure III.7. Conductivité hydraulique des pavés non drainants	97
Figure III.8. Variation du taux d'évaporation en fonction du temps	98
Figure III.9. Taux d'évaporation moyen	99
Figure III.10. Spectre d'émissivité du pavé 1 et du spectralon	102
Figure III.11. Spectre de réflectivité du pavé 1	103
Figure III.12. Albédo	104

Figure III.13. Conductivité thermique.....	105
Figure III.14. Conductivité thermique en fonction de la masse volumique apparente.....	105
Figure III.15. Effusivité thermique	106
Figure III.16. Chaleur spécifique et Diffusivité thermique.....	107
Figure III.17. Variation de la température de surface des pavés à l'état humide le 11/09/2020	111
Figure III.18. Variation de la température de surface des pavés à l'état humide le 14/09/2020	111
Figure III.19. Variation de la température de surface des pavés à l'état humide le 17/09/2020	112
Figure III.20. Température de surface moyenne et maximale moyenne pendant trois jours d'exposition à l'état humide.....	113
Figure III.21. Différences de température de surface moyenne et maximale moyenne pendant trois jours d'exposition à l'état humide par rapport au bitume.....	114
Figure III.22. Variation de la température de surface des pavés à l'état sec le 25/08/2021	115
Figure III.23. Variation de la température de surface des pavés à l'état sec le 26/08/2021	116
Figure III.24. Variation de la température de surface des pavés à l'état sec le 31/08/2021	116
Figure III.25. Température de surface moyenne pendant trois jours d'exposition à l'état sec .	118
Figure III.26. Température de surface maximale moyenne en fonction de l'albédo à l'état sec	121
Figure III.27. Température de surface maximale moyenne en fonction de l'albédo à l'état sec : valeurs de la bibliographie (indiquées par référence) et nos valeurs	121
Figure III.28. Température de surface maximale moyenne en fonction de la conductivité thermique à l'état sec.....	122
Figure III.29. Température de surface maximale moyenne en fonction de la conductivité thermique à l'état sec : valeurs de la bibliographie (indiquées par référence) et nos valeurs..	123
Figure III.30. Température de surface moyenne des pavés drainants en fonction du terme $K\Theta_{cap}$	124
Figure III.31. Température de surface moyenne des pavés non drainants en fonction du terme $\alpha E_{th}\Theta_{cap}$	125

Figure III.32. Température de surface moyenne en fonction du taux d'évaporation moyen sous l'essai d'exposition au simulateur solaire.....	126
Figure III.33. Température de surface moyenne sous l'exposition au simulateur solaire en fonction de la température de surface moyenne pendant trois jours d'exposition à l'extérieur.....	127
Figure IV.1. Pavé en 3D sur COMSOL.....	132
Figure IV.2. Phénomènes produits sur le pavé sec dans les conditions extérieures.....	134
Figure IV.3. Données météo du 25/08/2021	136
Figure IV.4. Données météo du 26/08/2021	136
Figure IV.5. Données météo du 31/08/2021	137
Figure IV.6. Courbes d'interpolation des propriétés de l'air basées sur les données de [80]....	139
Figure IV.7. Démarche de construction et de validation du modèle à l'état sec	141
Figure IV.9. Températures de surface du P20 et du pavé 9 à l'état sec le 26/08/2021	142
Figure IV.8. Températures de surface du P20 et du pavé 9 à l'état sec le 25/08/2021	142
Figure IV.10. Températures de surface du P20 et du pavé 9 à l'état sec le 31/08/2021	143
Figure IV.11. Pavés à l'état humide pendant l'exposition à l'extérieur.....	146
Figure IV.12. Phénomènes produits sur le pavé humide dans les conditions extérieures.....	148
Figure IV.13. Données météo du 11/09/2020	153
Figure IV.14. Données météo du 14/09/2020	153
Figure IV.15. Données météo du 17/09/2020	154
Figure IV.16. Masses d'eau évaporée sous un rayonnement de 1 sun	157
Figure IV.17. Taux d'évaporation sous un rayonnement de 1 sun	158
Figure IV.18. Rendements d'évaporation sous un rayonnement de 1 sun	158
Figure IV.19. Démarche de construction et de validation du modèle à l'état humide	161
Figure IV.20. Températures de surface des pavés 7 et 11 à l'état humide le 11/09/2020	162

Figure IV.21. Températures de surface des pavés 7 et 11 à l'état humide le 14/09/2020	163
Figure IV.22. Températures de surface des pavés 7 et 11 à l'état humide le 17/09/2020	163
Figure IV.23. Masses d'eau évaporée simulées des pavés 7 et 11 le 11/09/2020.....	166
Figure IV.24. Masses d'eau évaporée simulées des pavés 7 et 11 le 14/09/2020.....	167
Figure IV.25. Masses d'eau évaporée simulées des pavés 7 et 11 le 17/09/2020.....	167
Figure IV.26. Distribution de la saturation dans le pavé 7 (a et b) et le pavé 11 (c et d) à la moitié du temps (à gauche) et à la fin d'exposition (à droite) le 11/09/2020.....	169
Figure IV.27. Distribution de la saturation dans le pavé 7 (a et b) et le pavé 11 (c et d) à la moitié du temps (à gauche) et à la fin d'exposition (à droite) en 14/09/2020	170
Figure IV.28. Distribution de la saturation dans le pavé 7 (a et b) et le pavé 11 (c et d) à la moitié du temps (à gauche) et à la fin d'exposition (à droite) en 17/09/2020	171
Figure IV.29. Effet de la variation d'albédo sur la température de surface (pavé fictif testé sur la base des conditions climatiques du 17/09/2020)	173
Figure IV.30. Effet de la variation d'albédo sur la masse d'eau évaporée (pavé fictif testé sur la base des conditions climatiques du 17/09/2020)	174
Figure IV.31. Effet de la variation de la capacité thermique sur la température de surface (pavé fictif testé sur la base des conditions climatiques du 17/09/2020)	175
Figure IV.32. Effet de la variation de la capacité thermique sur la masse d'eau évaporée (pavé fictif testé sur la base des conditions climatiques du 17/09/2020)	176
Figure IV.33. Effet de la variation du taux d'évaporation sur la température de surface (pavé fictif testé sur la base des conditions climatiques du 17/09/2020)	177
Figure IV.34. Effet de la variation du taux d'évaporation sur la masse d'eau évaporée (pavé fictif testé sur la base des conditions climatiques du 17/09/2020).....	178

Liste des tableaux

Tableau II.1. Séries des pavés étudiés	52
Tableau II.2. Composition massique des pavés à base de sable recyclé (0 - 4 mm)	53
Tableau III.1. Propriétés physiques des pavés	101
Tableau III.2. Propriétés thermiques des pavés	109
Tableau III.3. Températures de surface des pavés	119
Tableau IV.1. Paramètres introduits dans le modèle à l'état sec	135
Tableau IV.2. Propriétés de l'air à une pression de 1 atm [80]	138
Tableau IV.3. Variables employées dans le modèle à l'état humide	140
Tableau IV.4. Indices de comparaison des températures de surface à l'état sec	144
Tableau IV.5. Paramètres utilisés dans le modèle à l'état humide	152
Tableau IV.6. Rendements d'évaporation moyens sous un rayonnement solaire de 1 sun	159
Tableau IV.7. Variables employées dans le modèle à l'état humide	160
Tableau IV.8. Indices de comparaison des températures de surface à l'état humide	164
Tableau IV.9. Propriétés physiques du pavé fictif	172

Notations

Notation	Grandeur	Unité
a	Section intérieure du tube transparent	m^2
A	Section du matériau ou du pavé	m^2
A_{cap}	Coefficient d'absorption capillaire	$kg.m^{-2}.h^{-0.5}$
α	Albédo du pavé	% ou -
α_{Al}	Albédo du ruban d'aluminium	% ou -
$A_{isolant}$	Section de l'isolant traversée par le flux conductif	m^2
A_{tot}	Section totale traversée par le flux conductif	m^2
C_p	Chaleur spécifique	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
$C_{p,a}$	Chaleur spécifique de l'air	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
$C_{p,f}$	Chaleur spécifique du film	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
$C_{p,w}$	Chaleur spécifique de l'eau	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
CV	Coefficient de variation	%
D	Coefficient de diffusion de l'eau dans le pavé	m^2/s
$ \Delta m $	Masse d'eau évaporée pendant la durée qui sépare les instants t' et t	g
Δt	Durée qui sépare les instants t' et t	h
ΔT	Différence de température entre la face chaude et la face froide	K
$\Delta T_{s,moy}$	Différence de température de surface moyenne du pavé par rapport au bitume	$^{\circ}C$
dF	Force intermoléculaire supplémentaire à la surface	N
dl	Distance intermoléculaire	m
D_{th}	Diffusivité thermique	m^2/s
EA_{max}	Erreur absolue maximale	$^{\circ}C$
ε	Emissivité du pavé	-
ε_{Al}	Emissivité du ruban d'aluminium	-
ε_g	Teneur volumique en gaz dans le pavé	-
$\varepsilon_{pavé}(\lambda)$	Emissivité du pavé à une longueur d'onde λ	-
ε_s	Fraction volumique du solide	-
$\varepsilon_{spectralon}(\lambda)$	Emissivité du spectralon à une longueur d'onde λ	-
ε_w	Teneur volumique en eau dans le pavé	-
$E_p(t)$	Taux d'évaporation du pavé à l'instant t sous un rayonnement de 1 sun	$g.m^{-2}.h^{-1}$
$E(t)$	Taux d'évaporation entre les instants t' et t	$g.m^{-2}.h^{-1}$
E_{th}	Effusivité thermique	$J.m^{-2}.K^{-1}.s^{-0.5}$
$E_w(t)$	Taux d'évaporation de l'eau nue à l'instant t sous un rayonnement de 1 sun	$g.m^{-2}.h^{-1}$
f	Facteur d'élargissement	-
g	Accélération de la pesanteur	N/kg
γ	Tension superficielle	N/m
γ_{LG}	Tension superficielle liquide-gaz	N/m
γ_{LS}	Tension superficielle liquide-solide	N/m
γ_{SG}	Tension superficielle solide-gaz	N/m

g_{surf}	Flux massique sortant de la surface	$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$
h	Charge hydraulique appliquée	m
h_1	Charge hydraulique initiale	m
h_2	Charge hydraulique finale	m
h_c	Coefficient de convection	$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$
$h(t)$	Ascension capillaire à l'instant t	m
h_v	Enthalpie de vaporisation de l'eau	J/kg
H	Hauteur capillaire à l'équilibre	m
HR	Humidité relative	% ou -
H_s	Hauteur du pavé ou des tubes cylindriques	cm
k	Conductivité thermique du pavé	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
k_a	Conductivité thermique de l'air	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
k_{eff}	Conductivité thermique effective	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
k_f	Conductivité thermique du film	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
$k_{isolant}$	Conductivité thermique de l'isolant	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
$k_{mesurée}$	Conductivité thermique mesurée par le lambda-mètre	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
k_w	Conductivité thermique de l'eau	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
K	Conductivité hydraulique	m/s
\bar{K}	Conductivité hydraulique moyenne	m/s
K_i	Conductivité hydraulique mesurée	m/s
K^*	Perméabilité à l'eau	m^2
K_m	Coefficient de transfert de masse	m/s
λ_a	Borne inférieure de l'intervalle de mesure des longueurs d'onde	nm
λ_b	Borne supérieure de l'intervalle de mesure des longueurs d'onde	nm
L_c	Longueur caractéristique	m
L_s	Côté du pavé	cm
MAE	Erreur absolue moyenne	°C
m_i	Masse totale (pavé + eau) initiale	g
m_{rec}	Masse d'eau récupérée dans le récipient	kg
m_s	Masse sèche	kg
$m_{sat,a}$	Masse saturée dans l'eau	kg
$m_{sat,w}$	Masse saturée dans l'air	kg
m_{surf}	Taux d'évaporation surfacique	$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$
$m(t)$	Masse totale (pavé + eau) à l'instant t	g
μ_a	Viscosité dynamique de l'air	Pa.s
μ_f	Viscosité dynamique du film	Pa.s
μ_w	Viscosité dynamique de l'eau	Pa.s
m_w	Masse d'eau restante dans le pavé	g
$m_{w,evap}$	Masse d'eau évaporée	g
$m_{w,f}$	Masse d'eau absorbée finale par capillarité	kg
$m_{w,i}$	Masse d'eau initiale dans le pavé	g
$m_{w,max}$	Masse d'eau absorbée maximale par capillarité	kg
$m_w(t)$	Masse d'eau absorbée à l'instant t	g
M_w	Masse molaire de l'eau	kg/mol
n	Nombre de mesures d'une variable x	-

Nu	Nombre de Nusselt	-
P_0	Pression atmosphérique	Pa
P_{cap}	Pression capillaire	Pa
φ	Porosité totale	-
φ_f	Porosité fermée	-
φ_o	Porosité ouverte ou accessible	-
P_m	Puissance moyenne fournie dans la plaque chaude	W
Pr	Nombre de Prandtl	-
$P_{sat,a}$	Pression de vapeur saturante dans l'air	Pa
$P_{sat,p}$	Pression de vapeur saturante dans le pavé	Pa
q_c	Flux de convection	W/m ²
q_E	Flux d'évaporation	W/m ²
q_{lat}	Flux sur les faces latérales	W/m ²
$q_{r,in}$	Flux de rayonnement entrant dans le pavé	W/m ²
$q_{r,in,Al}$	Flux de rayonnement entrant dans le ruban d'aluminium	W/m ²
$q_{r,out}$	Flux de rayonnement sortant du pavé	W/m ²
$q_{r,out,Al}$	Flux de rayonnement sortant du ruban d'aluminium	W/m ²
q_{surf}	Flux sur la surface du pavé	W/m ²
Q ou q_{cond}	Flux de conduction	W/m ²
$Q_{isolant}$	Flux de conduction traversant l'isolant	W/m ²
$Q_{mesuré}$	Flux de conduction mesuré par le lambda-mètre	W/m ²
$Q_{pavé}$	Flux de conduction traversant le pavé	W/m ²
Q_s	Flux de chauffage surfacique	W/m ²
r	Rendement d'évaporation	-
$r_{1\ sun}(t)$	Rendement d'évaporation à l'instant (t) sous un rayonnement solaire de 1 sun	-
$\bar{r}_{1\ sun}$	Rendement d'évaporation moyen sous un rayonnement solaire de 1 sun	-
r_p	Rayon interne du tube ou du pore cylindrique	m
R^2	Coefficient de détermination	-
Re	Nombre de Reynolds	-
R_g	Constante des gaz parfaits	J.mol ⁻¹ .K ⁻¹
ρ	Masse volumique apparente	kg/m ³
ρ_a	Masse volumique de l'air	kg/m ³
$\rho_{eff}C_{p,eff}$	Capacité thermique volumique effective	J.m ⁻³ .K ⁻¹
ρ_f	Masse volumique du film	kg/m ³
ρ_l	Masse volumique du liquide	kg/m ³
ρ_s	Masse volumique du solide ou réelle	kg/m ³
ρ_w	Masse volumique de l'eau	kg/m ³
R_s	Flux de rayonnement solaire incident	W/m ²
$R_{s,max}$	Rayonnement solaire maximal pendant le jour d'exposition à l'extérieur	W/m ²
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	W.m ⁻² .K ⁻⁴
σ_n	Ecart-type	unité de la variable mesurée
σ_{n-1}	Ecart-type de type n-1	

S_w	Saturation en eau liquide	-
t	Temps ou durée	h
t_{eq}	Instant d'équilibre pour l'absorption capillaire	h
T	Température	K ou °C
T_0	Température d'ébullition de l'eau	K
T_a	Température de l'air	K
T_{chaud}	Température moyenne du côté chaud du pavé	K
$T_{exp}(t_i)$	Températures de surface expérimentale à l'instant t_i	°C
T_f	Température du film	K
T_{froid}	Température moyenne du côté froid du pavé	K
θ	Angle de contact ou angle de raccordement	°
Θ_{cap}	Fraction volumique des pores capillaires	%
T_i	Température initiale	K
T_s	Température de surface	K
$T_{s,i}$	Température initiale du solide	K
$T_{sim}(t_i)$	Températures de surface simulée à l'instant t_i	°C
$T_{s,max}$	Température de surface maximale moyenne	°C
$T_{s,max}(jour i)$	Température de surface maximale pendant le jour « i »	°C
$T_{s,moy}$	Température de surface moyenne	°C
$T_{s,moy}(jour i)$	Température de surface moyenne pendant le jour « i »	°C
u	Incertitude composée	unité de la variable mesurée
u_A	Incertitude de répétabilité ou aléatoire	
u_B	Incertitude systématique	
U	Incertitude composée élargie	
U_a	Vitesse de l'air	m/s
V_{app}	Volume apparent	m ³
V_g	Volume de la phase gazeuse	m ³
V_p	Volume de pores	m ³
$V_{p,f}$	Volume des pores fermés	m ³
$V_{p,o}$	Volume des pores ouverts	m ³
V_{rec}	Volume d'eau récupéré dans le récipient	m ³
V_s	Volume de la phase solide	m ³
V_w	Volume de l'eau liquide	m ³
$V_{w,cap}$	Volume d'eau capillaire	m ³
$V_{w,i}$	Volume d'eau initial	m ³
$V_{w,max}$	Volume d'eau maximal	m ³
$V_w(t)$	Volume d'eau absorbé à l'instant t	m ³
W_{cap}	Teneur en eau capillaire	kg/m ³
X	Valeur réelle	
χ_i	Ecart relatif par rapport à la moyenne	%
z	z = coordonnée verticale (sens positif vers le bas)	m

Sommaire

Introduction.....	1
Chapitre I : Etude Bibliographique	3
1. Introduction	3
2. Pavés rafraîchissants et bilan énergétique	5
2.1. Généralités.....	5
2.2. Principe	6
2.3. Approches de réduction de la température de surface	8
2.3.1. Diminuer l'absorption du rayonnement solaire en augmentant l'albédo	8
2.3.2. Augmenter la conduction en améliorant la conductivité thermique des pavés	10
2.3.3. Favoriser l'évaporation	13
3. Facteurs favorisant l'évaporation	16
3.1. Facteurs climatiques.....	17
3.2. Irrigation	17
3.3. Propriétés physiques du pavé	19
3.3.1. Porosité et Perméabilité	19
3.3.2. Capacité de rétention d'eau	20
3.3.3. Capacités capillaires.....	22
3.3.4. Texture et taille des particules	26
3.4. Bilan	28
4. Comparaison des résultats des approches adoptées	29
4.1. Température de surface maximale ($T_{s,max}$) et albédo (α).....	29
4.2. Température de surface maximale ($T_{s,max}$) et conductivité thermique (k)	31
4.3. Température de surface moyenne ($T_{s,moy}$) et taux d'évaporation moyen (E_{moy})	33
5. Effet des sous-produits sur les propriétés physiques favorisant l'évaporation	35
5.1. Balles de riz	35
5.2. Scories de cuivre	37
5.3. Cendres volantes	37

5.4. Granulats recyclés	38
5.5. Déchets de coquillage.....	39
6. Durabilité et Maintenance des pavés rafraîchissants.....	40
6.1. Evolution de l'albédo avec le temps.....	41
6.2. Résistance mécanique en compression	41
6.3. Résistance à l'abrasion	45
6.4. Résistance au gel-dégel	46
6.5. Colmatage des pores	47
7. Conclusion	48
Chapitre II : Matériaux et Méthodes	51
1. Introduction	51
2. Pavés retenus dans la cadre de l'étude	52
2.1. Série (BS) en béton à base de sable recyclé	52
2.2. Série (BI) en béton isolant structurel.....	54
3. Caractérisation thermo-physique des pavés.....	55
3.1. Caractérisation physique	56
3.1.1. Porosité ouverte et masses volumiques.....	56
3.1.1.1. Définition.....	56
3.1.1.2. Protocole d'essai	58
3.1.2. Capacités capillaires.....	59
3.1.2.1. Tension superficielle et mouillabilité	59
3.1.2.2. Ascension Capillaire	61
3.1.2.3. Absorption capillaire	63
3.1.2.4. Protocole d'essai d'absorption capillaire	66
3.1.3. Conductivité hydraulique.....	67
3.1.3.1. Définition.....	67
3.1.3.2. Protocole d'essai	68
3.1.3.2.1. Conductivité hydraulique à charge constante (pavés drainants).....	68
3.1.3.2.2. Conductivité hydraulique à charge variable (pavés non drainants).....	70
3.1.4. Taux d'évaporation	73

3.1.4.1. Définition.....	73
3.1.4.2. Protocole d'essai	74
3.2. Caractérisation thermique des pavés et de leur surface	77
3.2.1. Mesure de l'albédo	77
3.2.1.1. Définition.....	77
3.2.1.2. Protocole d'essai	78
3.2.2. Conductivité thermique.....	80
3.2.2.1. Définition.....	80
3.2.2.2. Protocole d'essai	80
3.2.3. Effusivité thermique, chaleur spécifique et diffusivité thermique.....	82
3.2.3.1. Effusivité thermique.....	83
Protocole de mesure de l'effusivité thermique.....	83
3.2.3.2. Chaleur spécifique.....	84
3.2.3.3. Diffusivité thermique	84
4. Exposition au rayonnement solaire et surveillance des températures de surface.....	85
4.1. Exposition à l'état humide.....	85
4.2. Exposition à l'état sec	86
5. Conclusion	87

Chapitre III : Caractérisation expérimentale des pavés et étude du potentiel de rafraîchissement

1. Introduction	89
2. Mesures des propriétés thermo-physiques	89
2.1. Caractérisation physique	90
2.1.1. Porosité ouverte et masses volumiques.....	90
2.1.2. Absorption capillaire	92
2.1.3. Conductivité hydraulique.....	95
2.1.3.1. Pavés drainants	95
2.1.3.2. Pavés non drainants	96
2.1.4. Taux d'évaporation	97
2.1.5. Synthèse des résultats	100

2.2. Caractérisation thermique.....	101
2.2.1. Albédo	102
2.2.2. Conductivité thermique.....	104
2.2.3. Effusivité thermique, Chaleur spécifique et Diffusivité thermique.....	106
2.2.4. Synthèse des résultats	108
3. Résultats des mesures de températures de surface.....	109
3.1. Etat humide	110
3.2. Etat sec.....	115
3.3. Synthèse des résultats.....	118
4. Corrélations entre la température de surface et les propriétés thermo-physiques.....	119
4.1. Etude de l'état sec	120
4.1.1. Relation entre la température de surface maximale moyenne et l'albédo	120
4.1.2. Relation entre la température de surface maximale moyenne et la conductivité thermique	122
4.2. Etat humide	123
4.2.1. Cas des pavés drainants.....	123
4.2.2. Cas des pavés non drainants.....	125
4.2.3. Relation entre le taux d'évaporation et la température de surface	126
5. Conclusion	128
Chapitre IV : Modélisation numérique	131
1. Introduction	131
2. Modèle numérique à l'état sec	131
2.1. Géométrie.....	131
2.2. Hypothèses	132
2.3. Equation Gouvernante	133
2.4. Conditions initiales et aux limites.....	133
2.5. Paramètres et Variables	135
2.6. Validation du modèle à l'état sec.....	141
3. Modèle numérique à l'état humide	145
3.1. Introduction	145

3.2. Géométrie et Hypothèses.....	146
3.3. Equations gouvernantes.....	147
3.4. Conditions initiales et aux limites.....	147
3.4.1. Transfert de chaleur.....	148
3.4.2. Transfert de masse	150
3.5. Paramètres et Variables	151
3.6. Validation du modèle à l'état humide.....	161
3.7. Résultats de simulation de la masse d'eau évaporée	165
3.8. Résultats de la simulation de la saturation en eau	168
3.9. Sensibilité du modèle aux propriétés du pavé.....	172
3.9.1. Effet de l'albédo.....	173
3.9.2. Effet de la conductivité thermique et de la porosité ouverte.....	174
3.9.3. Effet de la capacité thermique volumique	174
3.9.4. Effet du taux d'évaporation.....	176
4. Conclusion	178
Conclusions générales.....	181
Perspectives de recherche	185
Références.....	187
Annexes.....	195

Introduction

Le réchauffement climatique est un phénomène global caractérisé par l'augmentation de la température moyenne de l'atmosphère terrestre. Selon Météo France, cette augmentation est de l'ordre de 0.2°C par décennie [1]. La plupart des sociétés consacrent un effort important pour chercher des solutions d'atténuation à ce phénomène, provoqué principalement par les gaz à effet de serre émis par les activités humaines vers l'atmosphère. Ce phénomène entraîne plusieurs conséquences comme par exemple la fonte des calottes polaires, l'élévation du niveau de la mer, des précipitations de plus en plus intenses dans certaines régions, et des vagues de chaleur de plus en plus extrêmes dans d'autres.

Les îlots de chaleur urbains (ICU) sont un phénomène local qui apparaît dans les villes à forte densité, où la température ambiante est plus élevée par rapport aux zones rurales voisines. Ce phénomène est principalement causé par les facteurs anthropiques comme l'urbanisation, la morphologie urbaine, les matériaux de revêtement, et le dégagement de chaleur anthropique. Le phénomène d'ICU engendre des effets néfastes sur la qualité de l'air, le confort extérieur des piétons, et la consommation énergétique notamment pour la climatisation des bâtiments et des véhicules.

Plusieurs solutions ont été adoptées pour lutter contre le phénomène d'ICU, comme une architecture urbaine bien adaptée, la mise en place de surfaces végétalisées et de sources d'eau (bassins, fontaines, brumisateurs, etc.), et l'emploi des matériaux dans les enveloppes de construction qui absorbent moins de chaleur (pavés et toits réfléchissants).

Les revêtements des sols artificiels, comprenant les routes, les rues, les trottoirs, les pistes cyclables et autres, représentent par exemple plus de 30% des zones urbaines aux Etats-Unis [2]. Ce pourcentage relativement élevé a motivé la communauté scientifique à investir dans des revêtements artificiels pour atténuer le phénomène d'ICU. Cet investissement vise à limiter l'augmentation de la température de surface, dans le but de réduire les flux de convection et de rayonnement infrarouge émis par ces revêtements, qui tendent à réchauffer l'air environnant. Cette intervention peut permettre de conserver la structure interne du revêtement en appliquant sur sa surface une peinture ou une couche permettant de réfléchir une grande partie du rayonnement solaire incident, on parle alors de pavés réfléchissants. Elle peut aussi changer la structure du pavé pour qu'il soit capable de retenir plus d'eau dans ses pores, pour l'évaporer ultérieurement après une irrigation surfacique ou une alimentation souterraine. Dans cette situation, le phénomène d'évaporation permet de réduire la température de surface du pavé, et on parle alors de pavés évaporatifs ou pavés rafraîchissants.

Notre travail se concentre sur la technique des pavés rafraîchissants qui peut limiter l'augmentation de la température de surface grâce à l'évaporation de l'eau conduite par les pores capillaires de la base alimentée par l'eau vers la surface exposée au rayonnement solaire.

Ce type d'alimentation en eau permet d'éviter le ruissellement surfacique et d'optimiser le taux d'injection d'eau dans les pavés.

Pour juger sur l'effet de rafraîchissement surfacique des pavés, il faut comparer leurs températures de surface dans les mêmes conditions climatiques. Dans ce cadre, plusieurs études ont cherché à corrélérer la température de surface du pavé à ses propriétés thermo-physiques après une irrigation surfacique. Cependant, comme nous le verrons dans la partie bibliographie, ces études ont traité chaque propriété à part pour traduire son effet sur la température de surface, pour un nombre limité de pavés.

Pour combler ces lacunes dans la littérature, cette thèse vise à chercher le couplage entre les propriétés thermo-physiques qui contrôle la température de surface du pavé humide dans les conditions réelles pour un nombre important de formulations, et à présenter un modèle numérique capable de prédire le comportement hygrothermique du pavé dans ces conditions.

Pour atteindre cet objectif, ce manuscrit est divisé en quatre chapitres.

Le premier chapitre fournit une étude bibliographique sur la technique des pavés rafraîchissants. Il décrit les diverses approches suivies pour améliorer la capacité de rafraîchissement surfacique permettant d'atténuer le phénomène d'ICU, en s'appuyant sur le bilan énergétique qui se produit à la surface du pavé rafraîchissant. Ce chapitre couvre également l'influence d'incorporation de certains sous-produits sur l'évaporation et sur la durabilité des pavés.

Le deuxième chapitre permet d'identifier les pavés étudiés dans ce travail, et de décrire les méthodes de caractérisation employées pour évaluer leurs propriétés thermo-physiques (pouvant être en relation avec l'effet de rafraîchissement) et leurs températures de surface.

Le troisième chapitre est consacré à illustrer les résultats issus de la caractérisation thermo-physique des pavés, et les variations journalières de leurs températures de surface. Il montre également les corrélations trouvées entre les propriétés mesurées et la température de surface, pour mettre en évidence le degré d'influence de ces propriétés sur le rafraîchissement surfacique du pavé.

Le dernier chapitre offre un modèle numérique capable de prédire le comportement hygrothermique du pavé dans les conditions réelles. La construction de ce modèle est basée sur les valeurs mesurées de certaines propriétés thermo-physiques, et sur les données météo enregistrées par la station située à l'Université Paul Sabatier (UPS). La validation de ce modèle est réalisée en comparant les courbes de variations journalières des températures de surface, expérimentales et simulées, pendant les jours d'exposition.

Chapitre I : Etude Bibliographique

1. Introduction

Le réchauffement climatique représente un sujet d'actualité pour la plupart des pays qui exercent un effort considérable pour l'atténuer. Ce phénomène majeur s'exprime essentiellement par une élévation de la température moyenne ambiante terrestre. Cette température moyenne est calculée sur plusieurs années, voire une décennie. Selon Météo France, la température du globe près de la surface terrestre se réchauffe actuellement à un taux de 0.2°C par décennie [1]. Le réchauffement climatique est provoqué principalement par les gaz à effet de serre qui sont rejetés notamment par les activités humaines puis retenus dans l'atmosphère. Ce phénomène conduit en particulier à la fusion des calottes glaciaires polaires, à la hausse du niveau de la mer, à des précipitations de plus en plus fréquentes dans certaines régions et à des canicules de plus en plus extrêmes dans d'autres.

Très présents dans les villes à forte densité, les îlots de chaleur urbains (ICU) sont des zones localisées où les températures de l'air sont plus élevées que dans les zones rurales voisines [3]. L'écart entre les températures urbaines et rurales désigne l'intensité d'ICU [4], qui peut atteindre un pic de 10°C [5]. Le phénomène d'ICU a plusieurs effets nocifs sur les êtres vivants et l'environnement, en particulier sur la qualité de l'air, le confort extérieur des piétons [6], et l'économie (exprimée par exemple par une pénalisation liée à l'augmentation de la consommation d'énergie pour la climatisation des bâtiments [7]).

En comparant les deux phénomènes décrits ci-dessus (réchauffement climatique et ICU), on constate que le réchauffement climatique est un phénomène global dont l'estimation de son évolution nécessite plusieurs années alors que le phénomène d'ICU est plus local, dépend de la ville étudiée et nécessite toujours une référence qui est la zone rurale la plus proche.

Les différents facteurs provoquant le phénomène d'ICU peuvent être classifiés en deux grandes catégories [8] : (i) les causes naturelles comme la climatologie, la météorologie, et la topographie, qui dépendent de la localisation géographique, et (ii) les causes anthropiques qui sont liées directement aux interventions humaines telles que :

- L'urbanisation, ou en d'autres termes la diminution du couvert naturel qui inclut les espaces verts [9,10] et les sources d'eau [11],
- La géométrie ou l'architecture urbaine [4,12], sa morphologie
- Les matériaux de revêtement [13],

- La chaleur anthropique, c.à.d. la chaleur dégagée par les différentes activités humaines et particulièrement par l'industrie, les bâtiments, les véhicules et le métabolisme humain [14].

Les études et les recherches d'aujourd'hui s'appuient sur les causes mentionnées ci-dessus, afin de trouver les meilleures solutions pour lutter contre le phénomène d'ICU. Les solutions étudiées comprennent :

- Une architecture urbaine bien adaptée,
- L'augmentation des surfaces plantées et la mise en place des sources d'eau (fontaines, brumisateurs, etc.),
- L'emploi de matériaux qui absorbent moins de chaleur dans les enveloppes de construction comme les pavés et les toits réfléchissants, qui se caractérisent par une réflectivité solaire (albédo) élevée et par suite absorbent moins de chaleur que leurs équivalents conventionnels ou de couleur sombre.

Les revêtements des sols artificiels constituent plus de 30% des zones urbaines aux Etats-Unis, et cette proportion peut augmenter davantage dans les villes à forte densité. Ces revêtements comprennent les routes, les rues, les parkings, les pistes cyclables, les surfaces d'équipements sportifs et autres [2]. Cette fraction relativement élevée du pourcentage de revêtements des sols artificialisés a encouragé la communauté scientifique à consacrer ses efforts dans des études visant à trouver des solutions pour des problèmes climatiques majeurs, comme le phénomène d'ICU et les événements des inondations ou de ruissellement surfacique.

Ce chapitre fournit un aperçu sur la technique prometteuse des pavés rafraîchissants, étudiée dans plusieurs travaux de recherche et récemment employée au niveau industriel. Il s'agit de pavés poreux qui peuvent diminuer par temps chaud la température de l'air et de leur surface grâce à l'évaporation de l'eau contenue dans leurs pores. Il s'agit donc de pavés favorisant le phénomène d'évaporation. Ce chapitre commence par le bilan énergétique qui se produit à la surface et au sein des pavés rafraîchissants. Ensuite, en se basant sur ce bilan, apparaissent les différentes approches qui peuvent être adoptées afin d'améliorer l'aptitude des pavés rafraîchissants à atténuer le phénomène d'ICU. Ce chapitre couvrira les différents facteurs favorisant le processus d'évaporation, ainsi que l'effet d'incorporation de certains matériaux hydrophiles sur la performance des pavés. Enfin, ce travail se terminera par une analyse des principaux facteurs liés à la durabilité des pavés rafraîchissants et aux différentes techniques de maintenance employées pour préserver cette durabilité.

2. Pavés rafraîchissants et bilan énergétique

2.1. Généralités

Dans cette étude, le pavé rafraîchissant est toujours défini comme étant un pavé poreux/perméable favorisant l'évaporation. Il peut être à base drainée ou retenant l'eau. Dans le premier cas, un très faible pourcentage de la quantité d'eau versée sur lui sera retenue par ses pores, alors que le reste s'infiltrera à travers les pores interconnectés pour atteindre les couches sous-jacentes. En revanche, dans le pavé retenant l'eau, la plupart, sinon la totalité, de la quantité d'eau versée sera stockée dans les pores internes du pavé avant qu'elle soit exposée à l'évaporation.

Il existe plusieurs formes de pavés rafraîchissants. Les formes les plus connues, selon Imran et al. [15], sont illustrées dans la Figure I.1, et peuvent être divisées en trois catégories comme suit :

- Les pavés « poreux/perméables » dont la structure interne permet à l'eau de s'infiltrer à travers leurs pores interconnectés pour atteindre les couches sous-jacentes (Figure I.1a).
- Les pavés « priora » qui sont en général constitués par des blocs préfabriqués qui peuvent être perméables ou non. Ces blocs sont espacés de quelques millimètres ou centimètres les uns des autres. L'eau peut donc pénétrer à travers ces espaces, qui seront remplis par des granulats ou par du sol naturel (Figure I.1b).
- Les pavés de treillis en béton/plastique ou pavés « alvéolés » qui sont formés aussi par des grilles préfabriquées. La structure de ces grilles contient des vides qui seront remplis par des granulats ou par du sol naturel. L'eau peut donc traverser la surface des pavés à travers ces vides (Figure I.1c).

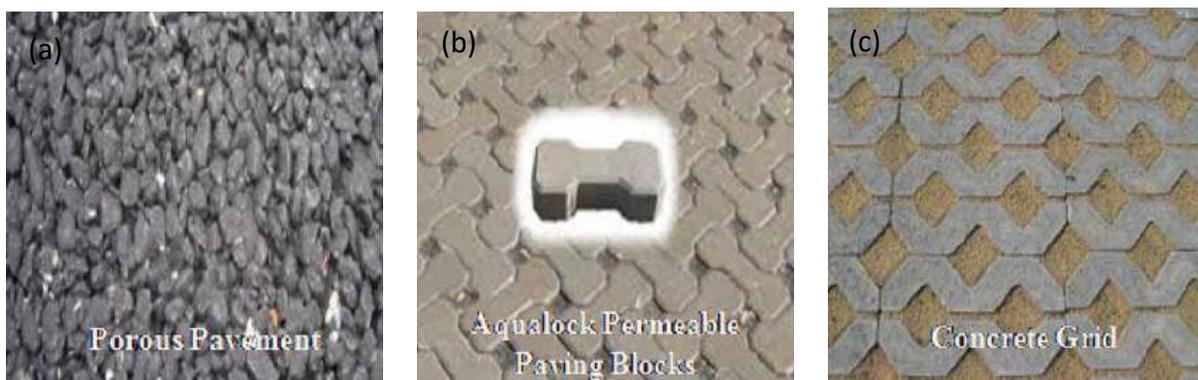


Figure I.1. Formes communes des pavés rafraîchissants [15] : (a) poreux, (b) priora et (c) alvéolé

En se basant sur la définition d'un pavé rafraîchissant et ses différentes formes, il peut être constaté que ces pavés ont deux avantages principaux :

- Le premier s'exprime par la réduction du risque d'inondations en diminuant le ruissellement surfacique [16], vu que la structure poreuse de ces pavés peut retenir une quantité plus ou moins importante d'eau, ou peut également évacuer la plupart de l'eau infiltrée de la surface dans le cas d'un pavé drainant.
- Le deuxième se manifeste par l'atténuation du phénomène d'ICU grâce au processus d'évaporation, et qui correspond à la problématique fondamentale de cette étude.

2.2. Principe

Selon Li [17], quand le pavé rafraîchissant posé sur le sol est exposé au rayonnement solaire et au vent, une partie de ce rayonnement est réfléchi par sa surface, alors que l'autre partie est absorbée par ce pavé. Quatre phénomènes principaux sont présents (Figure I.2) :

- La conduction avec le sol,
- La convection avec l'air,
- Le rayonnement infrarouge (à ondes longues),
- L'évaporation de l'eau.

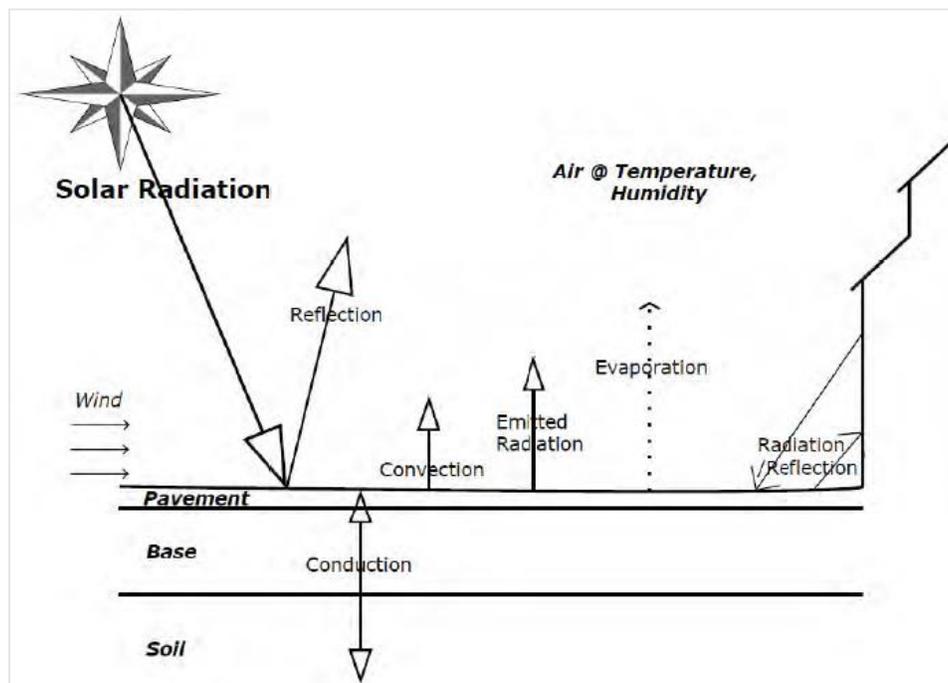


Figure I.2. Phénomènes produits sur le pavé rafraîchissant [17]

Qin et Hiller [18] ont utilisé le même bilan énergétique proposé par [17] dans leur modélisation, exprimé par l'équation suivante :

$$(1 - R) I = G + H + L + E \quad 1.1$$

Où,

- *R est l'albédo de la surface du pavé ; autrement dit, c'est le rapport entre l'énergie solaire réfléchie et l'énergie solaire incidente. Par conséquent, le terme $(1 - R)I$, exprimé en $[W/m^2]$, représente l'énergie absorbée par le pavé,*
- *G, H, L et E représentent les flux de conduction, de convection, de rayonnement infrarouge et d'évaporation respectivement, et sont également exprimés en $[W/m^2]$.*

Les auteurs ont supposé que le transfert de chaleur entre la surface du pavé et les couches sous-jacentes, se traduit par un transfert unidimensionnel et transitoire dans un corps semi-infini, sans source de chaleur, et qui obéit à l'équation générale de conduction de la chaleur dans un corps homogène, équation de transfert de la température (1.2) :

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad 1.2$$

où c $[J/kg]$, ρ $[kg/m^3]$, T $[K]$ et k $[W/(m.K)]$ représentent la chaleur spécifique, la masse volumique, la température et la conductivité thermique du pavé respectivement.

Afin de résoudre l'équation (1.2), les expressions des flux ont été définies comme suit :

$$G = k \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} \quad 1.3$$

où z est la coordonnée verticale $[m]$ prise de la surface du pavé dans le sens positif vers le bas.

$$H = h_c (T_s - T_a) \quad 1.4$$

où h_c $[W/(m^2.K)]$ est le coefficient de convection qui peut être estimé comme suit :

$$h_c = 5.6 + 4 v \quad 1.5$$

avec v $[m/s]$ représente la vitesse du vent mesurée à une hauteur de 9 m de la surface.

T_s et T_a $[K]$ désignent les températures de surface et d'air respectivement.

$$L = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sky}^4) \quad 1.6$$

où ε est l'émissivité de la surface, σ la constante de Stefan-Boltzmann qui vaut 5.67×10^{-8} $[W.(m^2.K^4)]$, et T_{sky} $[K]$ représente la température du ciel donnée par :

$$T_{sky} = \varepsilon_{sky}^{0.25} \cdot T_a \quad 1.7$$

où ε_{sky} est l'émissivité du ciel :

$$\varepsilon_{sky} = 0.754 + (0.0044 b_0 \gamma)/(a_0 - \gamma) \quad 1.8$$

avec $a_0 = 17.3$, $b_0 = 237.7$, $\gamma = \frac{a_0 T_a}{b_0 + T_a} + \ln\left(\frac{RH}{100}\right)$, T_a en [°C], et RH représente l'humidité relative en [%].

En se basant sur le bilan énergétique de Li [17] et les équations de Qin et Hiller [18], il peut être constaté que pour atténuer le phénomène d'ICU, autrement dit, pour diminuer la température de l'air, il faut, en premier temps, réduire le plus possible les flux de convection et de rayonnement infrarouge (sortants de la surface du pavé et dirigés vers l'air environnant). Selon les équations (1.4) et (1.6), la réduction de ces flux peut être réalisée en diminuant ou en limitant l'augmentation de la température de surface du pavé « T_s ».

2.3. Approches de réduction de la température de surface

Si l'on veut réduire ou limiter l'augmentation de la température de surface d'un pavé, il faut :

- Diminuer l'absorption du rayonnement solaire en augmentant l'albédo
- Augmenter la conduction en améliorant la conductivité thermique des pavés
- Favoriser l'évaporation

2.3.1. Diminuer l'absorption du rayonnement solaire en augmentant l'albédo

L'albédo représente la fraction d'énergie solaire réfléchiée par une surface [17]. Un pavé ayant une valeur importante d'albédo, permet de réduire le flux solaire absorbé par sa surface, et par suite de diminuer la température de cette dernière.

Cette approche a été vérifiée par Kinouchi et al. [19], lors de l'étude de l'efficacité à réduire la température d'un pavé, de l'application de couches de peinture à fort albédo sur la surface d'un pavé en asphalte conventionnel. Des mesures à l'extérieur pendant cinq jours d'été ont été réalisées. Les couches de peinture de différents types ont été conçues pour fournir une haute réflectivité dans le rayonnement proche infrarouge et une faible réflectivité dans le visible. Il a été observé que l'albédo de la surface augmente avec l'augmentation de sa luminance, et que cela contribue ainsi à la diminution de la température de surface maximale du pavé. Ainsi, le pavé recouvert par une couche de peinture peut avoir une température de surface maximale inférieure de 15°C par rapport à celle du pavé conventionnel par un jour d'été clair et ensoleillé.

De même, Karasawa et al. [20] ont comparé les températures de surface de 12 pavés "piora" en béton, secs, imperméables, de même nature mais de couleurs différentes, exposés aux conditions extérieures pour un jour d'été. Ils ont remarqué que la température de surface diminue avec l'augmentation de la luminance ou l'albédo de cette dernière. Ainsi, une surface de

pavé « priora » de couleur blanche peut avoir une température inférieure de 5,1°C par rapport à une surface de couleur noire.

Synnefa et al. [21] ont étudié l'effet de l'albédo sur la performance thermique de dix prototypes de revêtement formés par des pigments réfléchissants du rayonnement solaire proche infrarouge, par rapport aux revêtements conventionnels ayant des couleurs équivalentes. Les revêtements ont été appliqués sur les surfaces des pavés en béton placés sur une plateforme horizontale à l'extérieur, et leurs températures de surface ont été mesurées pendant cinq mois, d'août à décembre. Tous les revêtements contenant des pigments réfléchissants ont des valeurs d'albédo supérieures à celles des revêtements conventionnels. En effet, l'écart dans la valeur d'albédo pour une même couleur de revêtement peut varier entre 2% et 22%. De plus, les revêtements ayant des valeurs plus élevées d'albédo ont permis d'observer des températures de surface moyenne et maximale plus basses pendant toute la durée de l'expérience. A titre d'exemple, pendant un jour d'Août, une différence de température de surface maximale entre le revêtement réfléchissant et le conventionnel peut varier entre 1,6°C pour la couleur verte et 10,2°C pour la couleur noire. Pendant ce jour et pour le revêtement de couleur noire, la température de surface maximale du revêtement conventionnel était de 77,1°C alors que celle du revêtement réfléchissant valait seulement 66,9°C.

Dans le même contexte, Li et al. [22] ont mesuré la température de surface et l'albédo de neuf pavés secs distincts : trois pavés en béton "priora", trois en asphalte et trois en bétons traditionnels. Pour chaque type de pavé, un pavé imperméable et deux perméables (dont la conductivité hydraulique peut varier entre 0,1 cm/s et 0,5 cm/s environ) ont été étudiés. L'expérience, qui s'est déroulée dans les conditions sèches d'un jour d'été, a abouti à deux conclusions :

- L'augmentation de l'albédo du pavé diminue sa température de surface maximale. Par exemple, quand l'albédo du pavé en béton s'accroît de 0,18 à 0,29, sa température de surface décroît de 59°C à 44°C, et lorsque l'albédo du pavé en asphalte augmente de 0,08 à 0,09, sa température de surface diminue de 66°C à 61°C. De plus, la température de surface du pavé "priora" se réduit de 52°C à 49°C à mesure que son albédo s'élève de 0,25 à 0,28.
- L'albédo d'un pavé imperméable est toujours supérieur à celui d'un pavé perméable. Par exemple, la valeur de l'albédo est de 0,29, 0,09 et 0,28 pour les pavés imperméables en béton, en asphalte et "priora" respectivement, alors que cette valeur est de l'ordre 0,18-0,26, 0,08 et 0,25-0,28 pour les pavés perméables en béton, en asphalte et "priora" respectivement. Selon les auteurs, cette différence des valeurs d'albédo est due au fait que les pores à la surface d'un pavé perméable constituent des zones sombres qui ont tendance à absorber plus de chaleur.

Pisello et al. [23] ont étudié les valeurs d'albédo des couvertures en gravier naturel couramment employées dans les applications comme les toits, et des pavés réfléchissants, à travers des mesures in-situ et au laboratoire. Ils ont évalué la variation de l'albédo en fonction de la taille des granulats de gravier, et l'effet de cette variation sur la température de surface de la couverture. Quatre couvertures formées chacune par une taille appropriée de granulats de gravier naturel de même type, et une autre couverture constituée par un gravier mixte couramment utilisé dans les travaux de pavage, ont été testées. Les mesures in-situ ont été réalisées sur le toit plat d'un bâtiment de Septembre à Novembre 2013 pour 4 ou 5 jours par mois. Pour les expériences au laboratoire et in-situ, il a été trouvé que l'albédo diminue de 62% à 38% avec l'augmentation de la taille des granulats de même type de 0-4 mm à 8-22,4 mm. L'albédo diminue également de 50% à 27% en remplaçant le gravier naturel par le gravier mixte ayant une couleur relativement plus sombre pour la même taille des particules. De plus, l'expérience réalisée à l'extérieur a montré que les variations temporelles de la température de surface des couvertures diminuent avec l'augmentation de leurs albédos.

Finalement, à travers une approche analytique destinée à prédire la température d'un pavé en asphalte et sa validation expérimentale par des mesures in-situ, Chen et al. [24] ont montré que la température à n'importe quelle profondeur du pavé peut diminuer de manière linéaire en fonction de son albédo croissant. Ainsi, une augmentation de l'albédo de 0,1 peut diminuer la température de surface maximale d'environ 3,3°C.

2.3.2. Augmenter la conduction en améliorant la conductivité thermique des pavés

La conductivité thermique d'un matériau exprime sa vitesse à transmettre la chaleur sous un gradient de température [17]. Un pavé ayant une conductivité élevée, peut donc transférer le flux de chaleur absorbé par sa surface (interface plus chaude), d'une manière plus rapide, vers ses couches sous-jacentes (interfaces plus froides).

Pour mettre en évidence cette approche, plusieurs études portant sur la relation entre la conductivité thermique du pavé et sa température de surface ont été réalisées.

Wang et al. [25], à travers leur étude numérique, ont tenté de vérifier l'effet de la conductivité thermique sur la réponse thermique d'un pavé en asphalte collecteur de chaleur, formé de trois couches, exposé au rayonnement pendant 8 h et à l'abri de l'effet du vent. Dans ce pavé, les couches supérieure et intermédiaire sont thermo-conductrices (leurs conductivités peuvent prendre les valeurs 1,3, 1,7, 2,1, 2,5 et 3,0 W/(m.°C)), alors que la couche inférieure est constituée d'un asphalte conventionnel ayant une conductivité fixée à 1,3 W/(m.°C). Des tuyaux d'eau ont été posés au milieu de la couche intermédiaire pour absorber le flux conductif. Les auteurs ont constaté que les températures maximales à l'intérieur du pavé diminuent avec la profondeur. De plus, la température de surface du pavé diminue à mesure que la conductivité thermique des

couches thermo-conductrices augmente. La température de surface maximale en ($^{\circ}\text{C}$) peut être diminuée de 8,8% et celle de la couche intermédiaire peut être augmentée de 13,01% quand la conductivité thermique des couches thermo-conductrices passe de 1,3 à 3,0 W/(m. $^{\circ}\text{C}$). Par conséquent, un matériau de conductivité élevée peut simultanément réduire la température maximale à sa surface, et augmenter celle au milieu de la couche intermédiaire où se trouvent les tuyaux collecteurs de chaleur.

Dans une expérience similaire à l'étude précédente, Wang et al. [26] ont aussi proposé une nouvelle structure de pavé en asphalte à transfert de chaleur unidirectionnel conçue pour atténuer le phénomène d'ICU à travers son effet d'auto-refroidissement (effet démontré par la comparaison des températures de surface et des températures internes des échantillons préparés). Ces échantillons formés chacun de trois couches, ont été divisés en deux groupes: un groupe expérimental avec des poudres conductrices et un autre conventionnel, ou témoin, sans poudres conductrices. La couche supérieure du groupe expérimental contient 10% (en masse) de poudres d'oxyde d'aluminium, alors que les couches intermédiaires et inférieures de ce groupe renferment 15% de poudres de graphite. Les deux poudres employées sont caractérisées par leurs hautes conductivités thermiques de valeur 129 W/(m.K) pour la poudre de graphite et 33 W/(m.K) pour celle d'oxyde d'aluminium. Ces valeurs relativement élevées rendent les couches du groupe expérimental plus conductrices que celles du groupe témoin. Les conductivités thermiques des couches supérieure, intermédiaire et inférieure sont représentées par k_1 , k_2 et k_3 respectivement, avec $k_1 < k_2 < k_3$. La chaleur selon les auteurs aura donc tendance à se transférer de la couche supérieure vers la couche inférieure. Lors de l'essai à l'intérieur, les échantillons bien isolés latéralement, ont été exposés à un processus de chauffage qui reproduit l'ensoleillement pendant la journée puis à un processus de restitution de chaleur qui représente la période nocturne. D'autres échantillons similaires ont été soumis aux conditions atmosphériques extérieures pendant trois jours d'été consécutifs. Les résultats d'équilibre thermique de chauffage à l'intérieur ont montré que les échantillons du groupe expérimental ont pu diminuer la température mesurée à 1 cm de profondeur de la surface de 50,8 $^{\circ}\text{C}$ à 44,6 $^{\circ}\text{C}$ (diminution de 6,2 $^{\circ}\text{C}$) par rapport aux échantillons témoins. De plus, les résultats d'équilibre thermique de restitution de chaleur à l'intérieur ont révélé une diminution de la température de surface de 40,1 $^{\circ}\text{C}$ à 38,8 $^{\circ}\text{C}$ (diminution de 1,3 $^{\circ}\text{C}$) en passant des échantillons témoins aux échantillons expérimentaux. Enfin, en comparant avec les échantillons conventionnels, les échantillons à transfert de chaleur unidirectionnel ont pu également réduire les températures de surface maximales de 3,4 $^{\circ}\text{C}$ dans la journée et de 1,2 $^{\circ}\text{C}$ dans la nuit, pendant l'essai à l'extérieur.

L'étude de Chen et al. [24] mentionnée antérieurement, a révélé que la température de surface maximale diminue linéairement avec l'augmentation de la conductivité thermique du pavé de 1 à 2 W/(m.K).

Shi et al. [27] ont étudié l'effet d'incorporation d'additifs non traditionnels, comme les billes de polypropylène expansé et la poudre de graphite, sur la température de surface d'un pavé en béton bitumineux. Les billes de polypropylène expansé utilisées ont un diamètre moyen de 3,3 mm, contiennent des micropores et se caractérisent par une faible conductivité thermique, alors que la poudre de graphite de diamètre moyen de 44 μm possède une haute conductivité thermique d'ordre 68-72 W/(m.K). Les pavés étudiés ont été formés par un liant bitumineux, de granulats grossiers, de granulats fins et de ciment. Cette étude a été divisée en deux parties, une partie expérimentale visant à étudier l'effet d'incorporation des additifs mentionnés sur les propriétés thermiques du pavé, comme la conductivité et la capacité thermique, et une partie numérique consacrée à évaluer l'effet de ces propriétés thermiques sur la variation de la température de surface du pavé. Dans la partie expérimentale, et pour les pavés contenant des billes de polypropylène, ces billes ont remplacé 20, 60 ou 100% en volume des granulats de taille 2,38 - 4,76 mm, ce qui correspond à 3,7, 11,1 ou 18,5% du volume total du mélange respectivement. Pour les pavés modifiés par la poudre de graphite, les fractions massiques ont été de 10, 15, 20, 25, 30, 35 et 40% de la masse du ciment, équivalentes respectivement à 1,2, 1,8, 2,4, 3,0, 3,6, 4,2 et 4,8% du volume total du mélange. La conductivité thermique, ainsi que la capacité thermique, diminuent avec l'augmentation de la quantité des billes de polypropylène. La diminution dans la conductivité thermique peut atteindre 32% par rapport à celle de l'échantillon de référence (sans addition) après une substitution de 18,5% de billes. En revanche, la conductivité thermique augmente avec le pourcentage de la poudre de graphite. Cette augmentation atteint 43% entre un échantillon de référence et un autre contenant 4,8% de poudre. Cependant, la variation de la capacité thermique n'a montré aucune tendance évidente avec la quantité introduite de la poudre de graphite. Dans la partie numérique de ces travaux, les données climatiques, ainsi que le modèle, ont été basés sur des études antérieures. Les résultats de la simulation correspondent à un jour d'équilibre thermique, pour lequel la variation de la température de surface entre deux jours consécutifs est limitée à 1%. Les résultats de cette partie ont montré que pendant le jour d'été, l'addition de 18,5% de billes de polypropylène expansé augmente la température de surface maximale du pavé de 2,5°C, alors que l'ajout de 4,8% de la poudre de graphite diminue cette température de 1,5°C. De plus, à travers une analyse paramétrique, les auteurs ont mis en évidence le fait que la conductivité thermique et la capacité thermique ont des effets très similaires sur la température de surface. Cette étude a donc de nouveau montré, que l'augmentation de la conductivité thermique du pavé peut diminuer sa température de surface maximale.

Finalement, Chen et al. [28] ont testé la température de surface d'un pavé perméable contenant des fibres d'acier. Dans cet objectif, ils ont préparé quatre pavés en béton : un imperméable, un perméable sans fibres d'acier, et deux autres perméables contenant 1,0% et 1,5% (en volume) de fibres d'acier. Avant de commencer leur expérience, les auteurs ont remarqué que la conductivité thermique a augmenté significativement dans les pavés perméables contenant des

fibres d'acier (0,72 et 0,84 W/(m.K) pour les pavés contenant 1,0% et 1,5% de fibres, respectivement) par rapport au pavé perméable sans fibres (0,59 W/(m.K)), alors que l'albédo était presque le même pour tous les pavés étudiés. Dans l'expérience, les pavés isolés latéralement ont été exposés au rayonnement des lampes thermiques placées au-dessus de leurs surfaces nues pendant 6 heures. Les résultats de cette expérience réalisée à l'intérieur, ainsi que ceux de la simulation numérique, ont révélé qu'après l'addition de 1,5% de fibres d'acier, la température de surface maximale du pavé perméable diminue expérimentalement de 66,9°C à 63,9°C, et de 67,0°C à 64,5°C par simulation. Cependant, il faut mentionner que, dans les conditions sèches, la température de surface maximale du pavé imperméable est toujours inférieure à celle des pavés perméables, et cela est dû à sa conductivité thermique relativement plus élevée (1,42 W/(m.K)). Cette étude a donc montré, que l'introduction d'une certaine quantité de fibres d'acier dans un pavé perméable peut augmenter sa conductivité thermique, et par suite réduire sa température de surface maximale pendant le jour.

2.3.3. Favoriser l'évaporation

En observant le bilan énergétique de la Figure I.2, on remarque qu'une augmentation de la valeur du flux d'évaporation peut substituer une partie de la convection et du rayonnement infrarouge, les deux phénomènes de transfert provoquant une élévation de la température ambiante. De plus, pendant le processus d'évaporation, on observe un phénomène endothermique, la vapeur d'eau monte dans l'atmosphère en absorbant l'énergie solaire et en créant par suite un effet de refroidissement.

Dans cette optique, Li et al. [29] ont étudié la variation de la température de surface de six échantillons perméables (les nombres entre parenthèses représentent la taille maximale des granulats employée dans chaque échantillon) : un en asphalte B3 (9,5 mm), deux en béton C2 (4,75 mm) et C3 (9,5 mm), deux en gravier S1 (19 mm) et S2 (12,5 mm), et un en sable S3 (9,5 mm). S0, qui désigne la surface de l'eau nue, a été prise comme référence. L'expérience a été réalisée à l'extérieur pendant trois jours estivaux après irrigation (de 9 à 11 juillet 2012). Les trois jours d'exposition ont été caractérisés par des conditions climatiques presque identiques, avec un rayonnement solaire maximal proche de 1000 W/m² et une température maximale de l'air variant entre 36°C et 39°C. Les échantillons ont été placés dans des cylindres à bases fermées, cylindres qui ont été remplis d'eau jusqu'à atteindre les surfaces nues des échantillons. La diminution de masse a été enregistrée et utilisée pour calculer le taux d'évaporation, comme suit :

$$ER = \frac{(m_{t1} - m_{t2})}{A(t_2 - t_1)} \quad 1.9$$

Où,

ER est le taux d'évaporation en $[kg/(m^2.h)]$ ou $[mm/h]$,

m_{t_1} et m_{t_2} représentent les masses totales en $[kg]$ aux instants t_1 et t_2 $[h]$, respectivement,

A est la surface exposée $[m^2]$

Les résultats de cette étude ont montré que la température de surface diminue à mesure que le taux d'évaporation augmente, comme le montre Figure I.3 et Figure I.4. En fait, le sable (S3) qui a le plus grand taux d'évaporation moyen (1 mm/h), engendre la plus faible température de surface. En revanche, l'asphalte (B3) qui possède un taux d'évaporation moyen négligeable, conduit à la plus grande température de surface.

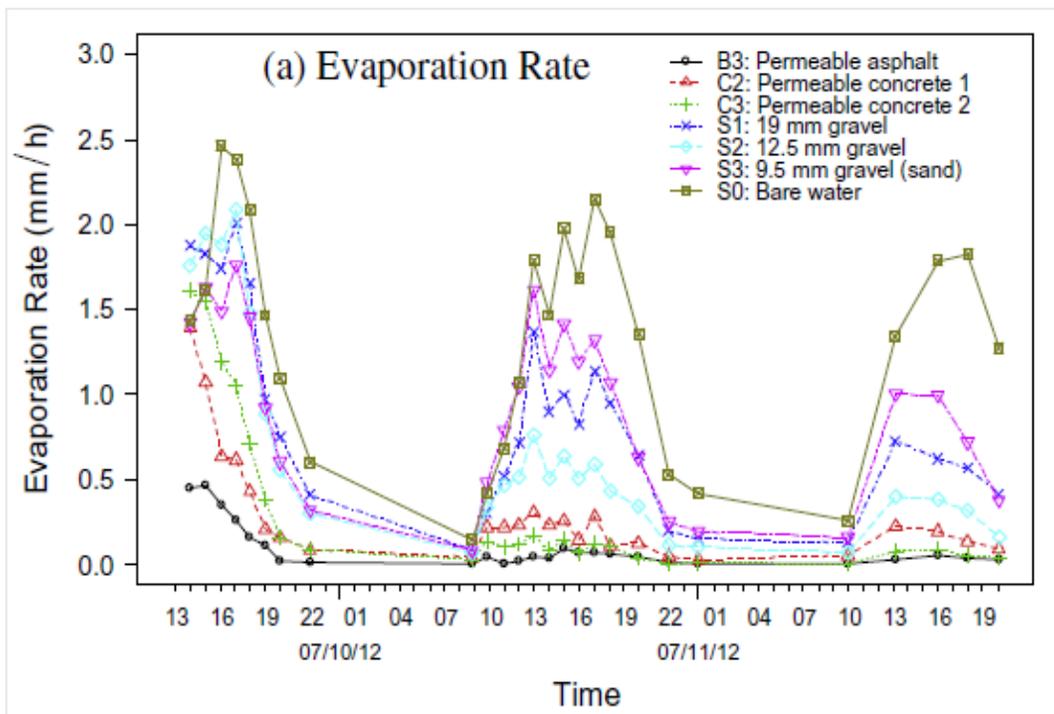


Figure I.3. Variation du taux d'évaporation des échantillons en fonction du temps [29]

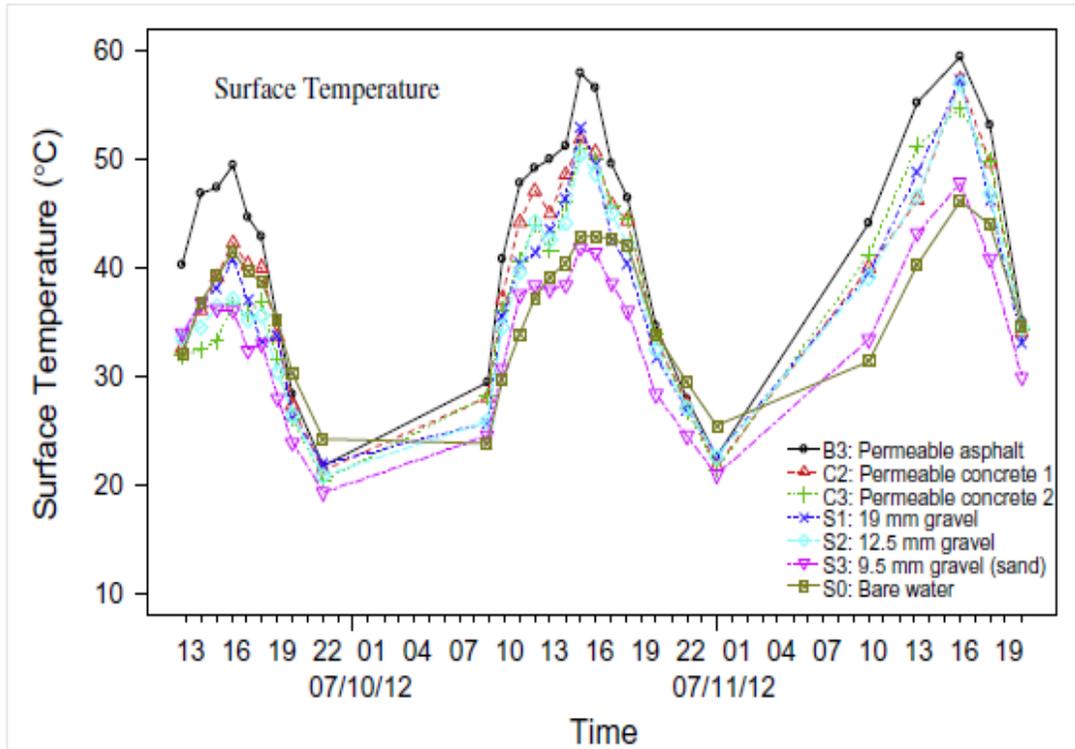


Figure I.4. Variation de la température de surface des échantillons en fonction du temps [29]

Karasawa et al. [20] ont mesuré la température de surface de 18 pavés, dont 15 sont en béton retenant l'eau, deux "priora" en béton (un imperméable et un perméable), et un pavé en asphalt dense (imperméable). Les pavés retenant l'eau dans cette expérience se caractérisent par une capacité de rétention d'eau supérieure à 0.15 g/cm^3 et une hauteur d'absorption d'eau dépassant 70% en 30 minutes. Ces deux caractéristiques ont été évaluées à travers l'essai d'absorption capillaire. Cet essai consiste à placer le pavé préalablement sec sur un lit d'eau, puis surveiller la variation de sa masse qui correspond à la masse d'eau absorbée par sa base. La Figure I.5 illustre la variation de la température de surface des pavés exposés aux conditions extérieures estivales, en fonction du taux d'évaporation mesuré le jour après irrigation des pavés. Cette figure montre que la température de surface a une tendance à diminuer avec l'augmentation du taux d'évaporation. Par exemple, l'asphalte, qui a le plus faible taux d'évaporation, produit la plus grande température de surface, alors que les pavés retenant l'eau ayant le taux d'évaporation moyen le plus élevé, engendrent la plus basse température de surface moyenne.

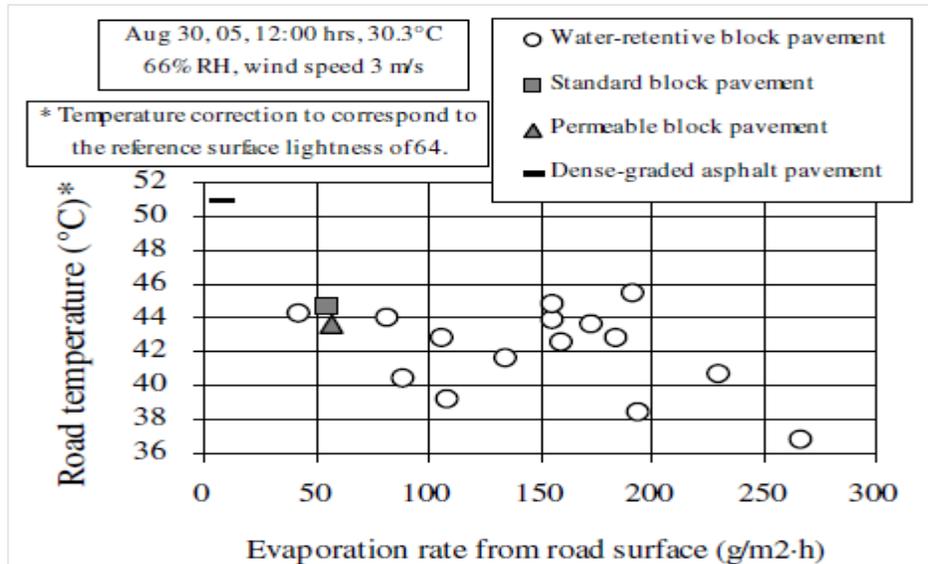


Figure I.5. Variation de la température de surface en fonction du taux d'évaporation [20]

Ces études montrent que pour atténuer le phénomène d'ICU à travers la réduction de la température de surface du pavé rafraîchissant, il faut augmenter son albédo par la mise en place de matériaux ou de revêtements de couleur claire, améliorer sa conductivité thermique en ajoutant, par exemple, un certain pourcentage de fibres d'aciers ou de poudres conductrices, et enfin, favoriser l'évaporation de l'eau retenue par le pavé.

Pour étudier plus spécifiquement ce dernier point, la section suivante va traiter les différents facteurs responsables du phénomène d'évaporation. Les études utilisées dans la section 2.3 portant sur les approches contribuant à atténuer le phénomène d'ICU à travers le bilan énergétique dans les pavés rafraîchissants sont résumées dans l'annexe 1.

3. Facteurs favorisant l'évaporation

Ces facteurs peuvent être classés en trois groupes comme suit :

- Facteurs climatiques
- Irrigation
- Propriétés physiques du pavé

3.1. Facteurs climatiques

Zhang et al. [30] ont étudié l'impact des facteurs climatiques et, plus précisément, la température de l'air, le rayonnement solaire, la vitesse du vent, et la pression partielle de la vapeur d'eau, sur le taux d'évaporation de pavés poreux en argile. Cette étude a été basée sur la méthode des plans d'expériences pour déterminer quel facteur influe le plus sur le taux d'évaporation. Cette méthode a porté sur quatre facteurs climatiques (la température de l'air, le rayonnement solaire, la vitesse de l'air et la pression partielle de la vapeur) avec trois niveaux différents pour chaque facteur. Les niveaux ont été choisis de façon que leurs valeurs extrêmes soient égales à celles observées dans les conditions réelles. Les niveaux adoptés dans cette étude étaient (28,33 et 38°C) pour la température de l'air, (0,450 et 900 W/m²) pour le rayonnement solaire, (1, 2 et 3 m/s) pour la vitesse du vent, et finalement (1976, 2636 et 3267 Pa) pour la pression partielle de la vapeur. La méthode des plans d'expériences permet de sélectionner les combinaisons représentatives qu'il faut tester parmi toutes les combinaisons possibles, et voir leurs effets sur la variable étudiée. L'impact d'un facteur sur cette variable, est traduit par le taux d'évolution de cette variable en fonction de la variation de ce facteur d'un niveau à un autre. Dans cette étude, neuf combinaisons représentatives ont été choisies. L'expérience a été effectuée à l'intérieur d'une enceinte climatique capable de bien reproduire les conditions réelles extérieures. L'étude a montré que parmi les facteurs météorologiques cités, le rayonnement solaire a la plus grande influence positive sur l'évaporation, suivi par la température de l'air puis la vitesse du vent. En revanche, l'humidité relative, qui est directement proportionnelle à la pression partielle de la vapeur, influe négativement sur le taux d'évaporation et vient juste après la température de l'air en termes d'influence. Lorsque le rayonnement solaire monte de 0 à 900 W/m², le taux d'évaporation maximal moyen (qui correspond à 3 combinaisons représentatives) augmente de 383% (de 0,06 à 0,29 g/(m².s)). De plus, au fur et à mesure que la température de surface passe de 28°C à 38°C, ce taux s'élève de 69,2% (de 0,13 à 0,22 g/(m².s)). Le taux d'évaporation maximal moyen s'accroît légèrement de 0,15 à 0,18 g/(m².s), en augmentant la vitesse de l'air de 1 à 3 m/s. Au contraire, ce taux diminue de 0,20 à 0,15 g/(m².s) si la pression partielle de la vapeur augmente de 1967 Pa à 3267 Pa.

3.2. Irrigation

L'irrigation peut aussi simuler la précipitation, un facteur climatique non mentionné dans l'étude de Zhang et al. [30]. De plus, l'irrigation peut être exécutée directement sur des pavés existants sans besoin de modifier leurs structures ou leurs surfaces, ce qui lui confère une importance particulière parmi les différentes techniques d'atténuation du phénomène d'ICU.

Pour étudier l'influence de ce facteur sur l'évaporation, Yamagata et al. [31] ont mesuré le flux d'évaporation d'un pavé retenant l'eau pendant un jour d'été. Le pavé a été divisé en deux

sections adjacentes dans la même voie d'une rue : une section sans aucune irrigation et l'autre irriguée une ou plusieurs fois par jour, à l'aide de systèmes d'arrosage placés dans la médiane séparant les deux voies de la rue. En comparant le cas humide, qui correspond à une irrigation de 40 minutes répartie en trois périodes par jour (10 min à 8:00, 20 min à 11:00, et 10 min à 14:00), avec le cas sec (sans irrigation), les résultats ont montré qu'après irrigation le flux d'évaporation a augmenté de zéro à 1578 kJ/m² pendant la journée et à 252 kJ/m² pendant la nuit. En revanche, la quantité de chaleur sensible (convection) a diminué d'un facteur 3 pendant la journée (de 456 kJ/m² à 154 kJ/m²), et d'un facteur 4 pendant la nuit (de 62 kJ/m² à 16 kJ/m²). Cette augmentation du taux d'évaporation a contribué à abaisser la température de surface de 45,8°C à 37,8°C à 13:00, et de 31,3°C à 27,7°C à 18:00. L'irrigation des pavés retenant l'eau réduit donc la chaleur de convection et augmente la chaleur latente d'évaporation, ce qui diminue la température de surface.

Une étude similaire a été réalisée par Parison et al. [32], dans laquelle les auteurs ont cherché à déterminer le taux d'arrosage optimal pour le rafraîchissement des pavés en béton bitumineux exposés aux conditions d'une canicule parisienne. Dans ce but, un pavé en asphalte, similaire à celui employé dans les routes à l'extérieur, a été isolé sur toutes ses faces sauf sa face supérieure qui a été soumise à un rayonnement lumineux contrôlé représentant 8 heures d'insolation (période diurne) et 16 heures sans insolation (période nocturne). Le pavé a été placé dans une enceinte climatique qui peut reproduire les conditions météorologiques de chaque période du cycle climatique quotidien, pour lequel la température de l'air et l'humidité relative ont été réglées à 35°C et 35% pendant la journée, et à 25°C et 70% pendant la nuit. En plus de l'état sec (sans arrosage), douze taux d'arrosage allant de 0,1 mm/h jusqu'à 3,0 mm/h ont été testés afin de trouver le taux minimal qui peut maximiser le rafraîchissement du pavé. Il a été observé qu'au fur et à mesure que le taux d'arrosage augmente de 0,1 mm/h à 3,0 mm/h, la température de surface maximale diminue significativement de 5 et 22°C respectivement, par rapport à l'état sec, alors que le flux d'évaporation augmente de 150 W/m² jusqu'à 550 W/m². De plus, il a été remarqué qu'au-delà d'un taux d'arrosage de 0,8 mm/h, aucune variation notable n'est observée dans la température de surface ou dans le flux d'évaporation. Ainsi, d'après cette étude, 0,8 mm/h d'arrosage, qui engendre un flux d'évaporation d'environ 500 W/m² et une réduction de la température de surface de 20°C par rapport à l'état sec, représente le taux d'arrosage optimal. Ce taux correspond à la quantité d'eau maximale qui peut être évaporée dans les conditions climatiques imposées.

3.3. Propriétés physiques du pavé

Les propriétés physiques du pavé rafraîchissant qui favorisent l'évaporation résident dans la configuration interne de ce pavé. On peut classer ces propriétés comme suit :

- la porosité et la perméabilité,
- la capacité de rétention d'eau,
- les capacités capillaires,
- la texture et la taille des particules.

3.3.1. Porosité et Perméabilité

La porosité, représente la fraction ou le pourcentage de vides dans le pavé, et la perméabilité expriment l'aptitude du pavé à se laisser traverser par l'eau sous un gradient de pression.

Sriravindrarah et al. [33] ont réalisé une expérience pour évaluer l'effet de la porosité et de la perméabilité sur le taux d'évaporation de douze pavés perméables en béton. Dans un premier temps, ils ont mesuré la porosité et la perméabilité de 12 pavés, et ils ont trouvé que ces deux propriétés évoluent toujours selon la même tendance. En effet, au fur et à mesure que la porosité varie entre 12,3% et 22,1%, la perméabilité fluctue entre 3,5 mm/s et 11,8 mm/s respectivement. Dans un second temps et en considérant trois pavés différents, ils ont trouvé qu'après un séchage contrôlé à 20°C pendant 48 heures, le pavé ayant une porosité de 22,1% a perdu 63% de l'eau évaporable, alors que le pavé ayant 12,3% de porosité n'a perdu que 45% de l'eau évaporable. Le pavé à 16,2% de porosité a généré une perte d'eau par évaporation comprise entre 45% et 63%. Les auteurs ont conclu que le taux d'évaporation ou de séchage augmente avec l'augmentation de la porosité du pavé qui est positivement corrélée à sa perméabilité.

Li et al. [29], mentionnés antérieurement, ont mesuré le taux d'évaporation moyen pendant trois jours d'été après la saturation des pavés. Leurs résultats ont montré qu'à l'exception du sable, le taux d'évaporation moyen pendant ces trois jours d'exposition augmente avec la perméabilité (Figure I.6a) et avec la porosité (Figure I.6b). Selon les auteurs, ces résultats sont dus au fait qu'une petite porosité et une faible perméabilité ont tendance à sceller l'humidité à l'intérieur des matériaux et par suite bloquer l'évaporation. De plus, le sable (S3), bien qu'il ait une faible porosité de l'ordre de 15% et une perméabilité relativement négligeable d'environ 5×10^{-3} cm/s, engendre le plus grand taux d'évaporation moyen de l'ordre de 1 mm/h. Ceci peut être relié au diamètre des pores qui est inférieur à celui des autres pavés. Ce diamètre des pores relativement faible permet d'accélérer la remontée d'eau de la base vers la surface, favorisant ainsi l'évaporation de l'eau.

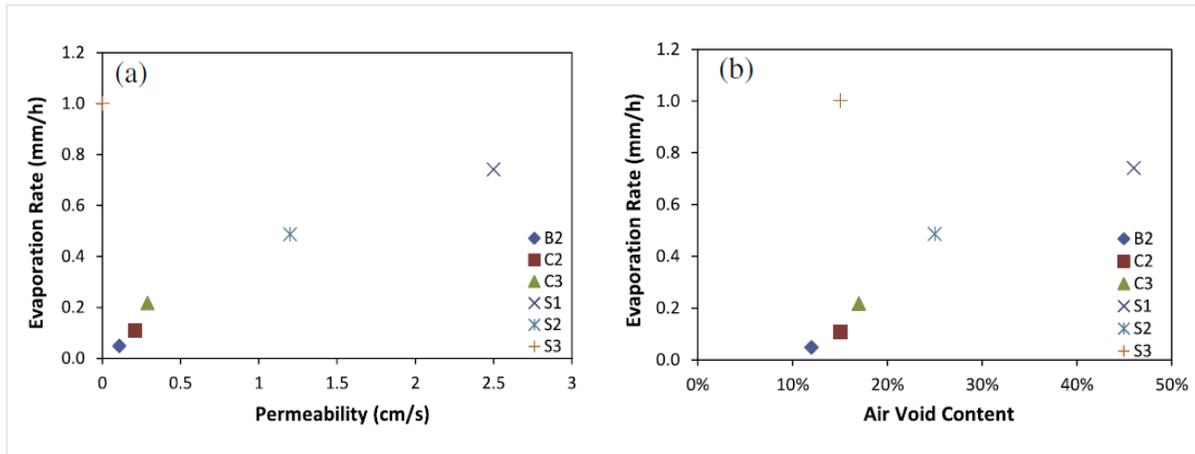


Figure I.6. Taux d'évaporation moyen pendant trois jours d'exposition à l'extérieur [29]. (a) en fonction de la perméabilité, et (b) en fonction de la porosité

3.3.2. Capacité de rétention d'eau

Dans l'expérience réalisée par [29] et mentionnée dans le paragraphe précédent, les auteurs ont remarqué que pour les échantillons en asphalté (B3) et en béton (C2 et C3), le taux d'évaporation tend vers zéro quand l'eau descend à un niveau de 20 mm mesuré à partir de la surface de l'échantillon d'épaisseur 150 mm (Figure I.7a). De plus, pour les échantillons en graviers (S1 et S2) et en sable (S3), le taux d'évaporation devient négligeable quand le niveau d'eau est inférieur à une profondeur de 100 mm mesurée de la surface (Figure I.7b). Cette expérience a montré que le taux d'évaporation diminue significativement avec la descente du niveau d'eau dans le pavé, autrement dit, c'est l'eau proche de la surface qui contrôle l'évaporation.

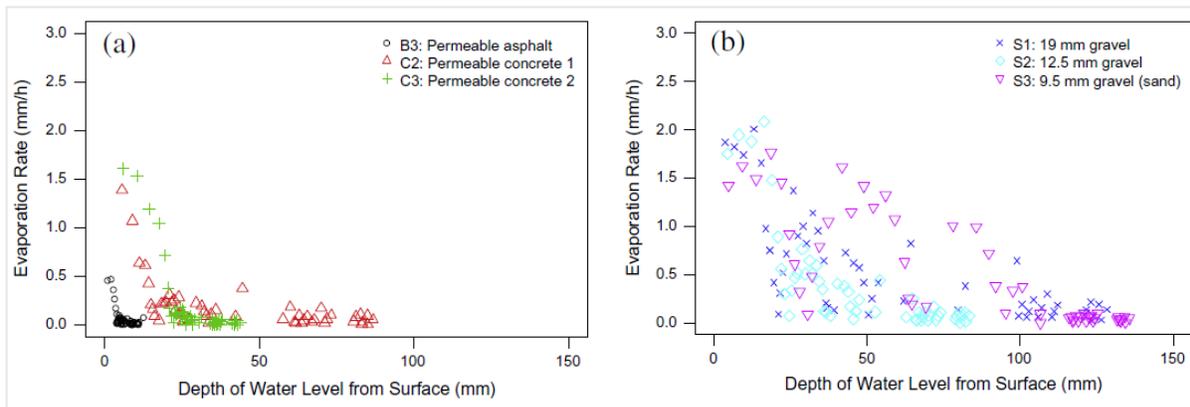


Figure I.7. Variation du taux d'évaporation moyen pendant trois jours d'exposition à l'extérieur en fonction de la profondeur du niveau d'eau [29]. (a) pour l'asphalte et le béton, et (b) pour le gravier et le sable

Qin et Hiller [18], à travers leur modèle déjà mentionné dans la section du bilan énergétique (section 2.2), ont calculé le flux d'évaporation d'un pavé perméable en béton pendant dix jours d'été après une irrigation jusqu'à saturation. Leur modèle a montré que pour un pavé à base drainée, pendant 12 heures après l'irrigation effectuée à midi le 1^{er} juillet, la teneur en eau diminue de 100% à 70%. Cette diminution entraîne une forte réduction du flux d'évaporation qui décroît de 500 à 30 W/m², qui correspond à une diminution d'environ 94% de sa valeur initiale. De plus, après un jour suivant la date d'irrigation (soit entre le 2 juillet et le 3 juillet), ce flux peut fluctuer entre 20 et 50 W/m². Après deux jours de l'irrigation, il devient de nouveau inférieur à 30 W/m², une valeur considérée négligeable par rapport à la valeur initiale (500 W/m²) (Figure I.8). Il a été déduit de cette étude qu'une faible diminution de la teneur en eau provoque une forte réduction du flux d'évaporation, autrement dit, la teneur en eau surfacique contrôle l'évaporation.

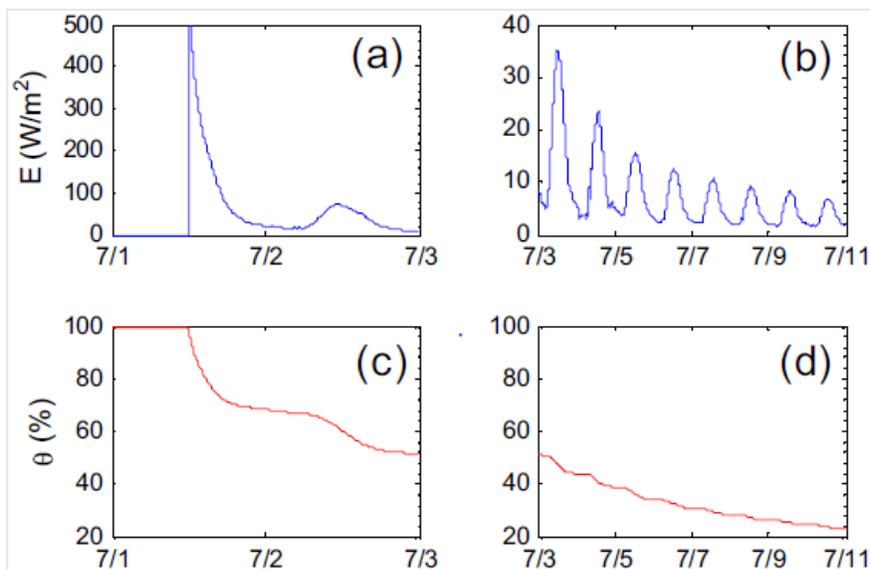


Figure I.8. Variation du flux d'évaporation (E) en fonction de la teneur en eau (ϑ) de 1 Juillet à 11 Juillet [18]

Bao et al. [34] ont étudié la variation de la température et de la perméabilité de trois pavés en béton (Figure I.9) : un dense (imperméable), un perméable drainant et un pavé retenant l'eau à tubes drainants. Ce pavé contient cinq tubes drainants verticaux, un placé au centre et les autres aux coins, il est similaire au pavé perméable drainant, mais ses faces latérales et sa face inférieure sont scellées par du mortier imperméable. Les deux pavés perméables ont une porosité de l'ordre de 0,25. Les tubes drainants sont caractérisés par une paroi latérale imperméable et par une tête et un pied ouverts. Les têtes de ces tubes sont situées à 1 cm au-dessous de la surface du pavé pour éviter leur colmatage, et leurs pieds non scellés permettent à l'eau de s'infiltrer à travers les tubes quand le niveau d'eau dépasse celui des têtes. Cependant, les auteurs n'ont pas

mentionné le diamètre intérieur des tubes drainants. Ils ont remarqué que juste après l'irrigation, le pavé à tubes drainants retient la plus grande quantité d'eau (7,54 kg) qui représente 42% de la masse totale d'eau versée, alors que les pavés perméable et dense retiennent des masses d'eau beaucoup plus faibles de l'ordre de 0,78 kg et 0,05 kg respectivement. Les résultats de la température mesurée après l'irrigation à l'aide de thermocouples installés à l'intérieur des pavés, ont montré que dans le pavé retenant l'eau, la température est significativement inférieure à celle dans les deux autres pavés, une différence maximale de 13°C a été enregistrée pendant la journée et de 3°C pendant la nuit. De plus, il a été observé que le pavé retenant l'eau engendre une perméabilité élevée de l'ordre de 1590 mm/h, une valeur qui dépasse le taux de précipitation d'une forte pluie. Cette expérience a prouvé donc que ce type des pavés peut diminuer sa propre température grâce à l'évaporation de sa grande quantité d'eau retenue, et il permet également d'atténuer le risque d'inondations à travers ses tubes drainants.

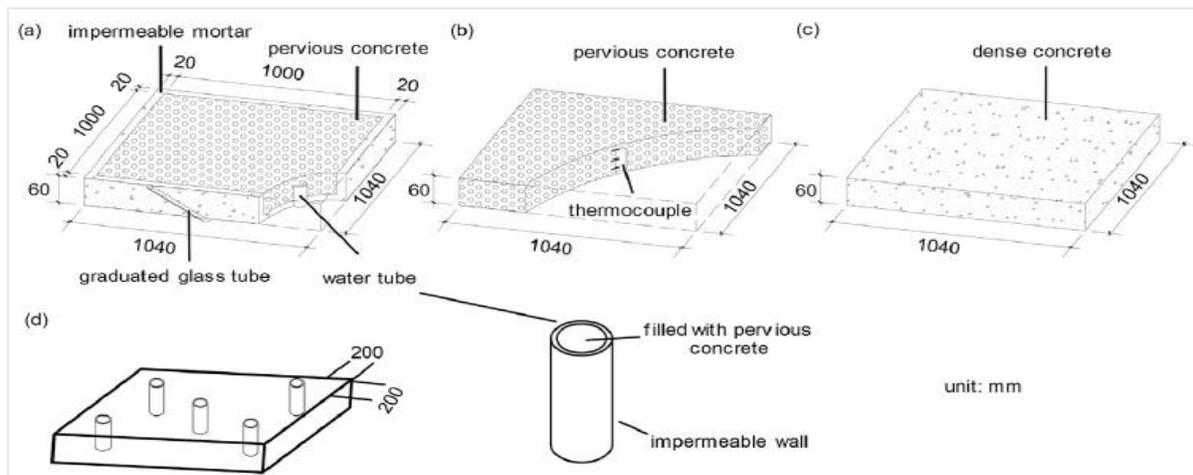


Figure 1.9. Configurations des pavés étudiés [34]. (a) pavé retenant l'eau à tubes drainants, (b) pavé perméable drainant, (c) pavé dense, et (d) positions des tubes drainants

3.3.3. Capacités capillaires

Une expérience visant à montrer les effets du coefficient d'absorption capillaire et de la teneur en eau capillaire a été réalisée par Wang et al. [35]. Ceux-ci ont mesuré le taux d'évaporation pendant trois jours d'été après irrigation de deux pavés perméables drainants : un en céramique (CB) et l'autre en béton (PC), exposés ensemble aux mêmes conditions climatiques extérieures. Tout d'abord, les auteurs ont évalué les caractéristiques de ces deux pavés à l'aide de l'essai d'absorption capillaire et ils ont trouvé que le pavé en céramique possède un coefficient d'absorption capillaire égal à $2,04 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5})$, beaucoup plus grand que celui du pavé en béton de valeur $0,01 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5})$. De plus, la teneur en eau capillaire du pavé en céramique (121,07

kg/m³) est aussi supérieure à celle du pavé en béton (101,36 kg/m³). Les résultats de cette expérience, illustrés dans la Figure I.10, montrent que l'évaporation de l'eau contenue dans le pavé en céramique dure deux jours, alors que celle du béton s'étend seulement sur une demi-journée. De plus, le flux thermique correspondant à l'évaporation du pavé en céramique, qui est d'environ 41,4% du rayonnement solaire absorbé, est supérieur à celui du pavé en béton qui vaut seulement 17,6% de ce rayonnement. La Figure I.10 indique aussi que le flux de chaleur sensible dégagée par le pavé en céramique (13,12%) est inférieur à celui du pavé en béton (29,62%). Il faut noter aussi que les pavés en céramique et en béton ont pu garder leurs températures de surface inférieures à celle d'un pavé en béton dense (pris comme référence) pour un jour et quelques heures respectivement, après la date d'irrigation. Cette expérience prouve que le coefficient d'absorption et la teneur en eau capillaire jouent un rôle essentiel dans l'augmentation du flux et de la durée d'évaporation d'une part, et dans la réduction de la chaleur sensible d'autre part.

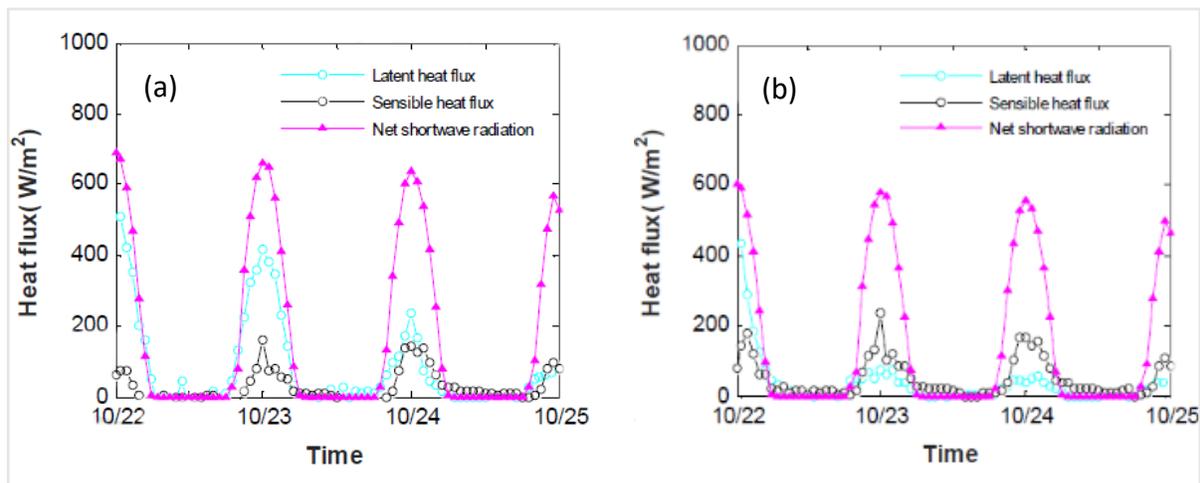


Figure I.10. Variation des flux de chaleur latente, sensible, et de rayonnement net en fonction du temps. (a) pour la céramique, et (b) pour le béton [35]

Dans une autre expérience, Liu et al. [36] ont introduit des colonnes capillaires en figuline dans les pavés perméables pour étudier l'effet de ces colonnes sur l'évaporation et sur la température de surface pendant sept jours après irrigation. La Figure I.11 illustre les deux types de pavés étudiés, à gauche un pavé perméable conventionnel (ou sans colonnes capillaires), et à droite, un pavé perméable à colonnes capillaires. La configuration de ce dernier, consiste en une couche de surface perméable formée par deux blocs identiques qui peuvent être en béton (C) ou en figuline (F), cette couche de surface est placée sur une couche de pose en sable fin. La couche de pose est supportée par une sous-base d'agrégats, dans laquelle sont introduites deux colonnes capillaires en figuline de hauteur égale à l'épaisseur de la couche de sous-base. Au fond de la

couche de sous-base, existe un tube en U pour surveiller le niveau d'eau dans le pavé, et au milieu de cette couche, se trouve un tuyau qui permet d'évacuer l'excès d'eau qui dépasse son niveau, et par suite d'éviter l'inondation à la surface. Avant de commencer leur expérience, les auteurs ont mesuré la capacité d'absorption d'eau des pavés en figuline et en béton, et ils ont trouvé que la capacité d'absorption d'eau moyenne des blocs en figuline ($0,14 \text{ g/cm}^3$) est supérieure à celle des blocs en béton ($0,07 \text{ g/cm}^3$). De plus, ils ont remarqué que les colonnes capillaires peuvent remonter l'eau absorbée de la base à la tête en 5 heures. Les échantillons étudiés comprennent deux pavés en figuline, deux en béton, et un échantillon contenant de l'eau nue (B0) pris comme référence pour mesurer le taux d'évaporation maximal. Chaque pavé (en figuline ou en béton) contenant des colonnes capillaires, représente la moyenne de trois configurations identiques. Au début de l'expérience, les échantillons ont été placés à l'extérieur sur le toit d'un bâtiment, et un volume d'eau qui correspond à la saturation a été pulvérisé sur chacun d'eux. Les résultats de cette expérience ont montré que le taux d'évaporation diurne dans le pavé à colonnes capillaires est toujours supérieur à celui observé dans le pavé conventionnel. De plus, ce taux s'étend sur sept jours dans le pavé à colonnes capillaires, alors que dans le pavé conventionnel, il dure seulement deux jours (Figure I.12a). Également, la Figure I.12b révèle qu'en comparant les pavés en béton entre eux, la température de surface du pavé à colonnes capillaires (C1) est toujours inférieure à celle du pavé conventionnel (C0), et une différence maximale de $6,7^\circ\text{C}$ a été enregistrée dans le 5^{ème} jour de l'expérience. De même, dans la Figure I.12b, pour les pavés en figuline (F), la température de surface d'un pavé perméable ordinaire (F0) est toujours supérieure à celle d'un pavé à colonnes capillaires (F1), et un écart maximal de $9,4^\circ\text{C}$ a été observé le 2^{ème} jour. Ces résultats aboutissent donc à conclure que les colonnes capillaires incorporées dans les pavés perméables augmentent le taux et la durée d'évaporation, et par suite contribuent à la réduction de la température de surface de ces pavés.

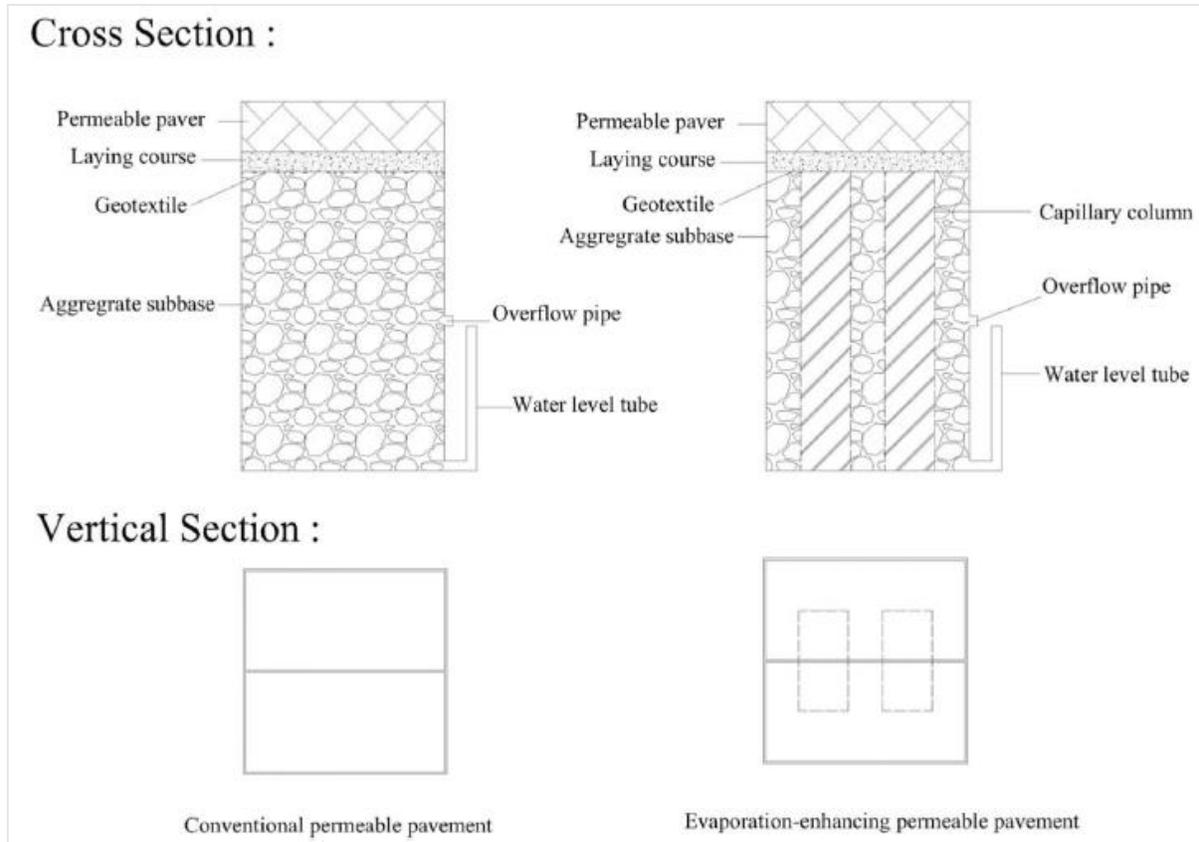


Figure I.11. Pavé perméable conventionnel (gauche) et pavé perméable à colonnes capillaires (droite) [36]

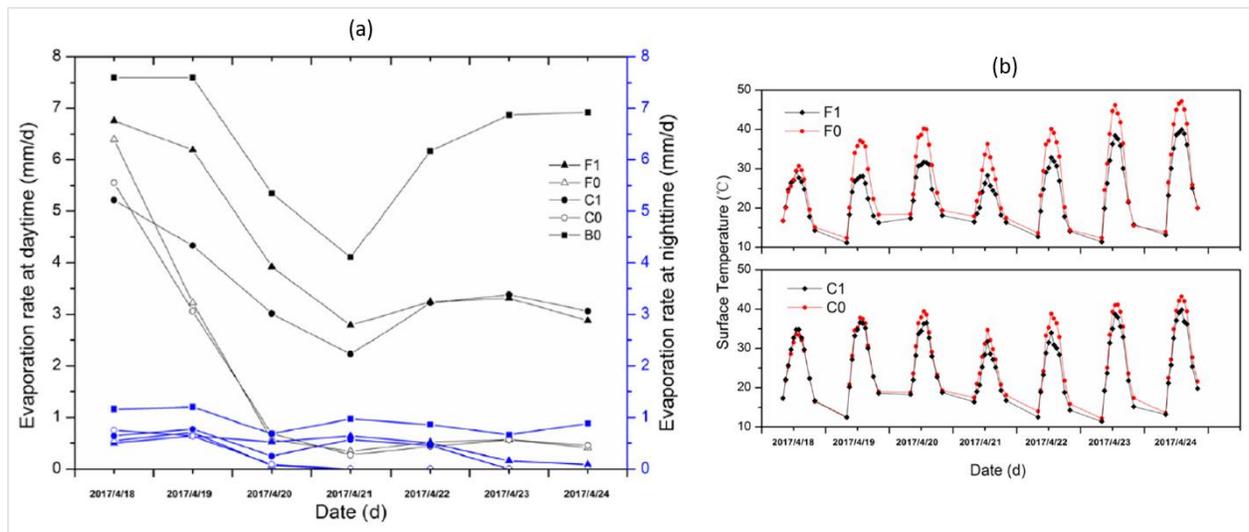


Figure I.12. (a) Variation des taux d'évaporation, et (b) Variation des températures de surface en fonction du temps [36]

3.3.4. Texture et taille des particules

Hellwig [37] a étudié l'effet de la profondeur de la nappe phréatique, mesurée depuis la surface, et de la taille des particules sur le taux d'évaporation de trois mélanges de sable de rivière placés dans des réservoirs ouverts. L'expérience a duré environ 16 mois et les mélanges étudiés correspondent à un sable grossier, moyen et fin de taille moyenne des particules de 0,53, 0,47 et 0,32 mm, respectivement. De plus, le sable fin est caractérisé par un pourcentage de l'ordre de 9% de particules fines de diamètre inférieur à 0,1 mm, alors que celui du sable grossier vaut seulement 0,7%. Les auteurs ont observé que le taux d'évaporation moyen diminue avec la chute de la nappe phréatique et avec l'augmentation de la grosseur du sable : par exemple, pour le sable fin, ce taux diminue d'environ 50% quand la profondeur de la nappe phréatique passe de 0 à 30 cm, et, pour une profondeur de 60 cm, le taux d'évaporation atteint des valeurs de 1,27 mm/jour, 0,71 mm/jour et 0,66 mm/jour pour le sable fin, moyen et grossier respectivement. De plus, il a été remarqué que le sable fin a permis d'évaporer deux fois plus d'eau que le sable grossier. Par ailleurs, les taux d'évaporation sont presque les mêmes quand la nappe phréatique est maintenue à la surface.

Dans leur étude, Wanphen et Nagano [38] ont proposé de placer sur les toitures de maisons des matériaux poreux retenant l'eau, afin de diminuer leur température de surface par évaporation, et par suite réduire la température à l'intérieur des maisons. Cet effet de rafraîchissement peut être contrôlé par le flux de conduction dirigé de la surface des matériaux vers la base du toit. Ainsi, ils ont utilisé six matériaux poreux, et pour chaque matériau placé dans l'enceinte climatique (conditions climatiques stables), ils ont mesuré leurs taux d'évaporation pendant deux jours après irrigation. Les matériaux testés sont le sable de silice, les galets, le schiste siliceux et la cendre volcanique. Le sable de silice et les galets sont des matériaux à particules non poreuses, alors que le schiste siliceux et la cendre volcanique représentent des matériaux à particules poreuses, le premier étant un matériau mésoporeux ($2 \text{ nm} \leq \text{diamètre des pores} < 50 \text{ nm}$), et le deuxième macroporeux (diamètre des pores $\geq 50 \text{ nm}$). Les résultats, illustrés par la Figure I.13, ont montré que ces matériaux peuvent être classés par ordre décroissant selon leurs taux d'évaporation exprimés en $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ comme suit : la cendre volcanique qui engendre le plus grand taux d'évaporation (environ $0,22 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$), le schiste siliceux, le sable de silice, et enfin les galets ($0,13 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$). Le taux d'évaporation de chaque matériau correspond à la pente moyenne de sa courbe représentative présentée dans la Figure I.13.

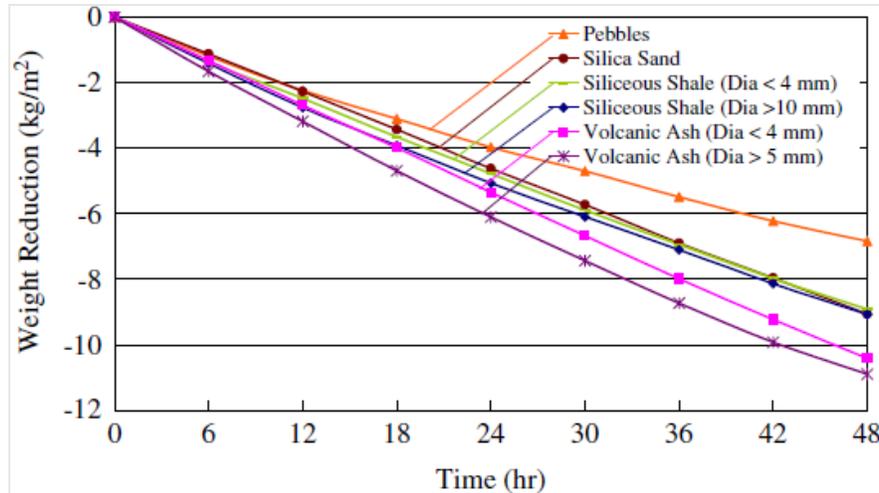


Figure I.13. Variation de la perte en masse des matériaux testés en fonction du temps [38]

Kuehni et al. [39] ont mesuré le taux d'évaporation de trois couches retenant l'eau formées par du sable de quartz de trois tailles : grossier, moyen et fin. Ces couches ont été testées afin d'évaluer leurs performances à diminuer la température de surface quand elles sont posées sur les toitures de maisons. L'expérience s'est déroulée dans une chambre climatisée dans des conditions climatiques quasi-stables pendant 15 jours après la saturation des couches. Les résultats ont montré que le taux d'évaporation du sable fin est supérieur à celui du sable moyen, qui à son tour dépasse le taux du sable grossier (Figure I.14a). De plus, la durée de la première phase d'évaporation (définie par la première pente de chaque courbe) du sable fin est plus longue que celle du sable moyen, et cette durée est la plus courte dans le cas du sable grossier (Figure I.14b). Les auteurs ont constaté que, pour le même matériau poreux, une diminution de la taille de ses particules peut améliorer la force capillaire ascendante, qui maintient la continuité hydraulique pour des hauteurs plus élevées et pour des durées plus longues, favorisant ainsi le processus d'évaporation.

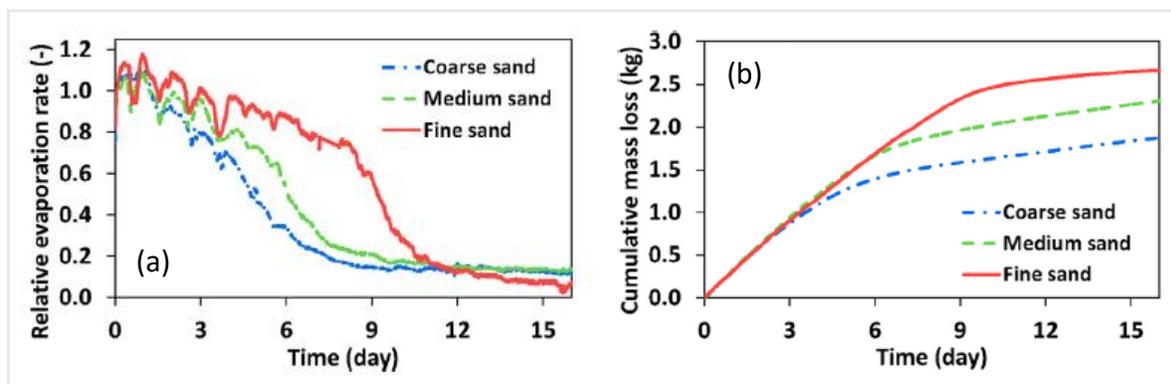


Figure I.14. (a) Variation des taux d'évaporation, et (b) Variation des pertes en masse cumulées en fonction du temps [39]

3.4. Bilan

L'annexe 2 récapitule les études mentionnées dans la section 3.3, visant à identifier les différentes propriétés physiques favorisant le phénomène d'évaporation à travers les pavés rafraîchissants. De plus, l'organigramme de la Figure I.15 résume les approches suivies dans cette étude pour atténuer le phénomène d'ICU à travers la technique des pavés rafraîchissants. Dans la suite du chapitre, ce travail résume les résultats des études portant sur la réduction de la température de surface à travers chaque approche adoptée et mentionnée dans la section 2.3. Ce travail va aussi considérer l'influence d'incorporation de certains sous-produits dans le pavé sur les propriétés physiques favorisant l'évaporation énumérées dans l'organigramme de la Figure I.15.

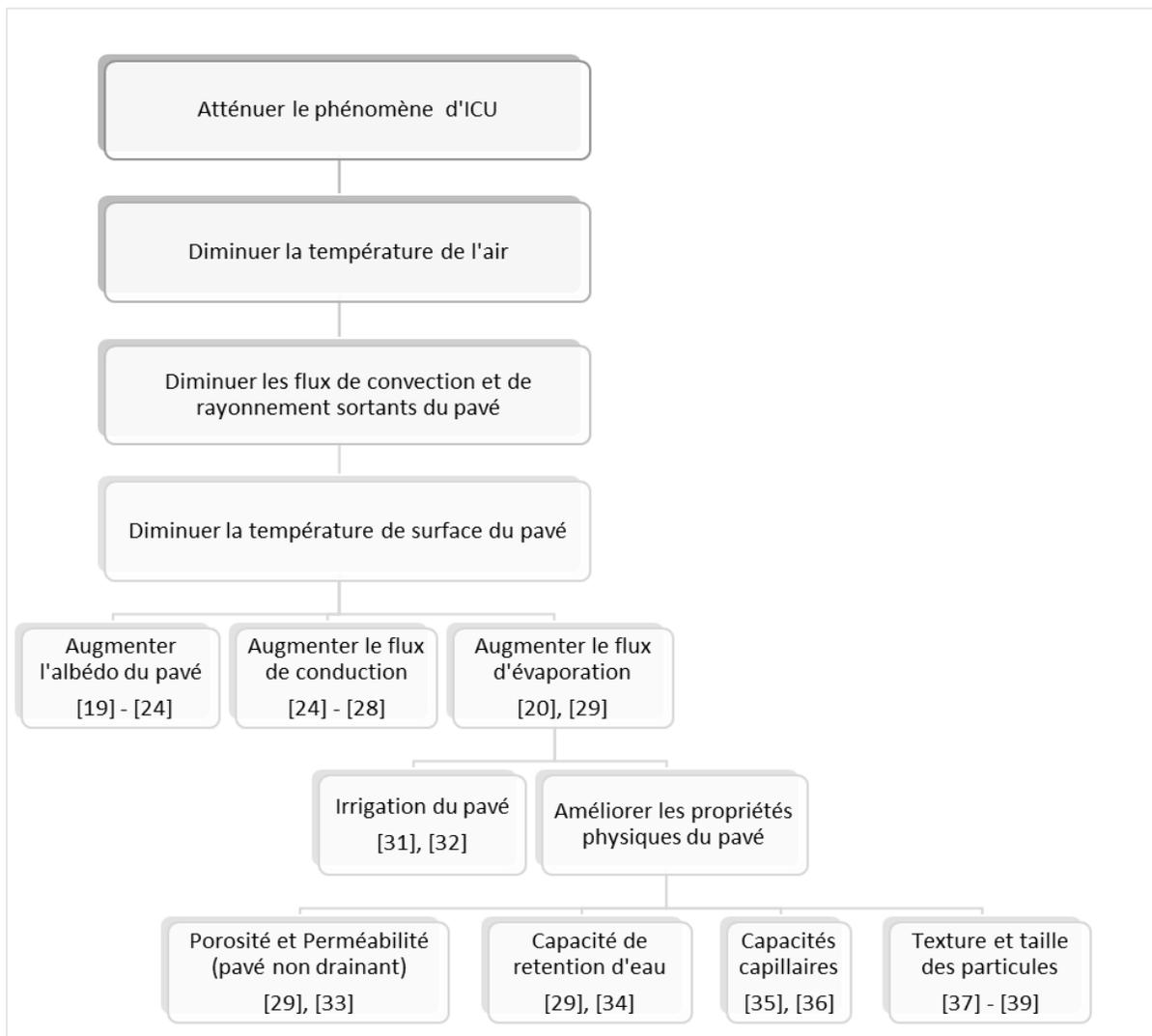


Figure I.15. Approches suivies pour atténuer le phénomène d'ICU à travers la technique des pavés rafraîchissants

4. Comparaison des résultats des approches adoptées

Cette section est dédiée au regroupement des résultats des études mentionnées antérieurement, dans le but de conforter les principes actifs des pavés rafraîchissants qui ont été évoqués dans la section 2.2 de la partie « Pavés rafraîchissants et Bilan énergétique ». Ce paragraphe décrit les trois approches adoptées dans ce travail pour diminuer la température de surface des pavés rafraîchissants.

4.1. Température de surface maximale ($T_{s,max}$) et albédo (α)

Dans la littérature, une relation entre la température de surface maximale et l'albédo est mentionnée à plusieurs reprises sans être tracée.

Toutes les études mentionnées dans cette section ont été réalisées à l'extérieur sauf celle de Chen et al. [24], qui représente une approche analytique validée expérimentalement. Dans l'expérience de Kinouchi et al. [19], les températures maximales de surface et d'air ont été calculées comme les moyennes arithmétiques de cinq jours d'exposition consécutifs. De plus, les auteurs ont tracé un nuage de points donnant la variation de l'albédo en fonction de la luminance et un autre montrant la variation de la réduction maximale de la température de surface par rapport au pavé conventionnel en fonction de la luminance. Cependant, ils n'ont pas indiqué comment varie la réduction maximale de la température de surface en fonction de l'albédo. Puisque la valeur de la luminance qui correspond à chaque valeur d'albédo est bien connue, il est possible de trouver la valeur de la réduction maximale de la température de surface par interpolation linéaire et, par conséquent, de construire un nuage de points qui donne la variation de la réduction maximale de la température de surface en fonction de l'albédo. En ce qui concerne l'expérience de Karasawa et al. [20], les auteurs ont montré la variation de la température de surface maximale en fonction de la luminance mais pas en fonction de l'albédo. Ce manque de données nous a conduit à supposer dans cette étude que la luminance correspond à l'albédo. Dans l'expérience de Synnefa et al. [21] qui a duré 5 mois (Août - Décembre), on a choisi Août comme étant le mois le plus chaud afin de représenter les résultats. Également, pour l'expérience de Pisello et al. [23] qui a duré 3 mois (Septembre - Novembre) pour 4 ou 5 jours par mois, nous avons sélectionné Septembre, comme étant le plus chaud parmi les 3 mois indiqués pour illustrer les résultats. Les autres études ont été effectuées dans un jour d'été, en y indiquant les températures maximales d'air et de surface.

Les résultats de la température de surface maximale ($T_{s,max}$) en fonction de l'albédo sont présentés dans la Figure I.16.

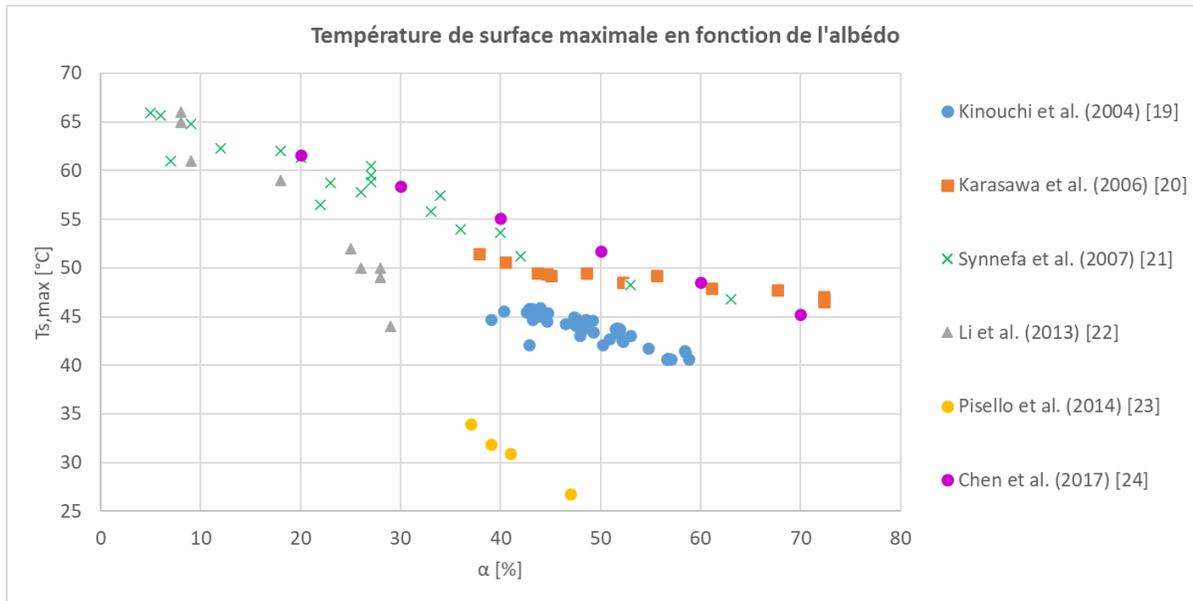


Figure I.16. Variation de la température de surface maximale en fonction de l'albédo

Ces résultats montrent clairement que $T_{s,max}$ diminue avec l'augmentation de l'albédo et donc qu'il convient d'avoir l'albédo le plus élevé pour diminuer la température de surface. Cependant, les résultats illustrés dans la Figure I.16 révèlent que bien qu'il existe des mêmes tendances entre les références, il en existe d'autres qui se révèlent bien différentes et surtout celles de Pisello et al. [23] et Kinouchi et al. [19]. Cela est notamment attribué aux conditions extérieures appliquées sur les pavés étudiés. En effet, dans l'étude de Pisello et al. [23], la température maximale de l'air ($T_{a,max}$) est de 22,7°C, alors que celle de Karasawa et al. [20] vaut 33,8°C. Cet écart remarquable de 11,1°C dans $T_{a,max}$ entre ces deux références, a engendré ces différences dans les températures de surface. En effet, une température ambiante plus élevée a tendance à chauffer plus la surface du pavé. De plus, pour l'étude de Kinouchi et al. [19], $T_{a,max}$ est égale à 32,9°C qui est aussi inférieure à celles des autres références. Il est à noter également que les conditions climatiques peuvent affecter le taux de variation de $T_{s,max}$. A titre d'exemple, la réduction de $T_{s,max}$ (obtenue par régression linéaire) peut varier entre 1,1°C (Karasawa et al. [20]) et 8,1°C (Li et al. [22]) quand α augmente de 10% seulement.

Pour cette raison, un second graphique qui inclue la température de l'air a été introduit. Ce graphique est illustré par la Figure I.17. Il montre la variation de l'intensité du réchauffement surfacique, exprimée par la différence entre les températures maximales de la surface et celle de l'air ($T_{s,max} - T_{a,max}$), en fonction de l'albédo. Il peut être observé que le réchauffement surfacique diminue également lorsque l'albédo de la surface du pavé augmente. Il peut être toutefois noté que les points sont toujours dispersés selon les études comme dans le graphique précédent. Ces résultats soulignent que la température de l'air n'est pas le seul facteur climatique qui influe sur la

température de surface. Celle-ci devra être normalisée en prenant en considération les autres facteurs tel que le rayonnement solaire, la vitesse de l'air.

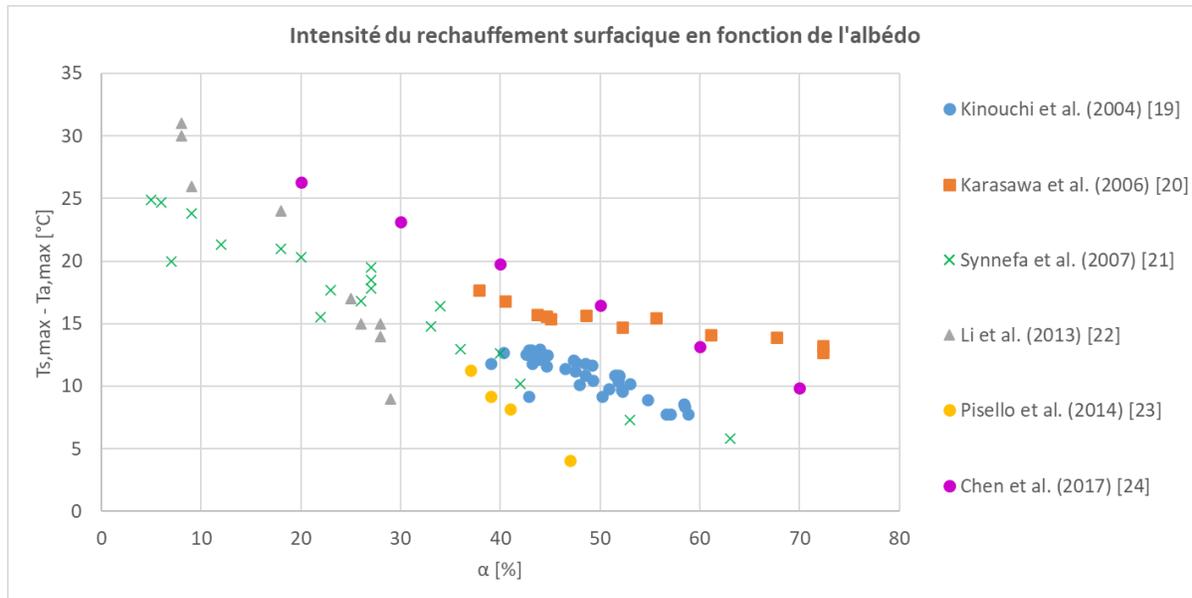


Figure I.17. Variation de l'intensité du réchauffement surfacique en fonction de l'albédo

4.2. Température de surface maximale ($T_{s,max}$) et conductivité thermique (k)

Ce paragraphe porte sur des études expérimentales (Wang et al. [26] et Chen et al. [28]), numériques (Wang et al. [25] et Shi et al. [27]) et une étude analytique (Chen et al. [24]). Toutes ces études ont duré 1 jour sauf celle de Wang et al. [26] qui a duré 3 jours. Wang et al. [25] ont seulement mentionné la valeur du rayonnement artificiel et sa durée sans évoquer la température de l'air maximale, ce qui ne permet pas de calculer l'intensité du réchauffement surfacique. Dans cette étude, la conductivité du pavé a été estimée comme la moyenne pondérée des conductivités de ses couches, puisque le pavé est constitué de plusieurs couches.

La Figure I.18 montre clairement que $T_{s,max}$ diminue lorsque la conductivité thermique k du pavé augmente : $T_{s,max}$ diminue de 66,9°C à 55,8°C lorsque k augmente de 0,6 W/(m.K) à 3,0 W/(m.K). Il convient donc d'avoir la conductivité thermique la plus élevée pour diminuer la température de surface.

On peut toutefois noter quelques variations entre les études, et cela peut être dû principalement au type de l'étude employée (expérimentale, numérique...), et aux conditions extérieures imposées.

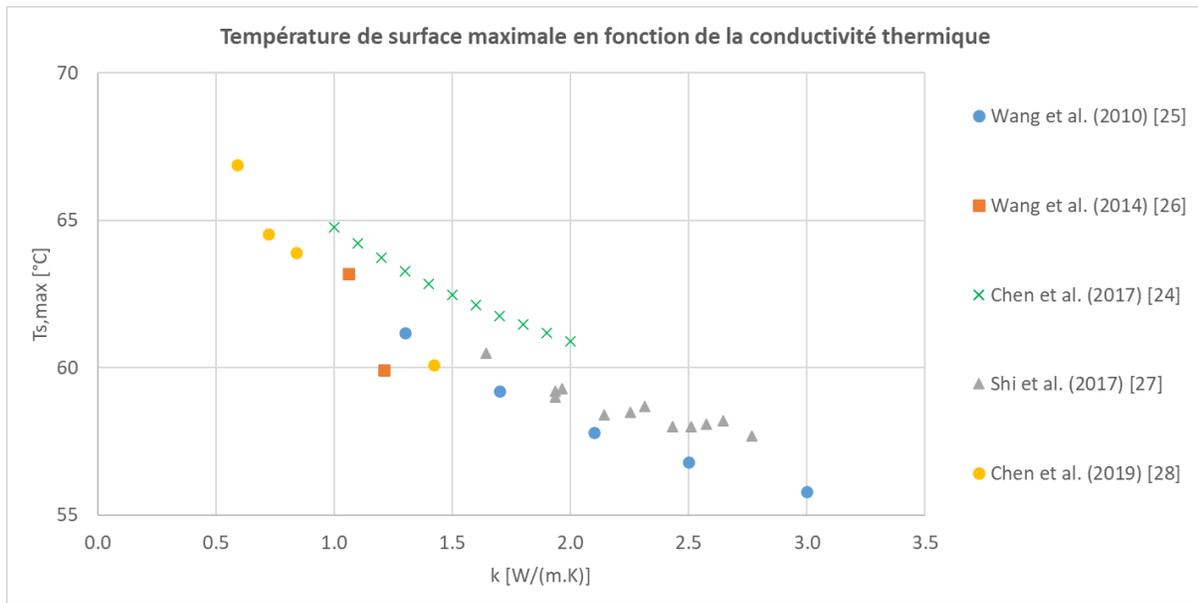


Figure I.18. Variation de la température de surface maximale en fonction de la conductivité thermique

Pour la Figure I.19, montrant la variation de l'intensité du réchauffement surfacique en fonction de la conductivité thermique k des pavés, les résultats des études sont moins dispersés à l'exception de ceux rapportés par l'étude de Wang et al. [26], dans laquelle $T_{a,max}$ qui est relativement plus élevée ($41,6^{\circ}\text{C}$) a conduit à la plus faible intensité du réchauffement surfacique ($T_{s,max} - T_{a,max}$).

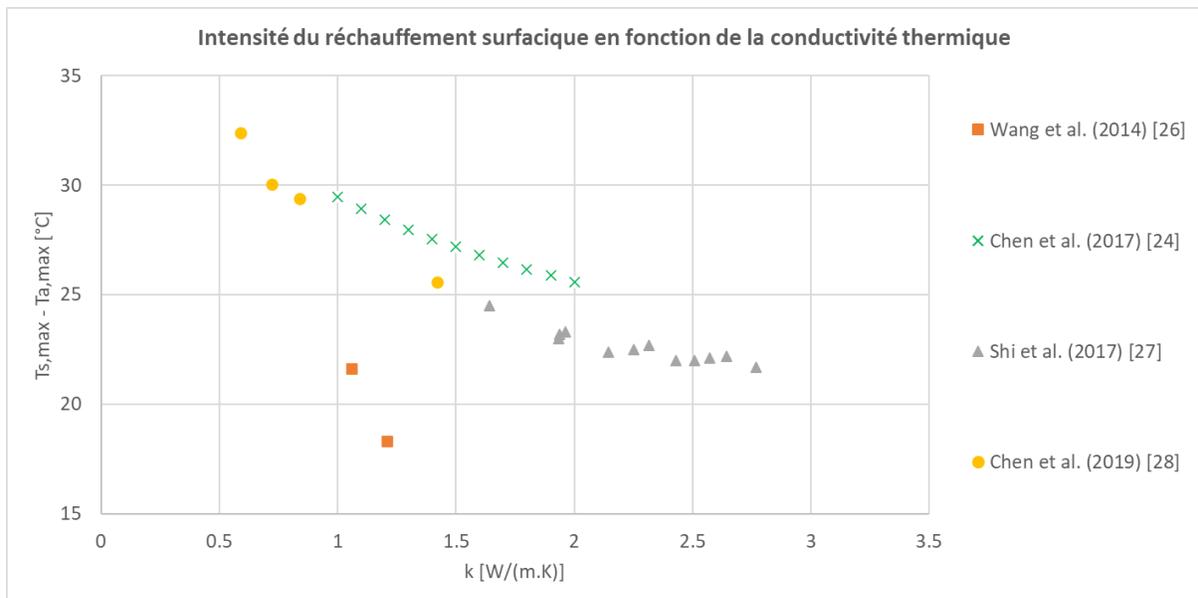


Figure I.19. Variation de l'intensité du réchauffement surfacique en fonction de la conductivité thermique

4.3. Température de surface moyenne ($T_{s,moy}$) et taux d'évaporation moyen (E_{moy})

L'analyse bibliographique a montré l'existence d'une corrélation entre la température de surface et le taux d'évaporation. C'est ce que nous allons chercher à représenter dans ce paragraphe à partir des résultats liants T_s à E dans des études expérimentales (quasiment toutes) ou numérique (uniquement celle de Qin et Hiller [18]).

Les valeurs moyennes de la température de surface, de l'air et du taux d'évaporation ont été déterminées à partir des articles originaux en utilisant le logiciel « Graph Grabber » et un tableur Excel. « Graph Grabber » permet de surveiller la variation des paramètres cités en fonction du temps, et par suite d'exporter les points constituant les courbes de variation sous formes de données Excel. En se basant sur ces données, on peut calculer les valeurs moyennes des paramètres cités pendant la durée de l'expérience (en s'appuyant sur la méthode des trapèzes qui estime la surface limitée par la courbe de variation et l'axe du temps).

Les durées d'étude sont très variables : 1 jour pour les études de Qin et Hiller [18], Karasawa et al. [20] et Parison et al. [32], 2 jours pour celles de Li et al. [29] et Wang et al. [35], et 6.5 jours pour celle de Liu et al. [36].

Les figures déduites de ces calculs montrent que, dans toutes les références illustrées, la température de surface moyenne (Figure I.20) ainsi que l'intensité du réchauffement surfacique (Figure I.21) ont tendance à diminuer lorsque le taux d'évaporation moyen augmente. Ce résultat va dans le sens du développement de pavés rafraichissants basés sur une forte évaporation d'eau. Cependant, une certaine dispersion des résultats peut être observée. Pour Karasawa et al. [20], cela peut être dû à la supposition que nous avons effectuée, qui a exagéré les valeurs de $T_{s,moy}$ et des intensités du réchauffement. En effet, Karasawa et al. [20] ont mesuré la température de l'air, la température de surface et le taux d'évaporation après un jour de la date d'irrigation sans mentionner les valeurs initiales de ces paramètres. Cela nous a conduit à supposer que $T_{s,moy} = T_s$ et que $T_{a,moy} = T_a$ à la date de mesure. L'expérience de Parison et al. [32] diffère des autres études par le type d'irrigation. Il s'agit d'une irrigation répétitive à des intervalles de temps très courts, ce qui a permis de maintenir la surface du pavé presque saturée à tout moment. Par conséquent, le taux d'évaporation moyen dépasse $800 \text{ g}/(\text{m}^2.\text{h})$. Finalement, le taux d'évaporation moyen estimé peut varier d'une étude à une autre selon les autres conditions initiales et aux limites, et surtout la température de l'air et l'intensité du rayonnement solaire.

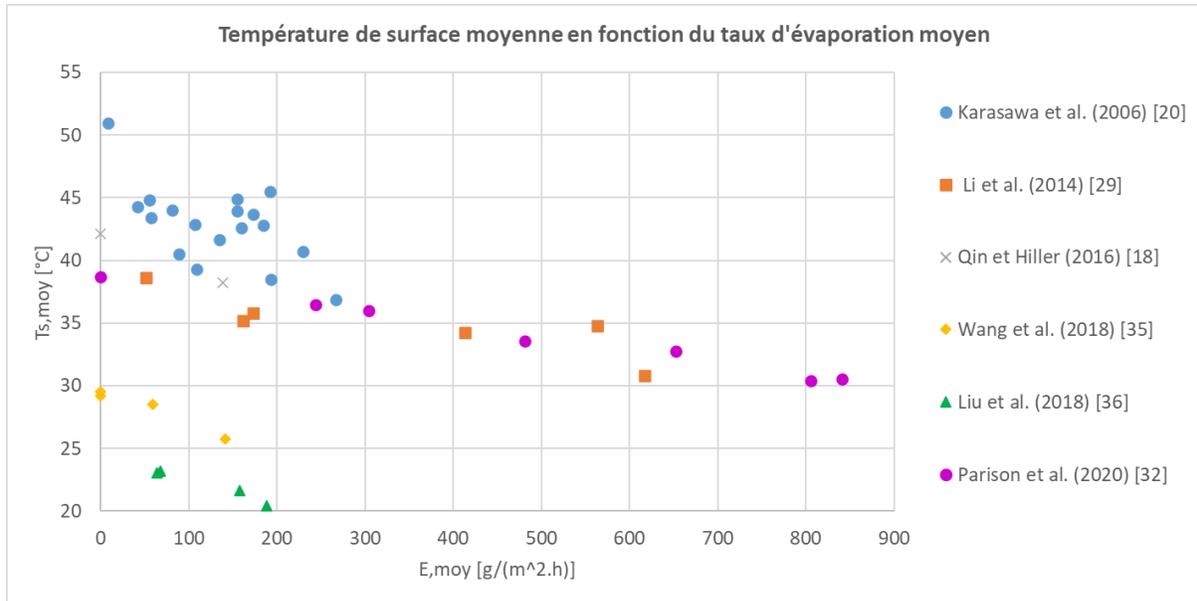


Figure I.20. Variation de la température de surface moyenne en fonction du taux d'évaporation moyen

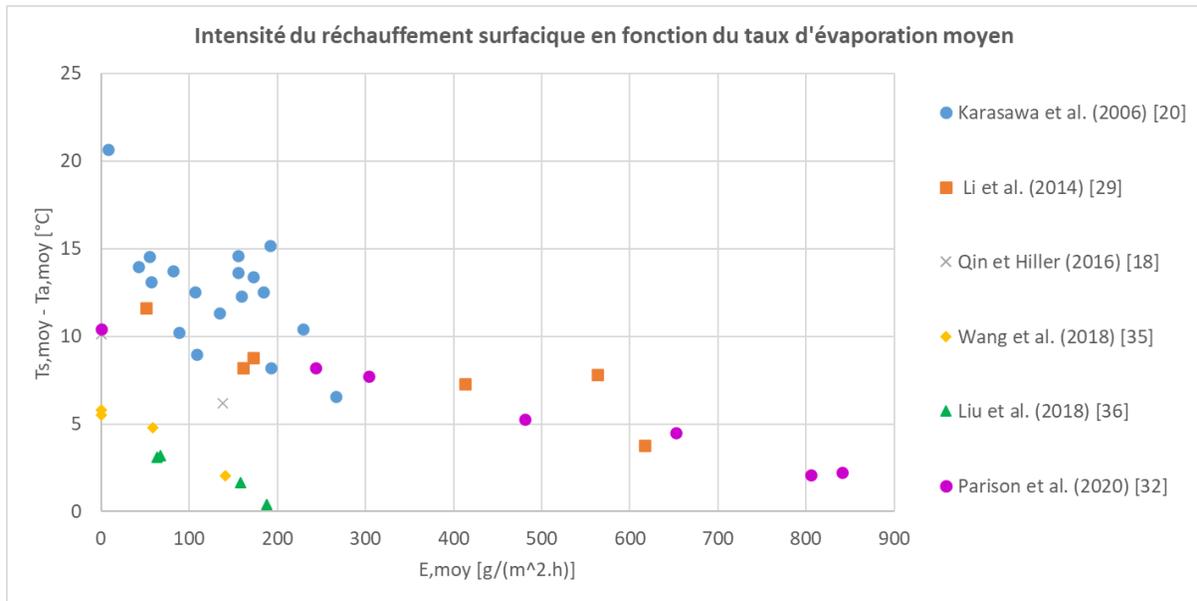


Figure I.21. Variation de l'intensité du réchauffement surfacique en fonction du taux d'évaporation moyen

5. Effet des sous-produits sur les propriétés physiques favorisant l'évaporation

De ce qui précède, il est possible de considérer qu'il existe deux propriétés thermiques du pavé rafraîchissant qui peuvent atténuer l'augmentation de sa température de surface dans l'état sec : l'albédo et la conductivité thermique. D'autre part, certaines propriétés physiques ont été énumérées et sont liées directement à la configuration interne du pavé rafraîchissant comme sa porosité, sa perméabilité, ses capacités de rétention d'eau et d'absorption capillaire, et enfin la texture et la taille de ses particules. Ces propriétés peuvent favoriser d'une manière directe le processus d'évaporation dans l'état humide. Il est donc primordial de chercher des sous-produits disponibles, qui peuvent être incorporés dans les pavés, afin d'améliorer les propriétés physiques déjà citées et par conséquent promouvoir le phénomène d'évaporation d'une manière indirecte. Cette partie, sera donc consacrée à montrer l'effet de certains sous-produits incorporés lors de la fabrication des pavés en béton ou des pavés à base de ciment, trouvés dans la littérature, qui favorisent indirectement l'évaporation.

5.1. Balles de riz

La balle de riz est un sous-produit agricole hydrophile obtenu lorsque la coque protectrice est retirée du grain de riz. Sa composition siliceuse résiste à la dégradation naturelle, et son élimination peut constituer une charge environnementale importante si aucune valorisation ne lui est trouvée. Donc, des dispositions alternatives adéquates d'élimination doivent être considérées pour éviter les effets négatifs sur l'environnement. Le béton fabriqué à partir des déchets agricoles comme les balles de riz est un matériau très léger à cause du réseau poreux interconnecté qui le caractérise.

Dans ce cadre, Sudprasert et Sankaewthong [40] ont étudié l'influence des balles de riz sur la remontée d'eau par capillarité à travers un mélange perméable, et sur la température et l'humidité relative de l'air environnant. Pour cela, des mélanges perméables constitués de latérite, de sable de rivière fin, de ciment et de balles de riz ont été préparés. Les balles de riz employées ont été divisées en trois groupes selon leurs tailles : grossière (7,5-9 mm), moyenne (0,5-2,5 mm) et fine (inférieure à 0,5 mm). Cette étude a mobilisé trois expériences. Dans la première expérience, six colonnes, formées chacune d'un mélange approprié et constituées par des blocs identiques entassés les uns sur les autres, ont été immergées à travers leurs extrémités inférieures dans un réservoir d'eau et l'ensemble a été placé dans une chambre fermée pour trois jours. Les résultats de cette expérience ont montré qu'après 24 heures d'immersion (durée des remontées capillaires maximales), la hauteur capillaire augmente avec l'addition de balles de riz de taille grossière ou moyenne, en atteignant une valeur maximale de 42 cm. Il convient de noter

que les mélanges à balles grossières sont devenus plus mous pendant cette durée d'immersion. En revanche, les mélanges à balles fines ont produit moins de remontée capillaire inférieure que les autres. Dans la deuxième expérience, deux cylindres creux formés par des mélanges de balles de riz de taille moyenne ont été préparés, mais avec des teneurs différentes en balles de riz. Les parties inférieures des deux cylindres ont été immergées dans le réservoir d'eau pour trois jours. Les résultats de cette expérience ont montré, qu'après 24 heures d'immersion, la remontée capillaire a augmenté avec l'addition de balles de riz de taille moyenne (54 cm pour la proportion la plus élevée de balles de riz contre 40 cm pour la proportion la plus faible). Dans la troisième expérience, quatre rangées, formées chacune par quatre cylindres creux, ont été immergées par leurs extrémités inférieures dans les réservoirs d'eau. Les cylindres ont été préparés par le mélange contenant des balles de riz de taille moyenne et le système a été placé dans une chambre pour 5 heures. La température contrôlée de l'air entrant peut varier seulement entre 36,2°C et 37,1°C, pendant que l'humidité relative peut fluctuer entre 54% et 62%. Les cylindres dans la même rangée, et les rangées elles-mêmes, ont été espacés de quelques centimètres pour permettre à l'air de circuler entre elles. Les résultats de cette expérience ont montré que la température de l'air entrant qui traverse les quatre rangées a pu diminuer entre 2,1°C et 2,7°C, au moment où son humidité relative a augmenté pour atteindre des valeurs qui varient entre 65,2% et 70%. Cette étude a conduit à conclure que l'addition de balles de riz de taille moyenne (0,5-2,5 mm) à un mélange perméable augmente la remontée capillaire d'eau, ce qui permet de favoriser l'évaporation à travers ce mélange, et par suite de diminuer la température de l'air environnant.

Winarno [41] a cherché à tester l'effet d'incorporation de balles de riz sur la performance des blocs en béton formés par du ciment et un sable très fin (0,04-0,1 mm). Les balles de riz incorporées sont relativement homogènes au niveau de la distribution de la taille des particules (la largeur varie de 2 à 4 mm et la longueur maximale est d'environ 10 mm). Sept mélanges différents ont été préparés avec les balles de riz. Le rapport massique balles de riz-ciment varie entre 0,67 et 2,00, et les fractions massiques eau-ciment et sable-ciment sont égales à 0,4 et 0,25 respectivement, dans le but d'obtenir toujours des mélanges rigides. Après la réalisation de l'essai d'absorption d'eau, qui consiste à plonger les blocs en béton dans l'eau pour 8 heures puis mesurer le pourcentage d'augmentation de leurs poids, il a été trouvé que l'absorption des blocs augmente significativement avec l'addition de balles de riz, de 14,21% pour un rapport balles-ciment de 0,67, jusqu'à 21,75% pour un rapport égal à 1,78. Il faut noter aussi que le rapport balles-ciment de 2,00 a été éliminé de cette étude puisqu'il a généré des mélanges très fragiles.

5.2. Scories de cuivre

Les scories de cuivre constituent un sous-produit résultant de la fabrication du cuivre. La production annuelle de ces scories crée un défi environnemental de détourner ce sous-produit vers une ressource précieuse au lieu de le déverser dans les zones de décharge.

Pour ce but, Jaskulski et Kubissa [42] ont exploré l'influence de la substitution massive complète du sable par des scories de cuivre fines (0-2 mm) sur la performance d'un béton léger. Au total, douze mélanges de béton léger avec trois rapports eau-ciment (0,50, 0,55 et 0,60) et deux teneurs en ciment (200 kg/m³ et 300 kg/m³) ont été fabriqués, six d'entre eux contiennent du sable et les autres des scories de cuivre fines. En raison de la masse volumique apparente relativement élevée des scories de cuivre par rapport au sable, deux types des granulats grossiers ont été employés. Le premier type a une taille de 4-8 mm et une masse volumique apparente 1.75 g/cm³, alors que la taille de l'autre type est de 8-19 mm avec une masse volumique apparente de 1.25 g/cm³. Les mélanges de sable renferment 40% du premier type (4-8 mm) et 60% du deuxième (8-19 mm), alors que les mélanges à scories de cuivre contiennent 30% du premier type (4-8 mm) et 70% du second (8-19 mm). Avec ces proportions, un mélange de référence et un mélange substitué correspondant, ont eu presque la même masse volumique apparente et la même masse substituée de granulats fins. En comparant les mélanges ayant le même rapport eau-ciment et la même teneur en ciment, il a été trouvé que, dans tous les cas, la porosité ouverte des mélanges à scories de cuivre fines dépasse celle des mélanges de référence (mélanges de sable), et la différence entre ces porosités peut varier entre 1,3% et 9,7%.

Lori et al. [43] ont également étudié l'effet d'incorporation de scories de cuivre à la place de granulats grossiers de dolomite (4,75-9,5 mm), sur les propriétés physiques et mécaniques d'un pavé en béton perméable, en employant sept mélanges distincts, contenant chacun un pourcentage volumique différent de scories (0, 20, 40, 50, 60, 80 et 100%). Dans ces mélanges, le volume des particules fines de dolomite (1,16-4,75 mm), correspond à 23% du volume total des granulats. Il a été remarqué qu'une augmentation de la quantité de scories de cuivre dans le mélange améliore sa porosité et sa perméabilité. En effet, en passant du mélange de référence (sans substitution) au mélange contenant uniquement des scories comme granulats grossiers, ces deux caractéristiques augmentent de 11% et de 15%, respectivement.

5.3. Cendres volantes

Le ciment ordinaire est l'un des constituants principaux utilisés dans la production du béton, mais malheureusement, la production du ciment implique l'émission de grandes quantités de CO₂ dans l'atmosphère, un facteur majeur contribuant à l'effet de serre et au réchauffement climatique. Il est donc primordial de chercher un autre matériau avec propriétés similaires, qui peut remplacer

partiellement le ciment. Les cendres volantes constituent un sous-produit provenant de la combustion du charbon dans les centrales électriques, et représentent un matériau cimentaire complémentaire qui peut réduire les émissions de CO₂ dans l'air [44].

Dans ce cadre, Usha et Smitha [45] ont essayé d'évaluer l'effet des cendres volantes comme un substituant d'une partie du ciment sur la perméabilité de bétons perméables. Pour atteindre cet objectif, les auteurs ont préparé huit mélanges divisés en deux séries, chaque série comprenant, en plus du mélange de référence, trois mélanges ou 10, 20 ou 30% en masse de ciment ont été remplacés par les cendres volantes. Des superplastifiants n'ont pas été ajoutés à la première série, mais ont été ajoutés à la seconde. La perméabilité du béton à 20% de cendres volantes a été trouvée légèrement supérieure à celle du béton de référence.

Mishra et Jena [46] ont réalisé une enquête expérimentale visant à remplacer 5% et 10% de ciment par des cendres volantes dans le béton perméable, dans le but d'obtenir une résistance maximale sans inhiber la perméabilité. Le remplacement de 10% de ciment par les cendres volantes s'est révélé avoir la plus grande porosité, alors que la perméabilité diminue, de 0,211 cm/s pour le béton de référence à 0,168 cm/s pour le béton à 10% de cendres volantes.

5.4. Granulats recyclés

Les granulats en béton et en brique recyclés, provenant principalement des déchets de construction et de démolition, représentent de plus en plus un risque environnemental à travers les zones de décharge et les moyens de transport utilisés pour y accéder. Une méthode efficace pour réduire ce risque est de remplacer, partiellement ou totalement, les granulats naturels par des granulats recyclés, dans la formulation du béton perméable. Le mortier « poreux » qui recouvre les granulats recyclés peut favoriser la porosité du béton perméable contenant ces granulats. Plusieurs chercheurs ont étudié l'effet de cette incorporation sur la performance physique et mécanique du béton considéré.

Dans ce cadre, Rizvi et al. [47] ont expérimenté l'influence de la substitution des granulats grossiers naturels (9,5-12,5 mm) par des granulats en béton recyclé sur la performance du béton perméable. La substitution était à 15, 30, 50 ou 100%. Les résultats ont révélé que la porosité ainsi que la perméabilité augmentaient avec l'augmentation du pourcentage de granulats en béton recyclé substitués.

Hossain et al. [48] ont étudié l'effet de la substitution totale des granulats grossiers naturels par des granulats en briques d'argile recyclées sur la performance du béton perméable. Dans cette expérience, chaque mélange étudié a été composé par des granulats de taille unique (19,5, 12,5 ou 4,75 mm). Les résultats concernant la porosité et la perméabilité ont montré que ces deux caractéristiques sont positivement corrélées à la taille des granulats, et elles sont toujours

supérieures dans le cas d'un mélange substitué par rapport au mélange témoin pour la même taille de particules.

Une étude expérimentale similaire a été conduite par Hasan et al. [49] pour étudier davantage l'effet de la gradation de la taille des granulats en briques d'argile recyclées dans les mélanges de béton perméable. Les granulats en briques recyclées introduits ont des tailles uniques de 25 mm, 19 mm ou 12 mm. Les résultats ont révélé que la porosité et la perméabilité sont toujours supérieures dans le cas d'un mélange substitué de taille unique par rapport au mélange témoin de taille graduée. Cependant, ces deux propriétés diminuent en réduisant la taille des particules et avec leur gradation dans le mélange substitué.

Jusqu'à présent, les granulats naturels ont été remplacés soit par des granulats en béton recyclé [47], soit par des granulats en briques recyclées [48,49]. Une expérience plus récente, basée sur une substitution combinée de granulats recyclés en béton et en brique de céramique a été réalisée par Ulloa-Mayorga et al. [50]. Leur expérience a examiné l'influence de la substitution totale des granulats grossiers naturels (9,5-12,5 mm) par des granulats recyclés de deux types, en brique de céramique et en béton, sur la performance du béton perméable. Cinq mélanges substitués ont été étudiés dans lesquels les granulats recyclés en brique et en béton ont été substitués d'une manière complémentaire à des pourcentages de 0, 25, 50, 75 et 100%. Les résultats montrent que la porosité et la perméabilité des mélanges substitués sont toujours supérieures à celles du mélange témoin et que ces deux propriétés augmentent davantage avec une substitution par des granulats en briques recyclées que par des granulats en béton recyclé.

5.5. Déchets de coquillage

La coquille de mer, ou coquillage est la couche externe dure et protectrice, généralement créée par un animal marin et qui fait partie de son corps. Les coquillages se trouvent souvent sur les plages, vu que les parties molles de l'animal marin mort ont été mangées par un autre animal ou se sont décomposées. En réalité, l'industrie de la pêche et de l'aquaculture produit des quantités énormes de coquillage qui sont considérées comme déchets. Dans cette section, une étude est détaillée dans laquelle ces déchets ou sous-produits sont lavés, puis broyés et tamisés en différentes tailles pour qu'ils puissent être incorporés dans le pavé.

Nguyen et al. [51] ont étudié l'effet des sous-produits de coquillage (SBP) de type « crepidula » (2-4 mm) et (4-6,3 mm), comme substituant partiel à 20% et 40% (en masse) de granulats grossiers, sur les propriétés hydrologiques et mécaniques des pavés en béton perméable formés de ciment, de sable de quartz (0-4 mm) et de gravier (4-6.3 mm). En plus du mélange de référence, cinq mélanges substitués ont été préparés. Parmi ces derniers, deux mélanges contiennent 20% et 40% de SBP (4-6.3 mm), deux autres renferment 20% et 40% de SBP (2-4 mm), et un mélange comprend 40% de SBP (2-6.3 mm). Les auteurs ont montré que la porosité

accessible à l'eau ainsi que la perméabilité augmentent avec l'augmentation des quantités de SBP incorporées, et particulièrement les SBP (4-6,3 mm), où cette porosité atteint son maximum pour 40 % de SBP (4-6,3 mm). Selon les auteurs, cela est dû à la perturbation de l'arrangement granulaire dans le béton, provoquée par le remplacement du gravier par les SBP.

Dans le même contexte, Cuadrado-Rica et al. [52], ont examiné l'influence de l'incorporation de coquilles broyées de type « queen scallop » comme substituant des granulats dans le béton. Quatre mélanges différents de béton ont été produits, un contenant des granulats naturels qui a été utilisé comme référence, et trois autres ont été préparés en remplaçant 20, 40 et 60% (en masse) de granulats naturels (sable et gravier) par des coquilles broyées (0-5 mm). Les granulats naturels comprennent du sable (0-4 mm) et du gravier (4-10 et 10-20 mm). Les pourcentages de substitution représentent la masse de coquilles broyées par rapport à la masse totale de granulats, qui comprend les granulats naturels et les coquilles. Les auteurs ont remarqué que la porosité accessible à l'eau augmente avec la substitution des granulats. Elle augmente de 18,0% dans le cas du béton témoin à 21,4% pour le béton renfermant 60% de coquilles broyées. De plus, la profondeur de pénétration d'eau sous pression à l'intérieur des échantillons, ainsi que la perméabilité, ont augmenté significativement quand le pourcentage de granulats substitués a augmenté.

Jithendra et Praveen [53] ont expérimenté l'effet du remplacement partiel à 20, 40, 60, 80 et 100% du sable de rivière par des coquilles broyées (< 4,75 mm) de divers types sur la performance du béton perméable. Ils ont trouvé qu'un remplacement de 60% ou plus augmente la perméabilité par rapport au béton témoin (sans coquilles) pour atteindre une valeur maximale pour un remplacement complet.

L'annexe 3 résume les études concernant l'effet des sous-produits énumérés dans cette section sur les propriétés physiques favorisant l'évaporation mentionnées dans ce travail. La section suivante est consacrée à étudier les principaux facteurs affectant la durabilité des pavés rafraîchissants.

6. Durabilité et Maintenance des pavés rafraîchissants

Dans cette partie, on s'intéresse principalement aux deux facteurs suivants : l'impact du vieillissement sur l'albédo et les résistances du pavé rafraîchissant à la compression, à l'abrasion, et aux cycles de gel-dégel. Le colmatage des pores du pavé est également considéré, car il se traduit par une réduction de la perméabilité à l'eau et perturbe ainsi le processus d'évaporation.

6.1. Evolution de l'albédo avec le temps

Dans leur étude mentionnée antérieurement, Synnefa et al. [21] ont mesuré les albédos « vieillis » d'échantillons après trois mois d'exposition à l'extérieur, et ont trouvé que tous les albédos mesurés ont diminué par rapport à leurs valeurs initiales, les revêtements ayant les albédos les plus élevés étant ceux qui subissent la diminution la plus remarquable. De plus, et dans le but d'estimer l'efficacité du lavage pour la restauration de l'albédo, les échantillons altérés ont été rincés en utilisant simplement de l'eau et une éponge : les auteurs ont remarqué que les albédos après lavage ont été restaurés au-delà de 93% de leurs valeurs initiales pour tous les échantillons. Cela indique que la diminution de l'albédo est principalement due à la rétention de la saleté, mais cette diminution est partiellement réversible.

Prado et Ferreira [54] ont proposé une équation pour estimer la valeur de l'albédo vieilli des matériaux qui peuvent être placés sur les toits des bâtiments, à partir de leur valeur initiale correspondante. Leur équation révèle que l'exposition des matériaux aux conditions extérieures tend à diminuer l'albédo des matériaux clairs (albédo > 0.2) et à augmenter celui des matériaux sombres (albédo < 0.2).

6.2. Résistance mécanique en compression

Ici, on s'intéresse uniquement à la résistance à la compression des pavés perméables, vu qu'elle est, en général, fortement positivement corrélée aux résistances à la flexion et à la traction. Selon Tennis et al. [55], la résistance à la compression du béton perméable peut varier entre 3,5 MPa et 28 MPa pour des perméabilités entre 0.20 cm/s et 0.54 cm/s, ce qui lui permet d'être utilisé dans une large gamme d'applications.

L'expérience présentée par [43] a prouvé que l'addition de scories de cuivre augmente toujours les résistances du béton perméable, mais l'augmentation maximale a été observée pour le mélange qui correspond à une substitution de 60% de granulats grossiers par des scories de cuivre, pour lequel la résistance à la compression au 28^{ème} jour augmente de 31% par rapport au mélange témoin, de 17,9 MPa jusqu'à 23,4 MPa.

Les auteurs de [45], qui ont essayé d'évaluer l'effet des cendres volantes comme un substituant du ciment sur la résistance du béton perméable, ont trouvé qu'une substitution de 20% de cendres volantes peut maximiser la résistance à la compression au 7^{ème} jour (18,1 MPa) par rapport aux mélanges témoins (17,1 MPa).

Dans l'enquête expérimentale de Mishra et Jena [46], il a été trouvé que le remplacement de 10% de ciment par des cendres volantes augmente la résistance à la compression au 28^{ème} jour, de 5 MPa pour le mélange témoin jusqu'à environ 6,8 MPa pour le mélange à 10% de remplacement (augmentation de 36%).

Dans l'expérience de Rizvi et al. [47], les résultats ont révélé une diminution de la résistance à la compression au 48^{ème} jour avec l'augmentation du pourcentage de granulats en béton recyclé substitués. Cette résistance diminue progressivement de 9,76 MPa pour le mélange témoin pour atteindre une valeur minimale de 5,53 MPa pour une substitution complète. Afin de vérifier ces résultats, un test d'abrasion a été mené sur les granulats en béton recyclés utilisés. Ce test a montré que presque la totalité de la masse perdue est constituée du mortier qui couvre les granulats en béton recyclé. Ce mortier constitue donc un point faible qui diminue la résistance à la compression des mélanges contenant des granulats en béton recyclé.

Dans le cas des granulats de briques recyclées, les résultats de l'étude de Hossain et al. [48] ont montré que pour les deux types de mélanges, témoin et substitué, la résistance à la compression au 28^{ème} jour augmente en diminuant la taille des granulats dans le mélange. De plus, pour la même taille de granulats, la résistance à la compression d'un mélange à granulats naturels est toujours supérieure à celle d'un mélange à granulats en briques recyclées.

Hasan et al. [49] ont montré que la résistance à la compression au 28^{ème} jour diminue quand la taille des granulats augmente. Cette résistance pour un mélange substitué à taille unique de 12 mm (7,31 MPa) est très proche de celle d'un mélange substitué à taille graduée (7,63 MPa), qui est à son tour inférieure de 20 % par rapport à celle du mélange de référence à taille graduée (9,45 MPa).

Ulloa-Mayorga et al. [50] ont trouvé que la résistance à la compression au 28^{ème} jour est toujours inférieure dans les mélanges substitués par rapport au mélange témoin. La résistance maximale détectée pour les mélanges substitués est d'ordre 5.8 MPa, alors que la résistance du mélange témoin vaut 8.9 MPa. En outre, un mélange à 100% de granulats en briques recyclées a présenté une résistance légèrement supérieure à celle d'un mélange à 100% de granulats en béton recyclé, avec des valeurs de 5.8 MPa et 5.4 MPa, respectivement. Selon les auteurs, la résistance relativement faible dans les mélanges substitués par rapport au mélange témoin, est due à une mauvaise adhérence entre l'ancienne pâte de béton qui entoure les granulats recyclés et la nouvelle pâte de béton.

Kevern et al. [56] ont essayé de développer des mélanges en béton perméable qui ont une porosité suffisante avec une résistance acceptable. Les mélanges ont été préparés avec des granulats grossiers de rivière à taille unique (4,75-9,5 mm). Un sable de rivière, dont 90% de ses particules ont une taille inférieure à 2,36 mm, peut remplacer 7% (en masse) de granulats grossiers, et des fibres de polypropylène de deux types ont été incorporées à trois taux d'addition de 0,0, 0,3 et 0,9 kg/m³. Les fibres de polypropylène employées ont été divisées en deux types : des fibres courtes de longueur comprise entre 12,7 et 19,1 mm, et des fibres longues ayant une longueur de 50 mm. Il a été trouvé que l'addition de sable peut augmenter la résistance à la compression moyenne (qui correspond à 7 mélanges) au 7^{ème} jour de 14,4 MPa (mélanges sans

sable) jusqu'à 17,0 MPa (mélanges avec sable). De plus, il a été observé que l'addition de fibres courtes au mélange sans sable peut diminuer légèrement la porosité mais elle augmente la perméabilité et la résistance à la compression au 28^{ème} jour : des additions de fibres courtes à un taux de 0,3 et 0,9 kg/m³ diminuent la porosité de 6,4% et 3,2% respectivement, augmentent la perméabilité de 8% et 172% respectivement, et augmentent la résistance à la compression au 28^{ème} jour de 24% pour les deux mélanges. Quand les fibres longues sont ajoutées au mélange sans sable à un taux de 0,3 et 0,9 kg/m³, la porosité diminue de 3,6 et 4,9% respectivement, la perméabilité diminue pour les deux mélanges, et la résistance à la compression au 7^{ème} jour augmente légèrement de 17,3 jusqu'à 17,8 MPa pour un dosage de 0,3 kg/m³, et de 17,3 jusqu'à 17,7 MPa pour un dosage de 0,9 kg/m³. D'autre part, les propriétés citées ci-dessus n'ont montré aucune tendance évidente quand les fibres ont été ajoutées au mélange contenant du sable.

Wu et al. [57] ont effectué une étude expérimentale portant sur la durabilité du béton. Ainsi, quatre échantillons en béton perméable constitués de granulats grossiers (4,75-12,5 mm) et d'une faible quantité de sable de rivière (6% de la masse totale de granulats) comme granulats fins, ont été préparés. Un agent entraîneur d'air, une émulsion aqueuse d'éthylène-acétate de vinyle (Latex) et des fibres de polypropylène de longueur entre 3 et 12 mm ont été utilisées comme additifs. En plus du mélange de référence, qui ne contient pas d'additifs, trois mélanges contenant l'agent entraîneur d'air, dont un mélange est sans latex et sans fibres, un autre avec latex mais sans fibres, et un dernier avec latex et avec fibres, ont été réalisés. Le rapport eau-ciment a été contrôlé à 0,25, et les dosages en entraîneur d'air, latex, fibres de polypropylène, et superplastifiant ont été fixés à 0,01%, 12%, 0,2% et 0,25% de la masse de ciment respectivement. L'addition de l'agent entraîneur d'air dans le mélange de référence augmente légèrement sa résistance à la compression. Cependant, une quantité excessive de l'agent entraîneur d'air dans le mélange (plus que 0,02% de la masse de ciment) peut perturber sa résistance. Les mélanges modifiés par le latex présentent des résistances à la compression plus élevées que les autres mélanges. Selon les auteurs, cela est dû au fait que les produits d'hydratation du latex avec le ciment, mélangés ensemble, conduisent à des liaisons renforcées dans toute la matrice. L'addition de fibres aux mélanges modifiés par le latex peut augmenter davantage leurs résistances à la compression.

Grubeša et al. [58] ont testé les caractéristiques d'usure du béton perméable en utilisant les scories d'acier comme substituant des granulats grossiers de dolomite. Dans leur étude, sept mélanges différents ont été préparés. Pour les mélanges formés par les granulats de dolomite, il existe un mélange de référence contenant trois tailles différentes (0-4 mm), (4-8 mm) et (8-16 mm) à 40%, 30% et 30% respectivement, et quatre autres contenant tous 10% de sable de rivière (0-2 mm) et des granulats grossiers de différentes tailles et proportions. Ces quatre mélanges comprennent un mélange à 60% (4-8 mm) et 30% (8-16 mm), un à 30% (4-8 mm) et 60% (8-16 mm), un à 90% (8-16 mm), et un dernier à 90% (4-8 mm). Pour les deux mélanges formés de

scories d'acier et de 10% de sable (0-2 mm), il y a un mélange à 60% (4-8 mm) et 30% (8-16 mm), et un autre à 30% (4-8 mm) et 60% (8-16 mm). Pour tous les mélanges cités, le rapport eau-ciment est de 0,33 et la teneur en ciment vaut 300 kg/m^3 . Les auteurs ont montré que l'utilisation de granulats de faible taille (dolomite ou scories d'acier) dans le mélange perméable, augmente sa résistance à la compression au 28^{ème} jour. En revanche, les résistances à la compression des mélanges contenant des scories d'acier étaient légèrement inférieures à celles des mélanges équivalents formés par la dolomite.

Liu et al. [59] ont évalué l'influence de la taille des granulats, la porosité et le rapport eau-liant sur la durabilité du béton perméable en se basant sur la méthode des plans d'expérience. Les échantillons en béton perméable étudiés sont constitués par des granulats grossiers de granite naturel de trois tailles différentes (4,75-9,5 mm, 9,5-13,2 mm et 13,2-16 mm). Il s'agit au total de neuf mélanges, chacun d'eux peut avoir une porosité de 15, 20 et 25% et un rapport eau sur liant de 0,25, 0,30 et 0,35 respectivement. Les résultats de cette étude ont montré que la porosité est le paramètre qui influe le plus sur la résistance à la compression, suivie par la taille des granulats puis le rapport eau-liant, avec une combinaison optimale de 15%, 4,75-9,5 mm et 0,25 respectivement. Il a été trouvé que pour la même taille des granulats, la résistance à la compression au 28^{ème} jour diminue d'environ 24% quand la porosité augmente de 15% à 25% et que, pour la même porosité, cette résistance diminue d'environ 15% quand la taille des granulats augmente de 4,75 mm à 16 mm. Selon les auteurs, les petits granulats fournissent une plus grande surface spécifique au mortier entre les granulats et, par suite, la force liante est plus importante. En revanche, il a été observé que le rapport eau sur liant n'a pas un effet évident sur la résistance à la compression.

Les sciures fines de bois ont été employées par Opiso et al. [60] pour étudier leur effet sur la performance du béton perméable formé par des granulats grossiers (5-9 mm). Ces sciures sont caractérisées par un diamètre inférieur à 2,36 mm et par une capacité d'absorption d'eau de 89,8 %. Elles ont été ajoutées au béton à des taux allant de 0 à 12%. Les mélanges de béton ont été préparés avec un rapport ciment:granulats de 1:3 et un rapport eau sur ciment de 0,5. Cette expérience a montré que l'addition de 8% de sciures de bois au béton perméable maximise sa résistance à la compression au 28^{ème} jour qui atteint une valeur de 29,13 MPa, supérieure à celle du mélange témoin (25,13 MPa).

Une étude de Leon Raj et Chockalingam [61] a rapporté l'influence de la taille des granulats grossiers et du rapport granulats sur ciment sur les caractéristiques mécaniques du béton perméable. Les mélanges du béton perméable ont été préparés par des granulats de trois tailles différentes (4,75, 10 ou 12,5 mm) et avec des rapports granulats sur ciment de 3,2, 4,5 et 5,0. Au total, douze mélanges ont été étudiés, dont neuf sont de taille unique, et trois de taille graduée ayant des fractions massiques identiques de granulats de taille 4,75, 10 et 12,5 mm. Les autres paramètres, comme le rapport eau sur ciment et la teneur en ciment, ont été maintenus

constants (0,4 et 320 kg/m³ respectivement). Il a été observé que, pour les échantillons contenant des granulats de tailles 10 et 4,75 mm testés sous la charge directe de compression, la cause principale de la rupture est la défaillance des zones de liaison de la pâte du ciment qui connectent les particules. De plus, il a été observé qu'à mesure que la taille des granulats diminue, la résistance à la compression augmente. La résistance à la compression au 28^{ème} jour diminue, par rapport au mélange de taille de 4,75 mm, de 10-55%, 27-61% et 2-8% pour les mélanges de taille de 10, 12,5 mm et graduée, respectivement. Selon les auteurs, cela est dû à une plus grande taille de granulats entraînant une plus faible surface de liaison de la pâte de ciment, ce qui a tendance à affaiblir la résistance du béton. De plus, la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du rapport granulats sur ciment. En fait, les mélanges de rapports granulats sur ciment de 4,5 et 5 ont montré une diminution d'environ 9-40% et 34-67% respectivement, par rapport au mélange ayant un rapport de 3,2. La porosité de l'échantillon diminue avec l'augmentation de sa résistance à la compression. Cependant, la variation de la porosité en fonction de la résistance à la compression des mélanges de tailles de 10 et 12.5 mm est plus raide que celles des mélanges de taille de 4,75 mm et de taille graduée.

Wang et al. [62] ont étudié l'effet d'incorporation de scories d'acier sur les propriétés physiques et mécaniques du béton perméable. Des scories d'acier ont été utilisées pour remplacer les granulats naturels de basalte (9,5-12,5 mm) à des niveaux de remplacement de 25, 50, 75 et 100%. Il a été trouvé que l'incorporation de scories d'acier améliore la résistance à la compression au 28^{ème} jour, surtout à des niveaux de remplacement élevés. La résistance à la compression la plus élevée atteint 17,6 MPa pour une substitution complète, alors que la plus faible vaut 13,1 MPa pour le mélange de référence. Cela peut être dû, selon les auteurs, au fait que les pâtes de ciment peuvent pénétrer dans les scories en raison de leur surface rugueuse et poreuse.

Dans cette section, l'évaluation de la résistance à la compression a été basée sur la norme BS EN 12390 pour les études de [43] et [58], IS 516-1959 pour [45] et [61], ASTM C39 pour [48], [49], [50], [56] et [60], et GB/T 50081 pour [57], [59] et [62].

6.3. Résistance à l'abrasion

Grubeša et al. [58] ont trouvé que les mélanges préparés avec les granulats de dolomite ont été plus susceptibles à l'abrasion que les mélanges équivalents formés par les scories d'acier. D'autre part, les mélanges contenant de la dolomite ont montré une meilleure résistance à l'abrasion par rapport au mélange de référence qui ne contient pas de sable.

Dans l'étude de Leon Raj et Chockalingam [61], l'essai de Cantabro, selon la norme JTG E20-2011, a été adopté afin d'évaluer la rupture des granulats à la surface du pavé et la perte de poids due à l'abrasion. La perte de poids a été surveillée tous les 50 tours jusqu'à 300 tours. Il a été observé que la perte de poids finale (après 300 tours) augmente avec la taille des granulats et avec le

rapport granulats sur ciment. En effet, la perte de poids minimale, qui vaut 20,2% seulement, correspond au mélange de taille 4,75 mm représentant un rapport granulats sur ciment de 3,2. En revanche, la perte de poids maximale atteint 96,2% pour le mélange de taille 12,5 mm pour un rapport granulats sur ciment de 5,0.

Selon Wang et al. [62], la résistance à l'abrasion du béton perméable s'exprime par le degré de résistance qui est inversement proportionnel à la profondeur de meulage de l'échantillon abrasé pour un nombre de tours donné. Il a été observé qu'avec des niveaux de remplacement des scories d'acier de 75% et 100%, le degré de résistance, mesuré après 5000 tours, augmente considérablement par rapport aux autres mélanges.

6.4. Résistance au gel-dégel

Kevern et al. [56] ont trouvé que l'addition de sable augmente la résistance au gel-dégel. L'addition de fibres dans le béton sans sable augmente aussi la résistance au gel-dégel, mais le degré d'augmentation n'est pas aussi élevé que celui fourni par l'utilisation de sable uniquement. Pour les mélanges sans sable, le mélange de référence avait plus de 15% de perte de masse à 145 cycles, alors que les mélanges à 0.3 kg/m³ et 0.9 kg/m³ de fibres courtes ont perdu plus que 15% de masse à environ 200 et 175 cycles de gel-dégel, respectivement. L'utilisation simultanée de sable et de fibres augmente significativement la résistance au gel-dégel, surtout dans les premiers cycles, mais cette résistance devient inférieure à celle du mélange contenant du sable sans fibres. En bref, le mélange contenant uniquement du sable a montré la meilleure durabilité au gel-dégel, avec une perte de masse de 2% après 300 cycles.

L'étude de Wu et al. [57] portant sur la résistance du béton perméable au gel-dégel, a été menée sur un total de 300 cycles, et l'échantillon a été pesé chaque 25 cycles. Il a été observé que le changement de masse pour tous les mélanges est difficilement mesurable au début de l'essai, alors qu'après environ 125 cycles, une perte de masse beaucoup plus rapide a été observée. Les échantillons de référence ont subi une perte de masse plus importante que les échantillons contenant l'agent entraîneur d'air. Les mélanges modifiés par le latex ont montré de meilleures performances dans les conditions de gel-dégel que les mélanges non modifiés par le latex. Les mélanges contenant du latex et des fibres ont révélé une perte de masse légèrement inférieure à celle des mélanges modifiés par le latex uniquement, ce qui montre que les fibres incorporées dans les mélanges peuvent aussi atténuer les dommages causés par le gel-dégel en augmentant la résistance à la fissuration, un coefficient de réduction doit être pris en compte lors de la conception ou l'évaluation d'un pavé en béton perméable.

Selon Liu et al. [59], le nombre total de cycles gel-dégel correspond à l'instant d'apparition d'une fissuration dans les échantillons, qui a été vérifiée chaque 10 cycles. Selon cette étude, c'est la taille des granulats qui influe le plus sur la durabilité au gel-dégel, suivie par la porosité puis le

rapport eau sur liant, avec une combinaison optimale de 4,75-9,5 mm, 15% et 0,35 respectivement. Pour la même porosité, le nombre total de cycles gel-dégel diminue 20 cycles quand la taille des granulats augmente de 4,75 mm à 16 mm. De plus, pour la même taille des granulats, ce nombre diminue aussi avec l'augmentation de la porosité. Selon les auteurs, une porosité plus importante signifie une teneur en eau plus grande, et, par suite, une force d'expansion du gel plus élevée, ce qui réduit la résistance aux cycles gel-dégel. En revanche, il a été observé que le rapport eau sur liant n'influe pas sur la durabilité au gel-dégel.

6.5. Colmatage des pores

Haselbach [63] a étudié le potentiel de l'argile à colmater le béton perméable. Pour le mesurer, des expériences de colmatage et de rinçage ont été réalisées sur des carottes en béton perméable prélevées in-situ. Trois types d'argile ont été employées pour étudier les cycles de colmatage : une argile rouge naturelle et deux autres commerciales : le kaolin et la bentonite (le premier est moins cohésif, alors que la bentonite est plus cohésive). Après chaque cycle de colmatage, la carotte ou l'éprouvette a été placée dans l'étuve à 50°C pour 24 heures au moins, afin d'imiter des conditions naturelles, où, après un événement de type tempête, le pavé sera exposé à un temps chaud et ensoleillé. Le cycle de colmatage a été répété jusqu'à ce que l'éprouvette ne soit plus fonctionnelle. Ensuite, l'excès d'argile sèche a été balayé de la surface de chaque éprouvette avec une brosse, puis des essais de rinçage ont été conçus pour imiter les précipitations ultérieures. L'inspection visuelle des éprouvettes pendant les cycles de colmatage a indiqué que l'argile s'accumule rapidement sur la surface supérieure et, par suite, réduit considérablement la capacité d'infiltration du pavé. Il a été trouvé que, pour le même type d'argile, l'augmentation de la quantité d'argile dans le volume d'eau qui surmonte l'éprouvette diminue considérablement le taux d'infiltration effectif. De plus, les résultats des cycles de rinçage ont révélé des améliorations substantielles des taux d'infiltration pour toutes les éprouvettes sauf avec la bentonite. Ceci montre que les dépôts d'argile peuvent être enlevés par des procédures simples de maintenance comme le balayage pour éliminer les dépôts de surface, et des processus de rinçage ultérieurs. De plus, les éprouvettes obstruées par les argiles les moins cohésives peuvent être nettoyer plus facilement.

Sriravindrarajah et al. [64] ont étudié l'effet du colmatage de la structure poreuse et du compactage sur la perméabilité à l'eau du béton perméable. Les échantillons en béton ont été préparés par une combinaison de ciment et de cendres volantes en proportions massiques égales et par des granulats grossiers en gravier (4,75-9,5 mm). L'effet du colmatage sur la perméabilité a été étudié en utilisant de l'eau boueuse contenant des quantités connues de matériaux argileux de 0, 150, 300 et 450 g respectivement. A la fin des essais de perméabilité, les échantillons ont été nettoyés par l'eau pure à haute pression, puis l'essai de perméabilité a été répété avec de l'eau pure. A l'issue de cet essai, les échantillons ont été pesés afin d'estimer l'efficacité du

nettoyage exprimée en %. Il a été montré que la perméabilité de l'échantillon non compacté (8,5 mm/s) est significativement supérieure à celle de l'échantillon compacté (0,8 mm/s) (compactage en deux couches par une table vibrante), et que la perméabilité diminue avec l'augmentation de la teneur en matériaux argileux. Pour l'échantillon non compacté, avec l'inclusion de 150 g de matériaux argileux, la perméabilité diminue de plus de 85%. Les résultats ont aussi montré que le nettoyage à haute pression des pores bouchés par des matériaux argileux est capable de restaurer partiellement la perméabilité. En d'autres termes, certains pores restent bloqués et le processus de nettoyage n'est pas totalement efficace pour nettoyer les pores. L'efficacité du nettoyage atteint 76% et 93% pour les échantillons compactés et non compactés respectivement, ce qui indique que le nettoyage est plus difficile avec les échantillons compactés.

Mishra et al. [65] ont mentionné trois méthodes différentes pour achever la maintenance des pavés perméables et éviter le colmatage de leurs pores. Une méthode couramment utilisée est « l'aspiration » qui enlève les particules qui bouchent le pavé près de sa surface. Il est à noter que seules les particules proches de la surface peuvent être extraites et que la partie profonde du pavé n'est pas impactée. Une seconde méthode nommée « lavage sous pression » permet de lâcher ou d'affaiblir les liaisons entre les particules qui bouchent le pavé, et pousse bien ces particules vers l'intérieur du pavé ou même vers son fond. Une troisième méthode est la méthode de « rinçage inversé » pour laquelle les pavés poreux sont nettoyés avec l'eau stockée au-dessous du pavé, du fond vers la surface.

L'annexe 4 récapitule les différentes études mentionnées dans cette section portant sur la durabilité des pavés rafraîchissants.

7. Conclusion

Dans cette étude bibliographique, il a été démontré que pour atténuer le phénomène d'ICU et diminuer la température de l'air à travers les pavés rafraîchissants, il faut, tout d'abord, diminuer la température de surface de ces pavés en augmentant leur albédo, leur conductivité thermique et leur flux d'évaporation.

Par ailleurs, pour favoriser le flux d'évaporation à travers ces pavés, il faut :

- améliorer leur porosité afin de retenir plus d'eau dedans,
- augmenter leur perméabilité dans le cas des pavés non drainants, ce qui permet à l'eau située dans les pores connectés à la surface d'être plus exposée aux conditions atmosphériques extérieures,
- garder l'eau proche de la surface, ce qui peut être réalisée par une irrigation régulière ou par des capacités de rétention d'eau et capacités capillaires élevées,

- choisir des matériaux de particules macroporeuses et de faible taille, ce qui permet d'amplifier la surface spécifique entre elles et de favoriser les forces capillaires ascendantes.

D'autre part, il a été vu qu'il est possible d'introduire dans ces pavés des sous-produits hydrophiles provenant de ressources naturelles ou de déchets de construction et de démolition. Cela peut permettre de protéger l'environnement en réduisant une partie des opérations de traitement, tout en améliorant la performance physique des pavés en favorisant l'évaporation.

En guise de conclusion, on peut dire qu'il existe encore des limitations qui constituent des verrous supplémentaires à l'optimisation des pavés rafraîchissants. Les actions pour lever ces verrous peuvent être énumérées comme suit :

- empêcher le séchage des pavés rafraîchissants,
- préserver la valeur initiale de leurs albédos,
- éviter le colmatage de leurs pores interconnectés,
- construire un pavé qui puisse supporter les charges appliquées et résister au phénomène d'abrasion et aux cycles de gel-dégel,
- chercher d'autres matériaux ou sous-produits, qui peuvent être incorporés dans le pavé rafraîchissant, afin d'améliorer ses propriétés physiques favorisant l'évaporation et sa durabilité.

Chapitre II : Matériaux et Méthodes

1. Introduction

Ce chapitre est dédié à la description des matériaux qui constituent les pavés retenus pour cette étude et des différentes méthodes employées pour les caractériser. Les résultats issus de l'utilisation de ces méthodes seront détaillés dans le chapitre III.

Pour atteindre cet objectif, ce chapitre est divisé en trois grandes parties.

Dans la première partie, une identification des différentes séries des pavés étudiés ainsi que les matériaux avec lesquels certains pavés sont formulés est réalisée.

La deuxième partie est dédiée à la caractérisation thermo-physique de ces pavés, en procédant à la définition de chaque propriété et en décrivant le protocole d'essai permettant de la mesurer. Le choix de mesurer ces propriétés en particulier s'est notamment basé sur la littérature et sur le fait que celles-ci interviennent dans la partie numérique présentée dans le chapitre IV. En effet, dans les études qui portent sur des études comparatives entre plusieurs pavés, on a constaté qu'il existe certaines propriétés thermo-physiques qui favorisent le rafraîchissement surfacique. Cet effet rafraîchissant est évalué par une réduction de la température de surface ou par une augmentation du taux d'évaporation à travers le pavé.

La dernière partie est consacrée à décrire le protocole expérimental conduisant à surveiller la température de surface de plusieurs pavés exposés simultanément au rayonnement solaire extérieur. Dans cette partie, les pavés sont testés dans leur état humide mais aussi dans leur état sec. Le but de cette expérience à l'état sec est de vérifier les variations de la température de surface en fonction des propriétés thermiques déjà identifiées dans la littérature. D'autre part, l'état humide offre l'opportunité de trouver de nouvelles corrélations entre la température de surface et les autres propriétés évaluées. En effet, dans la littérature, il existe seulement des études qui prennent chaque propriété à part pour traduire leur effet sur la température de surface à l'état humide, et cela en comparant un nombre limité de pavés qui ne dépasse pas, au mieux, seulement trois pavés. L'absence de tentatives d'étude de l'effet du couplage des propriétés thermo-physiques sur la température de surface pour un grand nombre de pavés représente une lacune majeure dans la littérature. Ceci justifie l'intérêt de ce travail qui, en caractérisant un grand nombre des pavés de formulations et propriétés différentes, devrait permettre d'arriver à une meilleure compréhension du couplage entre les propriétés permettant de maximiser l'effet de rafraîchissement à la surface.

2. Pavés retenus dans la cadre de l'étude

Dans le cadre de ce travail, une attention est portée aux pavés rafraîchissants qui permettent de limiter l'augmentation de la température de surface, grâce à l'évaporation de l'eau à travers les pores capillaires, de la base humidifiée vers la surface exposée au rayonnement solaire.

Dans cette étude, un total de 21 formulations de pavés divisées en deux séries est étudié, comme le montre le Tableau II.1 :

- la série (BS) concerne 8 formulations de pavés en béton à base de sable recyclé (0 - 4 mm) contenant des matériaux hydrophiles. Les matériaux (sable recyclé et matériaux hydrophiles) ont été retenus pour leur capacité à absorber de grandes quantités d'eau ;
- la série (BI) est composée de 13 formulations de pavés en béton isolant structurel mis en œuvre sur chantier et qualifiés thermiquement par la division transfert du LMDC. Ces matériaux sont connus pour leur faible conductivité thermique par rapport aux bétons traditionnels.

Le nombre de formulations et le nombre de pavés par formulation dans chaque série sont indiqués dans le Tableau II.1. Les pavés de la série (BS) ont été conçus et réalisés lors d'un précédent stage Master à l'INSA Toulouse [66]. Pour les besoins de l'étude, tous les pavés ont été ramenés par sciage aux mêmes dimensions de 10 cm x 10 cm x 4.5 cm (longueur x largeur x épaisseur).

Tableau II.1. Séries des pavés étudiés

Série	Spécification	Nombre de formulations	Nombre de pavés par formulation
BS	Béton à base de sable recyclé et contenant des matériaux hydrophiles	8	3
BI	Béton isolant structurel	13	1

2.1. Série (BS) en béton à base de sable recyclé

Les pavés à base de sable recyclé sont nommés, selon [66], comme suit : SR0, SRF0.1, SRG1, SRG1F0.1, P10, P20, AE40, et AE60. Certains renferment un matériau hydrophile comme des fibres de chanvre (F), des granulats de chènevotte de chanvre (G), du verre expansé « poraver » (P) ou de l'argile expansée (AE). Le suffixe dans les noms sous forme d'un nombre représente le pourcentage d'addition massique du matériau hydrophile par rapport au poids total du pavé.

La Figure II.1 montre l'aspect des matériaux incorporés, dont le choix a été basé sur l'hypothèse que de tels matériaux peuvent favoriser l'ascension capillaire ou le stockage d'eau dans le pavé.

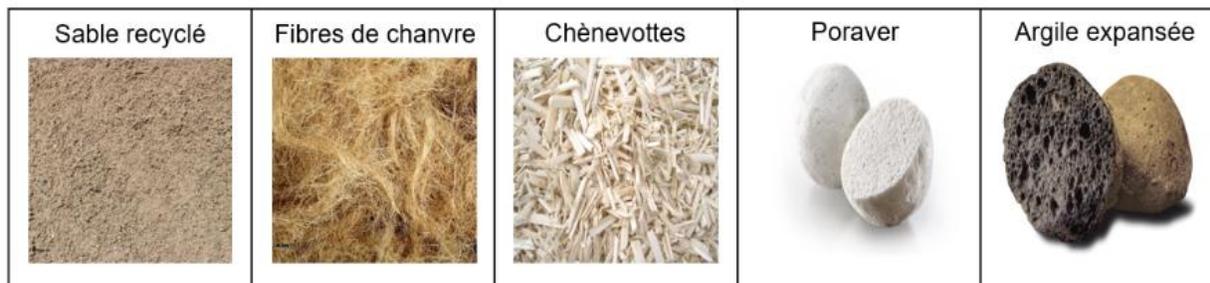


Figure II.1. Aspect des matériaux utilisés dans les pavés à base de sable recyclé

La composition massique des pavés à base de sable recyclé est illustrée dans le Tableau II.2. Le sable recyclé employé est caractérisé par un coefficient d'absorption d'eau de 9,2%. Les masses volumiques du sable recyclé, du ciment (CEM I 52,5), du métakaolin et de l'argile expansée sont respectivement égales à 2180, 3150, 2650 et 350 kg/m³. Les masses volumiques des autres matériaux ne sont pas mentionnées dans le rapport de stage. Les dosages massiques du ciment, du métakaolin et de l'eau, dans 1 m³ du mélange, sont égales à 300, 50 et 210 kg, respectivement, pour tous les pavés de cette série.

Tableau II.2. Composition massique des pavés à base de sable recyclé (0 - 4 mm)

Pavé	Spécification (% massique)	Masse du sable recyclé [kg] dans 1 m ³
SRO	Référence (sans addition)	1375
SRF0.1	0,1% de fibres de chanvre	1375
SRG1	1% de chènevotte	1375
SRG1F0.1	0,1% de fibres de chanvre et 1% de chènevotte	1375
P10	10% verre expansé (poraver)	1230
P20	20% verre expansé (poraver)	1100
AE40	40% argile expansée	820
AE60	60% argile expansée	550

La Figure II.2 illustre l'aspect de la surface sciée des pavés à base de sable recyclé.

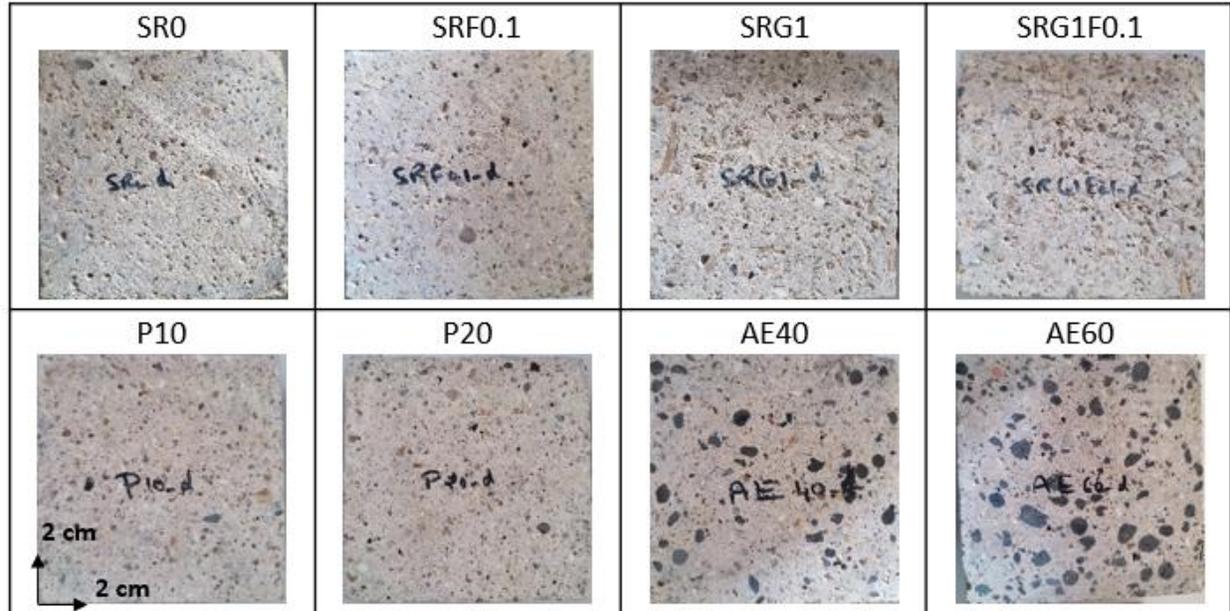


Figure II.2. Aspect de la surface sciée des pavés à base de sable recyclé

2.2. Série (BI) en béton isolant structurel

Les pavés issus de chantiers en béton isolant structurel sont numérotés de 1 à 13. Ils présentent une grande diversité dans leur couleur, leur texture et leur masse.

La Figure II.3 illustre l'aspect de la surface sciée de ces pavés.

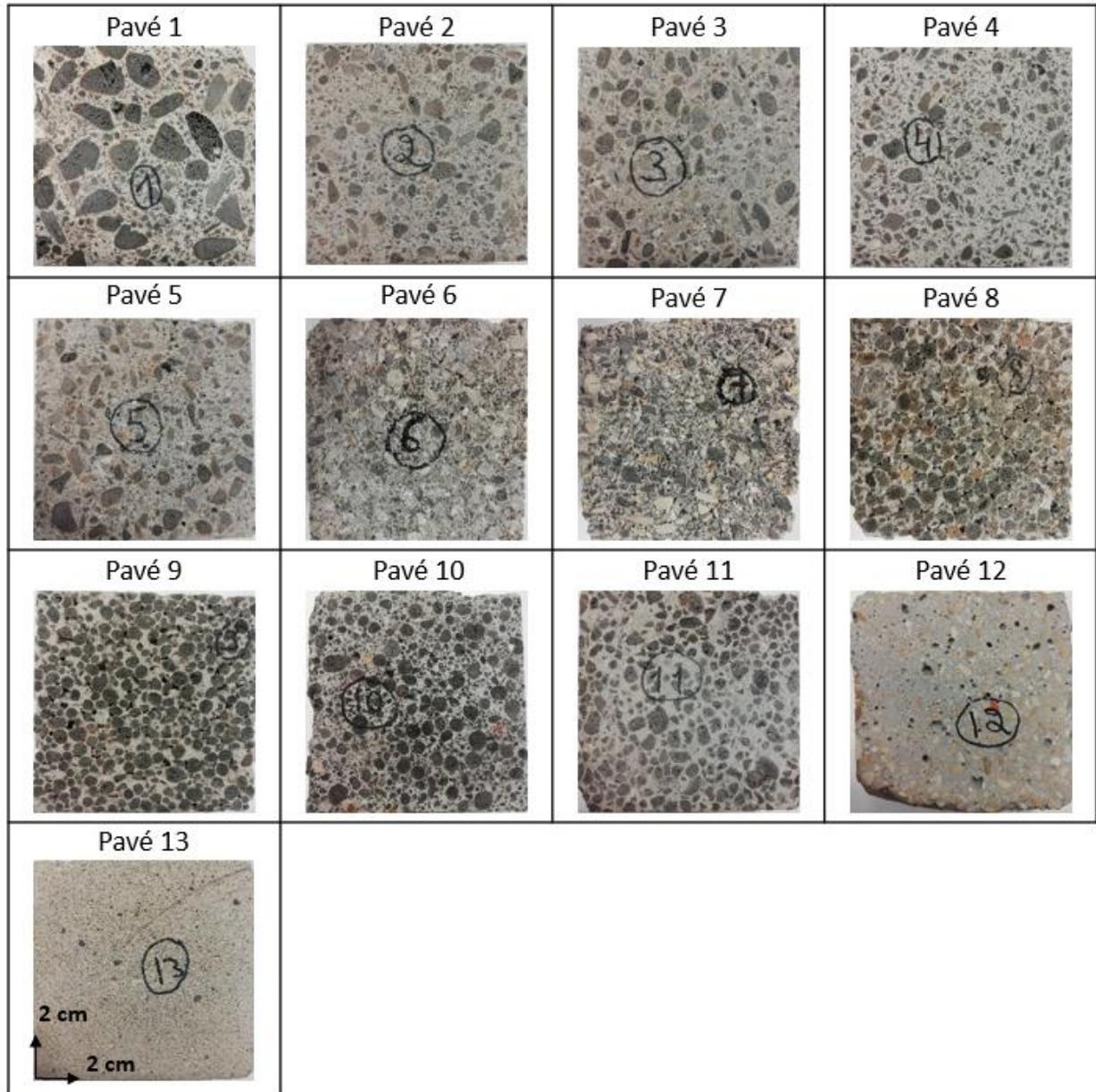


Figure II.3. Aspect de la surface sciée des pavés en béton isolant structural

3. Caractérisation thermo-physique des pavés

Par la suite, le travail expérimental de cette étude sera divisé en deux étapes.

Dans la première étape, les pavés seront caractérisés à travers leurs propriétés thermo-physiques. Nous nous focaliserons sur les propriétés les plus pertinentes pouvant être en relation avec l'effet rafraîchissant à la surface selon la littérature.

Dans la deuxième étape, ces pavés seront exposés au soleil pendant trois jours estivaux ensoleillés de manière à relever leurs températures de surface dans un état humide ou dans un état sec.

Les deux objectifs principaux de cette expérimentation sont les suivants :

- i) trouver une corrélation entre la température de surface et les propriétés thermo-physiques évaluées ;
- ii) utiliser ces propriétés dans la partie numérique du chapitre IV.

3.1. Caractérisation physique

3.1.1. Porosité ouverte et masses volumiques

3.1.1.1. Définition

Les pavés étudiés dans ce travail représentent des matériaux polyphasiques. Ils sont formés de trois phases distinctes dans l'état non saturé, comme le montre le schéma de principe de la Figure II.4 :

- une phase solide, de volume (V_s), formée par les granulats et la pâte de ciment durcie,
- une phase liquide qui est l'eau de volume (V_w),
- une phase gazeuse qui renferme l'air et la vapeur d'eau de volume (V_g).

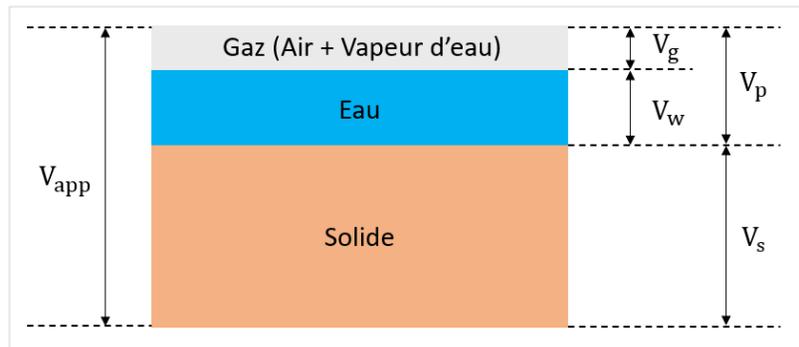


Figure II.4. Constituants d'un matériau poreux non saturé

Puisque l'eau et le gaz occupent les vides dans ces matériaux, la somme des volumes de ces deux constituants représente le volume de pores (V_p) :

$$V_p = V_w + V_g \quad \text{II.1}$$

Le volume total d'un matériau poreux est souvent nommé volume apparent (V_{app}). Il est la somme entre le volume de la matrice solide (V_s) et le volume de pores (V_p) :

$$V_{app} = V_s + V_p \quad \text{II.2}$$

La Figure II.5 représente un schéma illustratif d'un matériau poreux, dans lequel on définit :

- le volume des pores ouverts ($V_{p,o}$), qui est la somme entre le volume des pores ouverts interconnectés et le volume des pores ouverts non interconnectés. Les pores ouverts sont ceux qui peuvent être occupés par un fluide. De plus, les pores ouverts connectés sont ceux qui permettent au fluide de traverser le matériau d'un côté à un autre.
- le volume des pores total (V_p), qui est la somme entre le volume des pores ouverts ($V_{p,o}$) et le volume des pores fermés ($V_{p,f}$) :

$$V_p = V_{p,o} + V_{p,f} \quad \text{II.3}$$

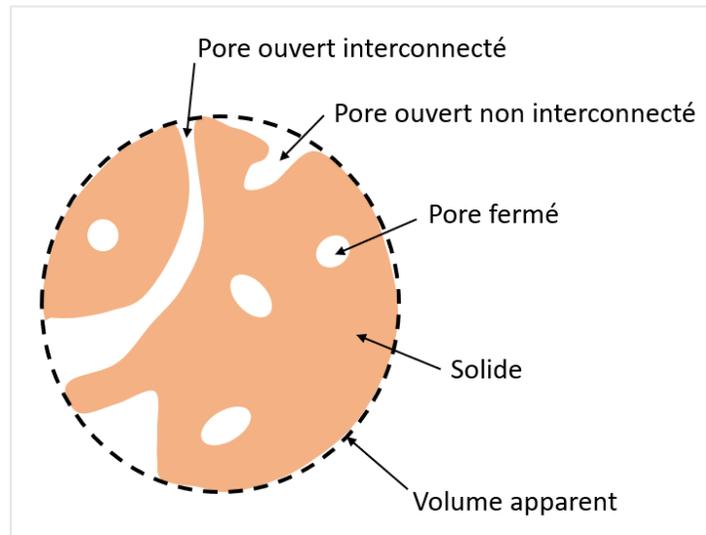


Figure II.5. Schéma illustratif d'un matériau poreux

En se basant sur ces notions, on peut définir les porosités suivantes :

- la porosité ouverte ou accessible (φ_o), qui est le rapport entre le volume de pores ouverts et le volume apparent :

$$\varphi_o = \frac{V_{p,o}}{V_{app}} \quad \text{II.4}$$

- la porosité fermée (φ_f), qui est le rapport entre le volume de pores fermés et le volume apparent :

$$\varphi_f = \frac{V_{p,f}}{V_{app}} \quad \text{II.5}$$

- la porosité totale (φ), qui est le rapport entre le volume total de pores et le volume apparent, et qui est aussi la somme entre la porosité ouverte et la porosité fermée :

$$\varphi = \frac{V_p}{V_{app}} = \frac{V_{p,o} + V_{p,f}}{V_{app}} = \varphi_o + \varphi_f \quad \text{II.6}$$

La porosité peut être exprimée en [%] ou comme une valeur sans unité variant entre 0 et 1.

Dans ce travail, on distingue deux types de masses volumiques :

- La masse volumique apparente sèche (ρ), qui représente le rapport entre la masse sèche du pavé (m_s) et son volume apparent (V_{app}) :

$$\rho = \frac{m_s}{V_{app}} \quad \text{II.7}$$

- La masse volumique du solide ou réelle (ρ_s), qui correspond au rapport entre la masse sèche du pavé (m_s) et le volume de la matrice solide (V_s) :

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad \text{II.8}$$

La relation qui relie les deux masses volumiques avec la porosité totale ($0 < \varphi < 1$), est donnée comme suit :

$$\rho_s = \frac{\rho}{1 - \varphi} \quad (\text{on peut écrire aussi } \varphi = 1 - \frac{\rho}{\rho_s}) \quad \text{II.9}$$

La masse volumique est souvent exprimée en [kg/m³].

3.1.1.2. Protocole d'essai

Dans ce travail, l'essai de porosité ouverte et de masses volumiques est réalisé selon la procédure AFPC-AFREM [67]. Cette procédure est basée sur des pesées hydrostatiques avec une balance de type Sartorius AG (précision $\pm 0,01$ g) et elle comporte les étapes suivantes :

- Saturer sous vide les pavés dans les dessiccateurs pendant 24 heures au moins,
- Peser le pavé saturé dans l'eau,
- Egoutter et essuyer les faces du pavé saturé par un papier absorbant,
- Peser le pavé saturé dans l'air,
- Sécher les pavés dans l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante (5 jours généralement),
- Peser le pavé séché à 105°C.

Il faut noter que l'intervalle de temps entre les deux pesées (dans l'eau et dans l'air), doit être le minimum possible pour éviter l'évacuation de l'eau, notamment dans le cas des pavés drainants. Le montage expérimental de cet essai est illustré par la Figure II.6.

La porosité ouverte φ_o [%] et la masse volumique apparente ρ [kg/m³] sont déterminées comme suit :

$$\varphi_o = \frac{m_{sat,a} - m_s}{m_{sat,a} - m_{sat,w}} \cdot 100 \quad \text{II.10}$$

$$\rho = \frac{m_s \cdot \rho_w}{m_{sat,a} - m_{sat,w}} \quad \text{II.11}$$

Avec,

$m_{sat,w}$: masse saturée du pavé dans l'eau [kg]

$m_{sat,a}$: masse saturée du pavé dans l'air [kg]

m_s : masse sèche du pavé [kg]

ρ_w : masse volumique de l'eau [kg/m³]



Figure II.6. Montage expérimental d'essai de porosité ouverte et masses volumiques

3.1.2. Capacités capillaires

3.1.2.1. Tension superficielle et mouillabilité

Pour définir la tension superficielle, l'exemple d'une goutte d'eau de forme quelconque, qui se trouve dans l'air en l'absence de gravité, est pris. Dans cette goutte, il existe deux types de molécules comme le montre le schéma de la Figure II.7 :

- Le premier type est formé par des molécules intérieures qui se trouvent au sein du liquide. Chaque molécule est attirée par ses voisines à travers les forces de Van de Waals. Ces forces sont dirigées dans toutes les directions, leur résultante est donc nulle.
- Le deuxième type est attribué aux molécules surfaciques qui se trouvent au niveau de l'interface eau-air. Chaque molécule est attirée par les molécules voisines à travers les forces de Van der Waals qui forment une demi-sphère, dont la résultante (F) est dirigée vers l'intérieur du liquide.

En présence de cette résultante, il apparaît à la surface une force intermoléculaire supplémentaire (dF) qui représente le produit entre la tension superficielle (γ) et la distance intermoléculaire (dl).

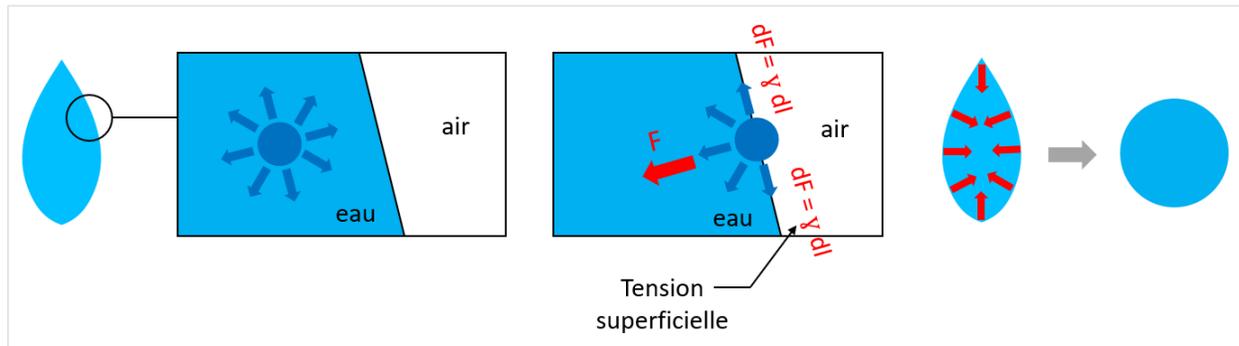


Figure II.7. Effet de la tension superficielle sur une goutte d'eau en l'absence de la gravité

Par conséquent, à chaque molécule de l'interface correspond une résultante des forces (F) qui tend à diminuer le volume de cette goutte d'eau. Mais puisque l'eau est un fluide incompressible, cette résultante ne peut pas réduire le volume de la goutte, elle peut uniquement diminuer sa surface latérale. De plus, la forme qui a la plus petite surface latérale pour le même volume, est sphérique. C'est pourquoi la goutte d'eau en l'absence de la gravité prend la forme sphérique. La tension superficielle est donc prise comme étant la force de traction par unité de longueur, qui tend à diminuer la surface d'un liquide dans laquelle elle se trouve et qui est donnée par la formule suivante :

$$\gamma = dF/dl \quad \text{II.12}$$

Avec,

- γ : tension superficielle [N/m]
- dF : force intermoléculaire supplémentaire à la surface [N]
- dl : distance intermoléculaire [m]

La tension superficielle est caractéristique de chaque liquide et elle varie avec la température et l'impureté de l'interface [68]. Pour l'eau en contact avec l'air, à 20 °C, la tension superficielle γ est égale à 0,073 N/m [68].

La mouillabilité représente la tendance d'une goutte d'un liquide à s'étaler sur une surface solide. Le schéma de la Figure II.8 montre une goutte d'eau qui se pose sur une surface solide, plane et horizontale, la goutte et le solide étant exposés au gaz.

Les forces agissantes sur P, le point d'intersection de ces trois phases, sont : $\gamma_{LS} \vec{dl}$, $\gamma_{LG} \vec{dl}$ et $\gamma_{SG} \vec{dl}$, où γ est la tension superficielle entre deux phases différentes.

Si le point d'intersection P est en équilibre, l'équation de Young (1805) est donnée par [69] :

$$\gamma_{SG} = \gamma_{LS} + \gamma_{LG} \cos(\theta) \quad \text{II.13}$$

$$\cos(\theta) = \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{LS}}{\gamma_{LG}} \quad \text{II.14}$$

Avec,

θ : angle de contact ou angle de raccordement [°]

γ_{SG} : tension superficielle solide-gaz [N/m]

γ_{LS} : tension superficielle liquide-solide [N/m]

γ_{LG} : tension superficielle liquide-gaz [N/m]

Si $\theta < 90^\circ$ ou $\cos \theta > 0$, le liquide est supposé mouillant.

Si $\theta > 90^\circ$ ou $\cos \theta < 0$, le liquide est considéré non mouillant.

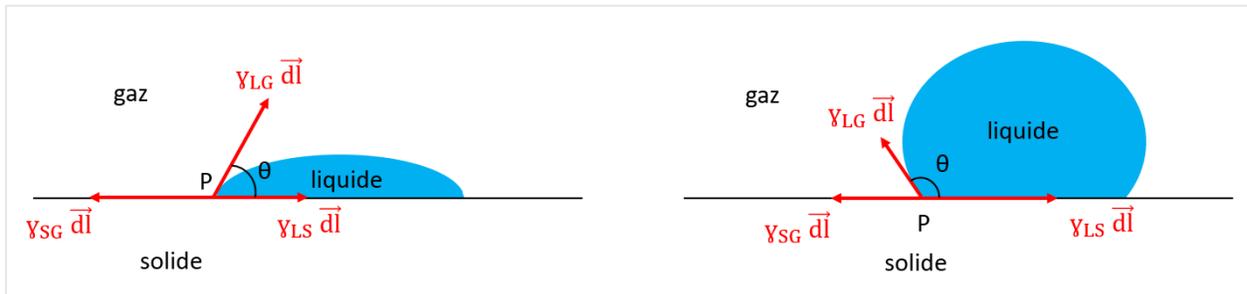


Figure II.8. Liquide mouillant (gauche) et liquide non mouillant (droite)

3.1.2.2. Ascension Capillaire

Le phénomène de capillarité intervient principalement dans les matériaux poreux, on le trouve souvent dans les sous-sols des bâtiments où l'humidité souterraine qui se trouve dans le sol remonte le long des murs à travers les fondations. L'origine de cette remontée est due à la différence de pression au niveau de l'interface eau-air. La loi de Jurin (1728) [70] permet de prédire la remontée maximale grâce à l'équilibre entre la force de la tension superficielle et le poids de la quantité de liquide remontée. En effet, si on place l'extrémité inférieure d'un tube circulaire vertical en contact avec la surface d'un liquide mouillant ($\theta < 90^\circ$) et que son extrémité supérieure est en contact avec l'air, ce liquide peut monter dans le tube pour former un ménisque concave (Figure II.9).

La hauteur maximale (H) du ménisque s'appelle ascension capillaire à l'équilibre, et elle est donnée comme suit [70] :

$$H = \frac{2 \gamma \cos(\theta)}{\rho_l g r_p} \quad \text{II.15}$$

Avec,

H : hauteur capillaire à l'équilibre [m]

γ : tension superficielle liquide - air [N/m]

θ : angle de contact ou angle que fait le ménisque avec la paroi du tube [°]

ρ_l : masse volumique du liquide [kg/m³]

g : accélération de la pesanteur [N/kg]

r_p : rayon interne du tube [m]

Selon cette relation, plus le rayon du tube est faible plus l'ascension est élevée.

La pression capillaire P_{cap} [Pa] peut être écrite comme suit :

$$P_{cap} = \frac{2 \gamma \cos(\theta)}{r_p} \quad \text{II.16}$$

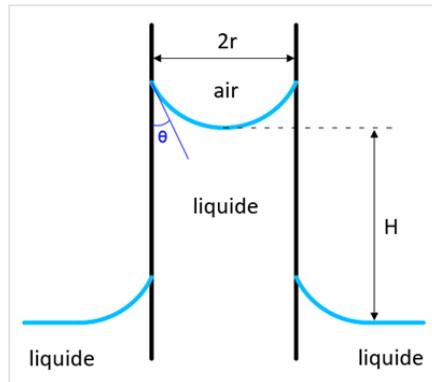


Figure II.9. Phénomène d'ascension capillaire

3.1.2.3. Absorption capillaire

Les pores dans un matériau poreux sont assimilés à des tubes cylindriques verticaux de rayon r_p et de hauteur L (Figure II.10).

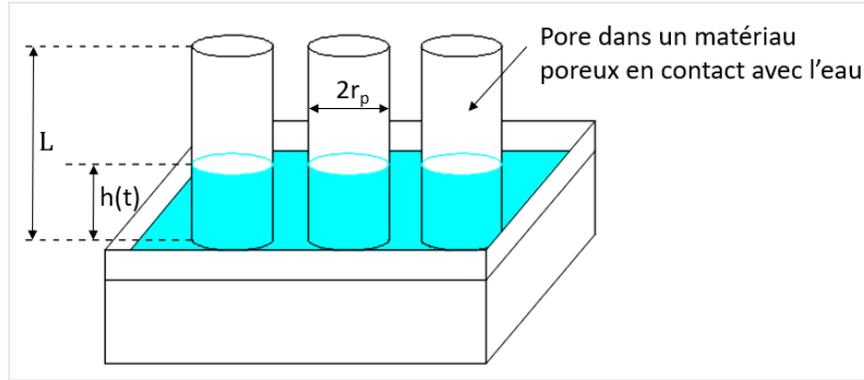


Figure II.10. Matériau poreux à tubes cylindriques verticaux identiques

L'ascension capillaire en fonction du temps est donnée par la relation de Washburn (1921) comme suit [71] :

$$h(t) \approx \sqrt{\frac{\gamma r_p \cos(\theta)}{2 \mu_w} \cdot t} \quad \text{II.17}$$

Avec,

- $h(t)$: ascension capillaire à l'instant t [m]
- γ : tension superficielle eau - air [N/m]
- r_p : rayon interne du tube ou du pore [m]
- θ : angle de contact eau-tube [°]
- μ_w : viscosité dynamique de l'eau [Pa.s]
- t : temps [s]

Par suite, le volume d'eau absorbé à l'instant t , $V_w(t)$, sera :

$$V_w(t) = h(t) A \varphi_o \quad \text{II.18}$$

Avec,

- A : section du matériau [m²]
- φ_o : porosité ouverte [-]

La masse d'eau absorbée à l'instant t , $m_w(t)$, est :

$$m_w(t) = \rho_w V_w(t) \quad \text{II.19}$$

Avec,

ρ_w : masse volumique de l'eau [kg/m³]

En remplaçant $V_w(t)$ par son expression (donnée par l'équation II.18) dans l'équation II.19 :

$$m_w(t) = \rho_w h(t) A \varphi_o \quad \text{II.20}$$

En divisant par la section (A) :

$$m_w(t)/A = \rho_w h(t) \varphi_o \quad \text{II.21}$$

Et en remplaçant $h(t)$ par son expression donnée par l'équation II.17, on trouve :

$$m_w(t)/A = \rho_w \varphi_o \sqrt{\frac{\gamma r_p \cos(\theta)}{2 \mu_w} \cdot t} \quad \text{II.22}$$

$$m_w(t)/A = A_{cap} \sqrt{t} \quad \text{II.23}$$

$$A_{cap} = \rho_w \varphi_o \sqrt{\frac{\gamma r_p \cos(\theta)}{2 \mu_w}} \quad \text{II.24}$$

A_{cap} représente le coefficient d'absorption capillaire exprimé en [kg.m⁻².h^{-0.5}]. Il dépend des caractéristiques du matériau (φ_o, r_p) et de celles de l'eau ($\rho_w, \mu_w, \theta, \gamma$).

En supposant que ces caractéristiques ne changent pas au cours du temps, A_{cap} est donc constant. Par conséquent, la courbe d'absorption capillaire montre une relation linéaire entre la masse d'eau absorbée par unité de surface ($m_w(t)/A$) et la racine du temps (\sqrt{t}).

Le tracé de de cette courbe est formé de deux parties (Figure II.11) :

- La première est une droite de pente positive passant par l'origine qui représente la phase d'absorption d'eau par les pores capillaires ($0 < \sqrt{t} < \sqrt{t_{eq}}$).
- La deuxième partie est une droite horizontale qui correspond à l'état d'équilibre entre les forces capillaires et la gravité pour lequel l'ascension capillaire et la masse d'eau absorbée atteignent leurs valeurs maximales ($\sqrt{t} > \sqrt{t_{eq}}$).

t_{eq} représente l'instant d'équilibre pour l'absorption capillaire.

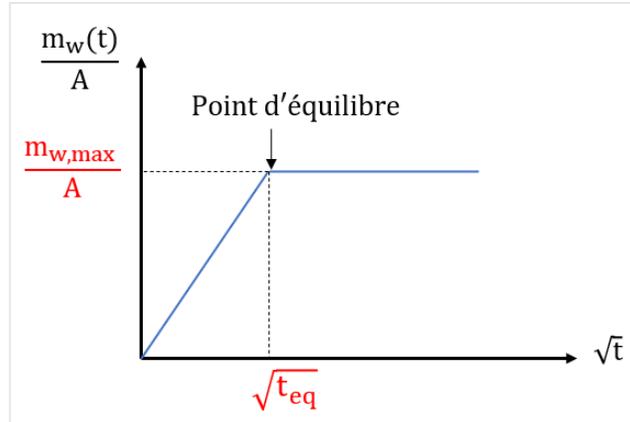


Figure II.11. Variation temporelle théorique de la masse d'eau capillaire absorbée

On définit également la teneur en eau capillaire (W_{cap}), exprimée en $[\text{kg}/\text{m}^3]$, qui est le rapport entre la masse d'eau absorbée maximale ($m_{w,max}$) et le volume apparent du pavé (V_{app}) :

$$W_{cap} = \frac{m_{w,max}}{V_{app}} \quad \text{II.25}$$

Dans ce travail, la capacité d'absorption capillaire se traduit par l'aptitude du matériau à absorber l'eau à travers ses pores capillaires lorsque sa base ou sa face inférieure est en contact continu avec l'eau. Cette caractéristique a une importance primordiale dans les deux types d'humidification : souterraine et surfacique. Dans le deuxième type d'humidification, le pavé ayant une capacité d'absorption capillaire importante pourra s'opposer aux forces gravitationnelles en faisant remonter une partie de l'eau descendante à travers ses pores capillaires interconnectés.

Il existe deux termes qui régissent la capacité d'absorption capillaire : la quantité et la rapidité. Le terme qui reflète la quantité d'absorption est W_{cap} , alors que celui qui traduit la vitesse d'absorption est A_{cap} . Ce dernier représente la première pente de la courbe d'absorption capillaire.

$$A_{cap} = \frac{m_{w,max}}{A \sqrt{t_{eq}}} \quad \text{II.26}$$

En réalité, cette courbe contient aussi une phase intermédiaire qui relie la phase d'absorption à la phase de saturation du matériau.

3.1.2.4. Protocole d'essai d'absorption capillaire

L'essai d'absorption capillaire est réalisé selon la norme NF EN ISO 15148 [72], dont le schéma est illustré par la Figure II.12.

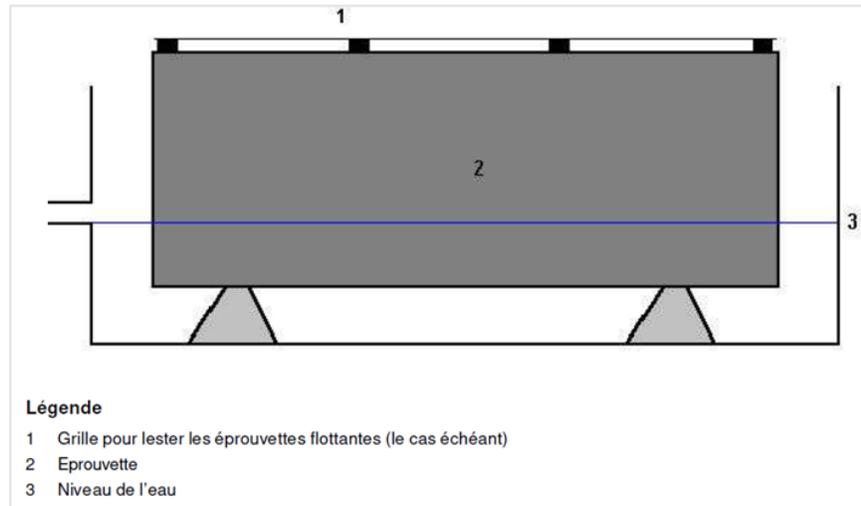


Figure II.12. Schéma d'essai d'absorption capillaire [72]

Le montage de cet essai est présenté dans la Figure II.13. Il consiste à placer les pavés préalablement secs, préconditionnés et scellés latéralement dans des bacs contenant du gravillon surmonté par une couche permanente d'eau. Le pré-conditionnement se réalise en plaçant les pavés dans les conditions d'essai, jusqu'à ce que l'écart de la masse du pavé soit inférieur à 0,1% pendant 24 h. Le scellement latéral est effectué à l'aide d'un ruban d'aluminium autocollant pour éviter toute évaporation latérale. Ce ruban ne couvre pas les 5 mm (± 2 mm) de la partie inférieure des faces latérales du pavé pour assurer un bon contact entre la base du pavé et la couche d'eau. L'augmentation de la masse d'eau absorbée est obtenue à l'aide d'une balance de type Sartorius AG (précision $\pm 0,01$ g), en appliquant la relation suivante :

$$m_w(t) = m(t) - m_i \quad \text{II.27}$$

Avec,

$m_w(t)$: masse d'eau absorbée à l'instant t [g]

$m(t)$: masse totale (pavé + eau) mesurée par la balance à l'instant t [g]

m_i : masse totale (pavé + eau) initiale [g]

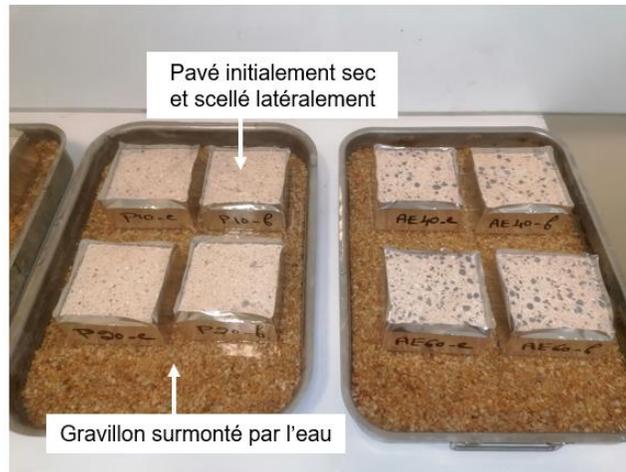


Figure II.13. Montage expérimental d'essai d'absorption capillaire

Les mesures sont effectuées jusqu'à atteindre l'état de saturation qui correspond à un palier dans la courbe d'absorption capillaire en fonction de la racine carrée du temps. La surveillance de la masse d'eau absorbée par le pavé est effectuée en suivant la démarche suivante pour chaque échéance :

- Sortir le pavé du bac en gardant le plan de sa surface dans un état horizontal,
- Egoutter, puis essuyer l'eau libre qui apparaît sur la base du pavé par un papier absorbant,
- Peser le pavé,
- Remettre le pavé dans le bac.

En général, l'absorption capillaire est très rapide au début de l'essai. Pour cela, les échéances de pesée sont réglées de sorte que les intervalles de temps qui les séparent soient très courts au début de l'expérience. Ces échéances sont fixées de la manière suivante : 0, 5 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 6 h, 8 h, 24 h, 48 h, 72 h (l'échéance de 72 h était suffisante pour atteindre l'état de saturation pour presque tous les pavés étudiés).

3.1.3. Conductivité hydraulique

3.1.3.1. Définition

La conductivité hydraulique (K) ou le taux d'infiltration d'eau est une caractéristique hydrique primordiale du matériau poreux. Elle représente son aptitude à se laisser traverser par l'eau sous un gradient de pression. La conductivité hydraulique est une propriété qui dépend à la fois des propriétés de l'eau et celles du matériau, alors que la perméabilité à l'eau liquide (K^*) est une propriété intrinsèque du matériau. Ces deux propriétés (K et K^*) sont proportionnelles entre elles selon l'égalité suivante [73] :

$$K = \frac{\rho_w g}{\mu_w} K^* \quad \text{II.28}$$

Avec,

- K : conductivité hydraulique [m/s]
- K^* : perméabilité à l'eau liquide [m²]
- ρ_w : masse volumique de l'eau [kg/m³]
- μ_w : viscosité dynamique de l'eau [Pa.s]
- g : accélération de la pesanteur [N/kg]

3.1.3.2. Protocole d'essai

Il existe deux types d'essai de conductivité hydraulique qui obéissent à la loi de Darcy (la vitesse de l'eau à l'intérieur du matériau est généralement faible). Le premier type est à charge hydraulique constante, alors que le second est à charge hydraulique variable [74]. Le choix du type d'essai dépend souvent de la perméabilité du matériau. Si le matériau est très perméable ou drainant, on choisit souvent la méthode à charge constante. En revanche, si le matériau est peu perméable ou non drainant, la méthode à charge variable sera plus adaptée. En tout cas, il faudra que le niveau d'eau qui surmonte le pavé soit toujours contrôlé pendant la durée d'essai prévue. Pour atteindre cet objectif, les pavés sont répartis en deux séries : une première série formée de 4 pavés drainants soumis à une charge hydraulique constante et une seconde constituée de 17 pavés non drainants exposés à une charge hydraulique variable.

3.1.3.2.1. Conductivité hydraulique à charge constante (pavés drainants)

L'essai de conductivité hydraulique à charge constante consiste à appliquer une charge d'eau constante à la surface du pavé saturé et à peser l'eau récupérée à sa base pendant une durée bien déterminée. Les pesées sont réalisées à l'aide d'une balance de type Sartorius AG (précision $\pm 0,01$ g). Cet essai est appliqué sur les pavés drainants 6, 7, 8 et 9. La Figure II.14 montre le schéma représentant cet essai, pour lequel la conductivité hydraulique (K) est calculée en appliquant la formule suivante [34,48,74] :

$$K = \frac{V_{rec} L}{h A t} \quad \text{II.29}$$

Avec,

- K : conductivité hydraulique [m/s]
- V_{rec} : volume d'eau récupéré dans le récipient [m³] pendant une durée t , ($V_{rec} = m_{rec}/\rho_w$)
- m_{rec} : masse d'eau récupérée dans le récipient [kg] pendant une durée t
- L : épaisseur du pavé [m]
- h : charge hydraulique appliquée [m] (dans notre travail, elle est réglée à 7 cm ou 0,07 m à l'aide d'une règle graduée (précision ± 1 mm))
- A : section du pavé en contact avec l'eau [m²]
- t : durée de l'essai [s]

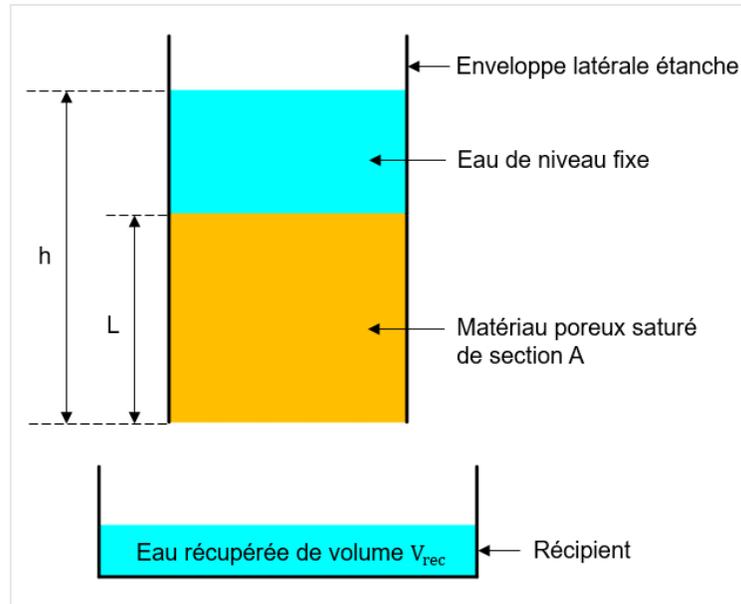


Figure II.14. Schéma d'essai de conductivité hydraulique à charge constante

Le montage expérimental de cet essai est illustré par la Figure II.15, et il comporte les étapes suivantes :

- Sceller les faces latérales du pavé par un ruban d'aluminium autocollant de 5 cm de largeur,
- Placer des plaques en plastique transparent (5 cm x 10 cm) aux bords du pavé à l'aide de la partie qui déborde du ruban d'aluminium. Cette partie est d'environ 0,5 cm de largeur vu que le pavé a une épaisseur de 4,5 cm,
- Assembler par des rubans d'aluminium de l'extérieur les plaques de plastique ensemble au niveau des coins,
- Sceller le contour intérieur du pavé ainsi que les coins intérieurs formés par les plaques de plastique par du silicone, dans le but d'obtenir une enveloppe latérale étanche qui entoure le pavé,
- Vérifier l'étanchéité latérale de l'enveloppe 24 heures après l'application du silicone,
- Saturer sous vide le système (pavé + enveloppe latérale) dans le dessiccateur pendant 24 heures au moins,
- Placer le système sorti du dessiccateur dans un seau d'eau pour conserver l'état de saturation du pavé,
- Vérifier la saturation du pavé juste avant de commencer l'essai. Cette vérification se fait en récupérant dans un récipient placé sous la base du pavé presque toute la même masse d'eau versée à sa surface (dans notre cas, le versement d'eau à la surface est répété jusqu'à ce que la masse récupérée soit supérieure ou égale à 99,8% de la masse versée),

- Commencer l'essai en mesurant à chaque fois la masse d'eau récupérée dans le récipient pendant une durée bien déterminée,
- Répéter l'étape précédente avec un délai qui empêche le séchage de la surface du pavé,
- Dans cet essai, 5 mesures, qui donnent un écart relatif par rapport à la moyenne (χ_i) inférieure à 1%, sont réalisées.

χ_i est donné par l'expression suivante :

$$\chi_i [\%] = \frac{|K_i - \bar{K}|}{\bar{K}} \cdot 100 \quad \text{II.30}$$

Avec,

K_i : conductivité hydraulique mesurée [m/s]

\bar{K} : conductivité hydraulique moyenne [m/s]

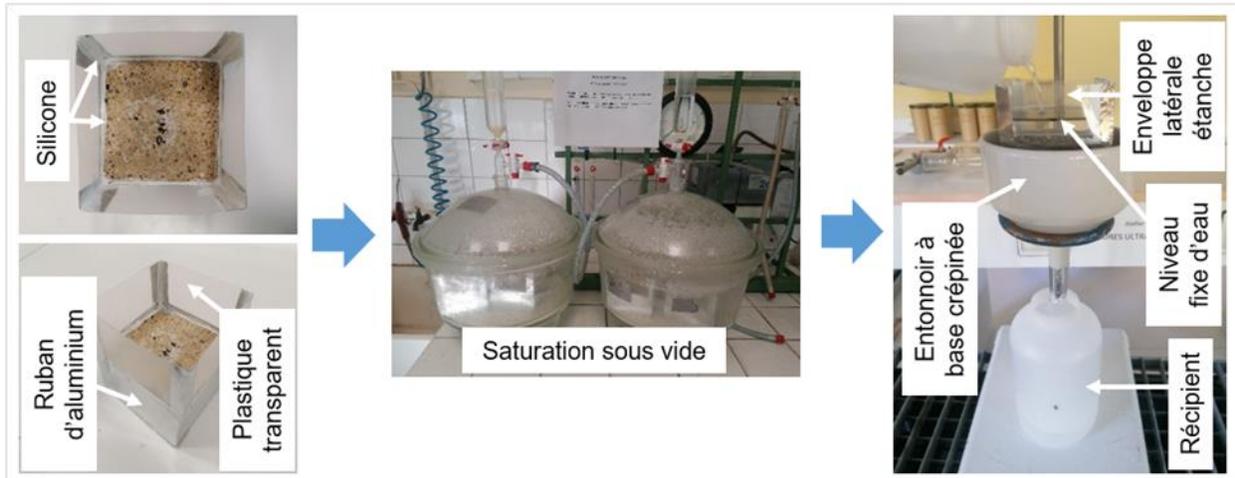


Figure II.15. Montage expérimental d'essai de conductivité hydraulique à charge constante

3.1.3.2.2. Conductivité hydraulique à charge variable (pavés non drainants)

L'essai de conductivité hydraulique à charge variable consiste à mesurer la chute de la charge d'eau qui surmonte la surface du pavé saturé pendant une durée bien déterminée. La hauteur d'eau dans le tube a été mesurée à l'aide d'une règle graduée (précision ± 1 mm). Cet essai a été appliqué sur les pavés non drainants (tous les pavés sauf pavés 6, 7, 8 et 9). La Figure II.16 montre le schéma correspondant, pour lequel la conductivité hydraulique (K) est calculée selon l'expression ci-après [33,43,74] :

$$K = \frac{a L}{A t} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad \text{II.31}$$

Avec,

K : conductivité hydraulique [m/s]

a : section intérieure du tube transparent [m²]

L : épaisseur du pavé [m]

A : section du pavé [m²]

t : durée de l'essai [s]

h_1 : charge hydraulique initiale [m]

h_2 : charge hydraulique finale après la durée t [m]

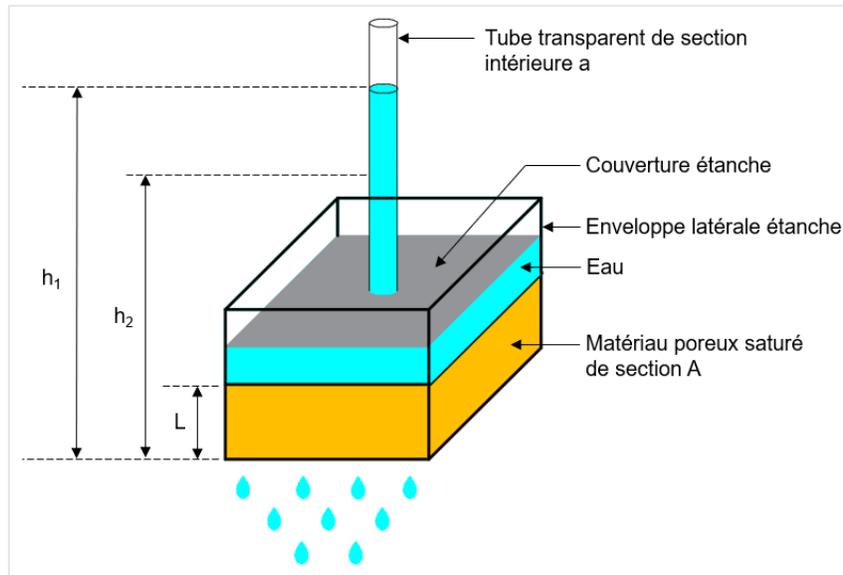


Figure II.16. Schéma d'essai de conductivité hydraulique à charge variable

La Figure II.17 illustre le montage expérimental de cet essai. Il a été réalisé en suivant les étapes ci-contre :

- Sceller les faces latérales du pavé par un ruban d'aluminium de 5 cm de largeur,
- Placer des plaques en plastique transparent (5 cm x 10 cm) aux bords du pavé à l'aide de la partie qui déborde du ruban d'aluminium. Cette partie est d'environ 0,5 cm de largeur vu le pavé a une épaisseur de 4,5 cm,
- Assembler par des rubans d'aluminium de l'extérieur les plaques en plastique ensemble au niveau des coins,
- Sceller le contour intérieur du pavé ainsi que les coins intérieurs formés par les tranches de plastique par de la silicone, dans le but d'obtenir une enveloppe latérale étanche qui entoure le pavé,
- Vérifier l'étanchéité latérale de l'enveloppe 24 heures après l'application du silicone,
- Préparer une couverture en plastique renforcé, de forme carrée de 10 cm de côté et de 4 mm d'épaisseur,

- Percer cette couverture pour obtenir un trou central de diamètre égal au diamètre extérieur du tube transparent en plastique. Dans notre cas, le tube a un diamètre intérieur et extérieur de 1,4 cm et 1,6 cm, respectivement.
- Fixer le tube transparent dans le trou de la couverture à l'aide de la silicone dans une direction verticale, puis attendre 24 heures pour assurer le séchage et l'étanchéité de la silicone,
- Ajuster le niveau de la couverture de sorte que le niveau de sa face inférieure ait une hauteur de 7 cm mesurée de la base du pavé,
- Fixer la couverture au niveau ajusté, et sceller le contour de la couverture qui est en contact avec les parois latérales avec du silicone, puis attendre 24 heures pour assurer le séchage et l'étanchéité du silicone,
- Saturer sous vide le système (pavé + enveloppe latérale + couverture + tube) dans le dessiccateur pendant 24 heures au moins. Le niveau de l'eau dans le dessiccateur doit être supérieur à celui de la tête du tube,
- Placer le système sorti du dessiccateur dans un seau d'eau pour conserver l'état de saturation du pavé,
- Placer le système sur une maille, qui est placée à son tour sur un bac,
- Remplir le tube par l'eau en agitant le système pour dissoudre l'air piégé entre la couverture et l'eau ajoutée, de manière que la surface du pavé soit toujours dans une position horizontale,
- Vérifier l'étanchéité du système,
- Commencer l'essai en versant de l'eau dans le tube avec une pipette jusqu'à une hauteur h_1 , puis avec une règle graduée au millimètre, mesurer la hauteur d'eau h_2 , après une durée bien déterminée t . Dans notre cas, $t = 24$ h et $h_1 = 20$ cm.
- Répéter l'étape précédente de sorte que le niveau d'eau ne descende pas au-dessous de la couverture, pour éviter la formation d'une couche d'air entre eux,
- Pour cet essai, on a pris 5 mesures qui donnent un écart relatif par rapport à la moyenne (χ_i) inférieure ou égale à 15%.



Figure II.17. Montage expérimental d'essai de conductivité hydraulique à charge variable

3.1.4. Taux d'évaporation

3.1.4.1. Définition

Dans ce travail, le taux d'évaporation du pavé est défini comme étant sa capacité à évaporer l'eau contenue dans ses pores, tant qu'il est alimenté par l'eau d'une manière continue au niveau de sa base. Le taux d'évaporation représente la perte de masse par unité de surface par unité de temps et il est souvent exprimé en $[g.m^{-2}.h^{-1}]$. Le taux d'évaporation entre deux instants consécutifs (t') et (t), noté $E(t)$, est calculé comme suit :

$$E(t) = \frac{(m' - m)}{A(t - t')} = \frac{|\Delta m|}{A \Delta t} \quad \text{II.32}$$

Avec,

m et m' : masses totales [g] mesurées par la balance aux instants t et t' , respectivement

A : section du pavé exposée au rayonnement [m^2]

$|\Delta m|$: masse d'eau évaporée [g] pendant la durée qui sépare les instants t' et t

Δt : durée qui sépare t' et t [h] (dans ce travail, cette durée est fixée à 1 heure)

Le taux d'évaporation des pavés a été calculé grâce à un essai d'exposition à un simulateur solaire dans les conditions intérieures, dont le protocole est détaillé dans la partie suivante.

3.1.4.2. Protocole d'essai

L'essai d'exposition au simulateur solaire nous a permis d'évaluer la variation du taux d'évaporation en fonction du temps. Ce taux d'évaporation sera employé pour valider le modèle, à l'état humide et dans les conditions réelles, développé dans le chapitre IV. De plus, cet essai nous a offert l'opportunité de mesurer l'évolution de la température de surface des pavés exposés à l'aide d'une caméra thermique, pour chercher la corrélation qui existe entre la température de surface et le taux d'évaporation.

Le schéma de l'essai d'exposition au simulateur solaire est illustré dans la Figure II.18.

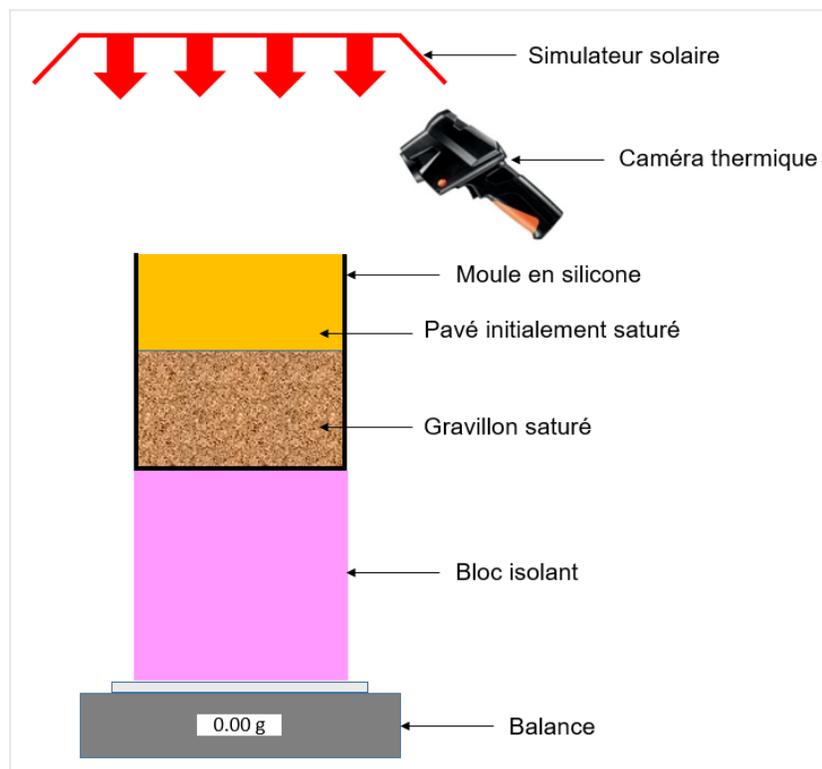


Figure II.18. Schéma d'essai d'exposition au simulateur solaire

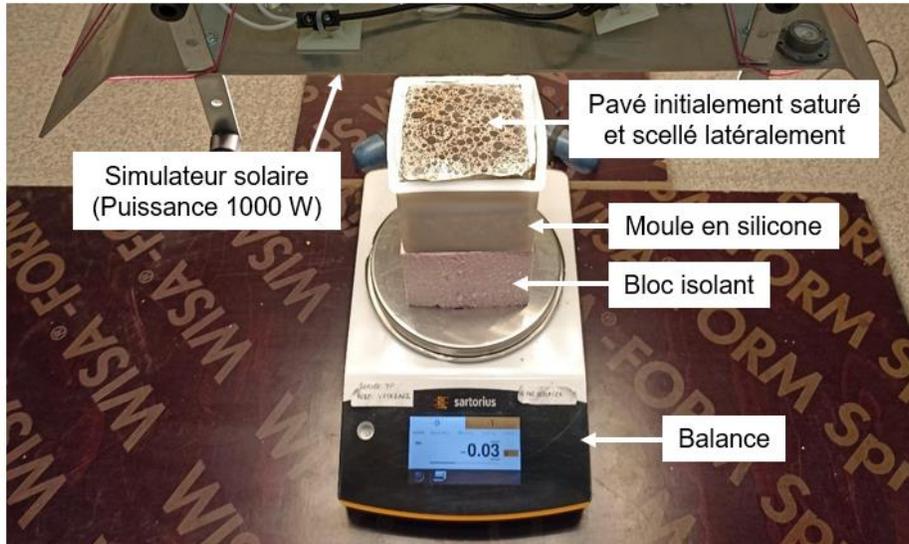
L'essai nécessite les éléments suivants :

- Un simulateur solaire de forme rectangulaire fournissant une puissance totale de 1000 W. Il renferme 20 lampes de type « Osram », de puissance 50 W chacune, placées sur 4 rangées.
- Un support de hauteur réglable consacré à supporter le simulateur,
- Un moule flexible en silicone, de forme cubique de 10 cm de côté, utilisé pour contenir le pavé et la couche de gravillon,
- Une caméra thermique de type « Testo 872 » pour mesurer la température de surface du pavé à un instant donné,
- Une balance de type Sartorius SQP (précision $\pm 0,01$ g) employée pour calculer le taux d'évaporation à travers la perte de masse,
- Un bloc isolant formé par le polystyrène extrudé intercalé entre le moule et la balance pour éviter le réchauffement de cette dernière,
- Une seringue graduée de capacité 20 ml utilisée pour injecter l'eau dans le moule pour garder la base du pavé saturée. L'embout de cette seringue est attaché à un tube coudé fin, pour éviter l'ombre de la main sur la surface du pavé pendant l'injection.

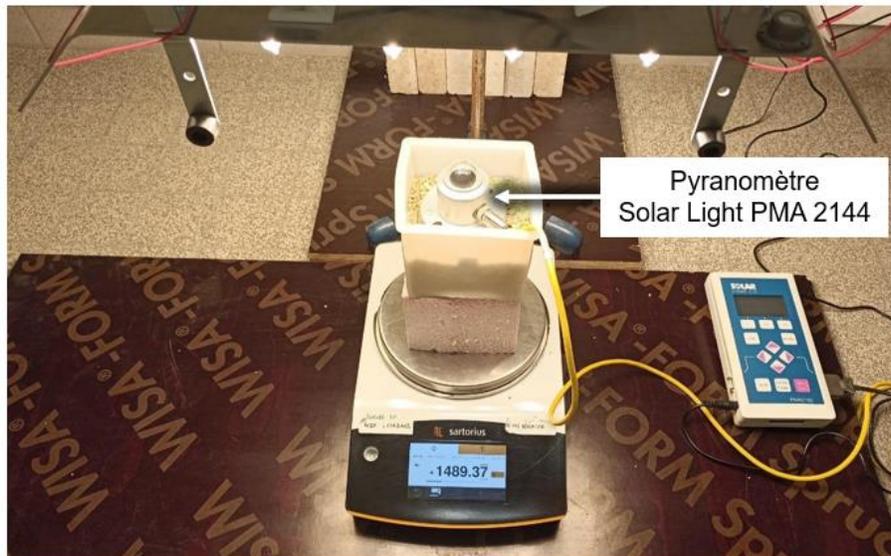
La caméra thermique est un dispositif qui peut détecter le rayonnement infrarouge émis par un corps et le convertir en un signal électrique. Ce signal sera ensuite traité pour générer une image électronique qui illustre la répartition de la température de surface du corps mesuré. Cette image est souvent appelée image infrarouge ou thermographie. Dans ce travail, la caméra thermique utilisée permet de mesurer la température instantanée dans une plage comprise entre -30°C et 650°C avec une précision de $\pm 2\%$ de la valeur mesurée ou $\pm 2^{\circ}\text{C}$. L'image infrarouge, détectée par cette caméra, possède une résolution de 320×240 pixels et se trouve dans une bande spectrale comprise entre 7,5 et 14 μm . Comme les pavés testés sont fabriqués en béton, l'émissivité dans la caméra a été réglée à une valeur de 0,9 tout au long de l'expérience d'exposition au simulateur solaire. Cette valeur est recommandée par la fiche technique de la caméra thermique pour le béton, elle est également employée par [22] dans leurs mesures thermographiques des pavés en béton et en asphalte.

Un logiciel « IRSoft » attribué à la caméra est employé afin d'évaluer la température de surface moyenne instantanée de chaque pavé à travers l'image infrarouge détectée.

Une image du montage expérimental est présentée dans la Figure II.19.



Un pyranomètre de type « Solar Light PMA 2144 » est employé pour mesurer le flux surfacique. Cet appareil est capable de capter le spectre radiatif avec des longueurs d'ondes comprises entre 300 et 2800 nm avec une précision de 0,5%. Avant de commencer l'expérience, le pyranomètre est placé au centre du moule flexible contenant du gravillon sec, de façon à ce que les faces supérieures du pyranomètre et du moule soient au même niveau horizontal (Figure II.20). Ensuite, le simulateur est ajusté en hauteur jusqu'à ce que le flux surfacique mesuré se stabilise à une valeur de l'ordre de 1000 W/m^2 .



L'essai d'exposition au simulateur solaire est appliqué sur des pavés initialement saturés dont les bases sont alimentées par l'eau. Chaque pavé est exposé au simulateur pendant 8 heures par jour en respectant la démarche suivante :

i) Avant l'essai :

- Sceller les pavés latéralement à l'aide d'un ruban d'aluminium sauf les 5 mm de la partie inférieure. Ceci permet d'éviter toute évaporation latérale d'une part, d'assurer un bon contact avec la couche d'eau qui alimente la base du pavé d'autre part,
- Saturer les pavés et les placer dans des seaux d'eau pour conserver leur saturation,
- Préconditionner les seaux et l'eau utilisée pour l'injection dans la salle d'essai pendant 24 heures au moins,
- Ajouter du gravillon dans les moules pour avoir une couche de 5,5 cm de hauteur,
- Saturer le gravillon par l'eau pendant 24 heures au moins, en gardant une couche d'eau surfacique de quelques mm.

ii) Pendant l'essai :

- Allumer le simulateur solaire pendant 10 minutes au moins pour assurer la stabilisation du flux,
- Sortir le pavé à tester du seau et le placer rapidement dans le moule,
- Mesurer la température de surface et prendre la masse du système chaque heure pendant 8 heures,
- Injecter 5 g d'eau dans le moule en utilisant la seringue aux échéances suivantes : 2 heures, 4 heures et 6 heures. Ce taux d'injection a été optimisé de façon à ce que la surface du gravillon reste toujours saturée d'une part, que l'eau injectée ne monte pas à un niveau proche de la surface du pavé d'autre part.

Cette optimisation a été réalisée en utilisant le pavé le plus poreux (pavé 8) et le pavé le plus dense (pavé 12). La masse d'eau injectée sera ensuite retranchée dans le calcul de la perte de masse par évaporation.

3.2. Caractérisation thermique des pavés et de leur surface

3.2.1. Mesure de l'albédo

3.2.1.1. Définition

L'albédo représente le rapport entre le rayonnement solaire réfléchi par une surface et le rayonnement solaire incident reçu par cette surface [75,76]. L'albédo est une grandeur adimensionnelle qui peut être exprimée en % ou comme une valeur comprise entre 0 et 1. Un albédo de 0 signifie que le rayonnement reçu est totalement absorbé par la surface. En revanche,

un albédo de 1, correspond à une réflexion totale de ce rayonnement. L'albédo de la surface dépend, entre autres, de sa couleur, sa rugosité, sa porosité etc.

Le spectre solaire représente la variation de l'énergie solaire en fonction de la longueur d'onde dans les trois domaines : ultraviolet, visible et infrarouge.

Une surface ayant un albédo de α %, permet d'atténuer ce spectre de cette valeur, autrement dit, le profil d'énergie dans les trois domaines cités descend de α % de sa valeur initiale au moment où il est absorbé par cette surface.

3.2.1.2. Protocole d'essai

Dans ce travail, l'albédo des pavés a été mesuré à travers un spectroradiomètre de type CS-1000, au laboratoire LAPLACE (LABoratoire PLasma et Conversion d'Energie). Ce type d'appareil permet de détecter l'émissivité d'une surface avec une précision d'ordre 4%, sur une gamme de longueurs d'onde dans le domaine visible entre 380 nm à 780 nm, dans un intervalle de 1 nm.

L'essai a été réalisé sur des pavés préalablement secs, selon le montage expérimental de la Figure II.21, en suivant la démarche suivante :

- Allumer le simulateur solaire et attendre une dizaine de minutes pour assurer la stabilité du rayonnement,
- Placer le spectralon sur le goniomètre en face du simulateur, de manière à détecter la partie centrale de sa surface par le spectroradiomètre. Le goniomètre permet d'ajuster l'angle de la face du pavé pour qu'elle soit parallèle à la lentille du spectroradiomètre. Le spectralon, ou blanc de référence, est un corps caractérisé par la plus grande réflexion diffuse parmi les matériaux et revêtements connus et ayant un albédo d'environ égal à 1,
- Mesurer l'émissivité du spectralon,
- Remplacer le spectralon par un pavé et positionner ce dernier de sorte à détecter la partie centrale de sa surface par le spectroradiomètre,
- Mesurer l'émissivité de la surface du pavé,
- Remplacer le pavé testé par un autre et mesurer l'émissivité de ce dernier jusqu'à la fin des mesures,
- Il est recommandé de remplacer le dernier pavé testé par le spectralon et mesurer de nouveau l'émissivité de ce dernier pour s'assurer de la stabilité du rayonnement pendant l'expérience.

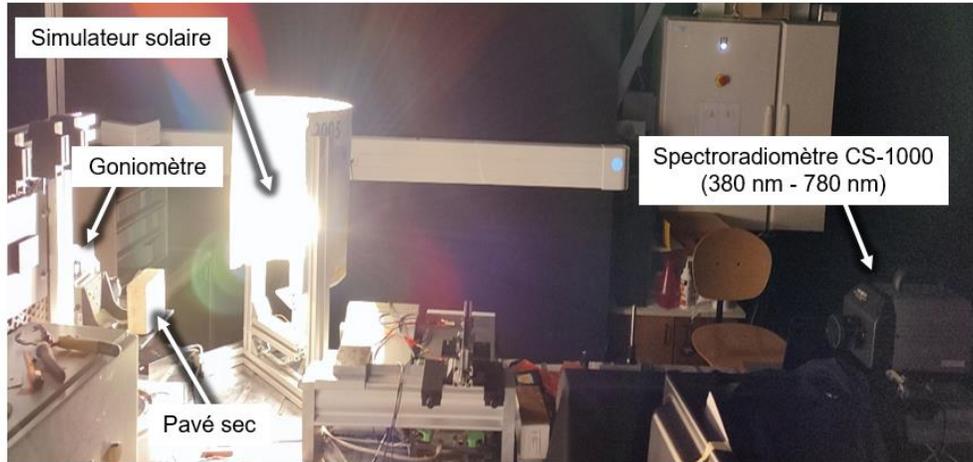


Figure II.21. Montage expérimental d'essai d'albédo

Pour chaque pavé étudié, chaque longueur d'onde (considérée comme un nombre entier) fournit 21 valeurs d'émissivité. Par conséquent, le spectre d'émissivité de chaque pavé est tracé à partir des valeurs moyennes d'émissivité calculées pour chacune des longueurs d'onde dans le domaine visible.

L'albédo du pavé (α) est déterminé en suivant la procédure ci-après :

- Tracer le spectre d'émissivité du pavé,
- Tracer le spectre d'émissivité du spectralon,
- Diviser le spectre d'émissivité du pavé par celui du spectralon pour obtenir le spectre de réflectivité du pavé :

$$\frac{\text{Spectre d'émissivité du pavé}}{\text{Spectre d'émissivité du spectralon}} = \text{Spectre de réflectivité du pavé} \quad \text{II.33}$$

- L'albédo (α) du pavé représente sa réflectivité moyenne calculée à partir de son spectre de réflectivité. Il est donné par la relation suivante :

$$\alpha = \frac{1}{(\lambda_b - \lambda_a)} \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \frac{\varepsilon_{\text{pavé}}(\lambda)}{\varepsilon_{\text{spectralon}}(\lambda)} d\lambda \quad \text{II.34}$$

Avec,

$\varepsilon_{\text{pavé}}(\lambda)$: émissivité du pavé à une longueur d'onde λ [-]

$\varepsilon_{\text{spectralon}}(\lambda)$: émissivité du spectralon à une longueur d'onde λ [-]

λ_a et λ_b : bornes de l'intervalle de mesure de λ (égales à 380 nm et 780 nm, respectivement)

3.2.2. Conductivité thermique

3.2.2.1. Définition

La conductivité thermique d'un matériau caractérise sa capacité à conduire la chaleur. Dans le cas des pavés exposés au rayonnement solaire, plus ces pavés sont conducteurs de chaleur, plus la chaleur se transfère rapidement de la surface chauffée vers la base plus froide.

3.2.2.2. Protocole d'essai

Dans ce travail, la conductivité thermique des pavés est mesurée à travers un lambda-mètre de type EP500 selon la méthode de la plaque chaude gardée donnée par la norme NF EN 12667 [77]. Cette méthode consiste à soumettre le pavé à un gradient de température appliqué entre ses deux faces et à mesurer la variation temporelle de sa conductivité thermique (k) jusqu'à sa stabilisation ou jusqu'à atteindre un régime permanent. La température de la plaque chaude supérieure est maintenue constante grâce à une puissance déterminée fournie par l'appareil. D'autre part, la température de la plaque inférieure atteint sa consigne après un flux descendant partant de la plaque chaude. L'appareil contient des capteurs qui permettent de mesurer les températures dans les deux plaques. Il renferme également un système de refroidissement pour que les températures des plaques restent proches des consignes imposées.

La mesure de la conductivité thermique est effectuée selon l'expression suivante avec une précision de 1,5% de la valeur mesurée :

$$k = \frac{P_m L}{A_{tot} (T_{chaud} - T_{froid})} \quad \text{II.35}$$

Avec,

P_m : puissance moyenne fournie dans la zone de mesure de la plaque chaude [W]

T_{chaud} : température moyenne du côté chaud du pavé [K]

T_{froid} : température moyenne du côté froid du pavé [K]

A_{tot} : aire de la zone de mesure [m²] (dans cet appareil, la zone de mesure est 15 cm x 15 cm)

L : épaisseur du pavé [m]

Dans notre étude, le régime permanent est considéré atteint lorsqu'une variation de conductivité thermique reste inférieure à 1% pendant 60 minutes. Cet essai de mesure de conductivité thermique nécessite des pavés préalablement secs et préconditionnés, dont le montage expérimental est illustré dans la Figure II.23. Le panneau isolant est formé par la laine de fibres de polyester, ayant une conductivité thermique d'ordre 0,038 W.m⁻¹.K⁻¹ (selon la fiche technique de l'appareil) permettant d'avoir un flux de chaleur unidimensionnel. Pour prendre en considération la variation de la conductivité thermique du pavé avec sa température, la moyenne de trois mesures distinctes, a été calculée. Ces mesures ont été menées de sorte que la

température moyenne de deux plaques soit égale à 35°C, 25°C et 15°C, respectivement, avec une différence de 10°C entre les températures des plaques. Par conséquent, cette plage de température (entre 15°C et 35°C) peut couvrir la variation de la température estivale qui peut affecter celle des pavés. Par exemple, pour la première mesure à 35°C, la température de la plaque chaude était égale à 40°C, alors que celle de la plaque froide valait 30°C.

Dans cette expérience, le lambda-mètre employé est conçu pour mesurer le flux de conduction à travers une section de 15 cm x 15 cm et non pas à travers une section de 10 cm x 10 cm. Par conséquent, ce lambda-mètre mesure le flux qui traverse simultanément le pavé et les pièces du panneau isolant comme le montre la Figure II.23. Pour cela, une correction théorique des valeurs de la conductivité a été réalisée.

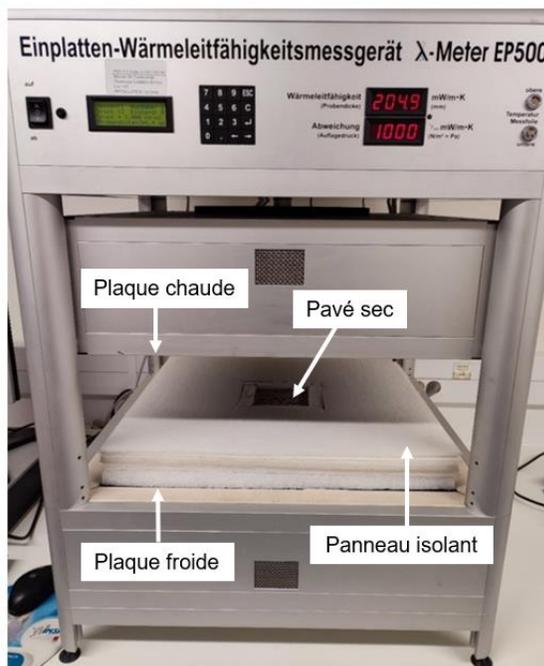


Figure II.23. Montage expérimental d'essai de conductivité thermique

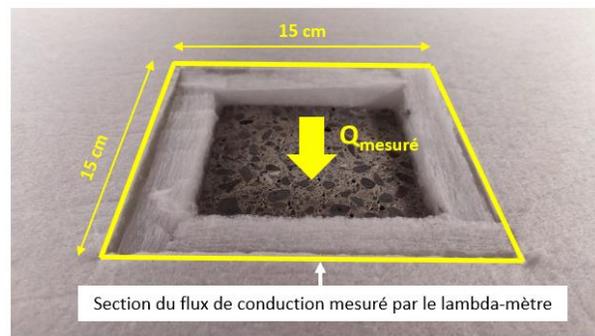


Figure II.23. Section du flux de conduction mesuré par le lambda-mètre

Cette correction est détaillée dans les étapes suivantes en partant de la définition générale du flux de conduction (Q) :

$$Q = k A \frac{\Delta T}{L} \quad \text{II.36}$$

Avec,

Q : flux de conduction [W/m^2]

k : conductivité thermique [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]

A : section traversée par le flux [m^2]

ΔT : différence de température entre la face chaude et la face froide [K]

L : épaisseur du matériau traversé par le flux [m]

$$\begin{aligned} Q_{\text{mesuré}} &= Q_{\text{pavé}} + Q_{\text{isolant}} \\ k_{\text{mesurée}} A_{\text{tot}} \frac{\Delta T}{L} &= k A \frac{\Delta T}{L} + k_{\text{isolant}} A_{\text{isolant}} \frac{\Delta T}{L} \\ k_{\text{mesurée}} A_{\text{tot}} &= k A + k_{\text{isolant}} A_{\text{isolant}} \\ k &= \frac{k_{\text{mesurée}} A_{\text{tot}} - k_{\text{isolant}} A_{\text{isolant}}}{A} \end{aligned}$$

Où,

$$A_{\text{tot}} = 15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} = 225 \text{ cm}^2; \quad A = 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} = 100 \text{ cm}^2; \quad A_{\text{isolant}} = A_{\text{tot}} - A = 125 \text{ cm}^2$$

$$k = \frac{k_{\text{mesurée}} \times 225 - k_{\text{isolant}} \times 125}{100}$$

$$k = k_{\text{mesurée}} \times 2,25 - k_{\text{isolant}} \times 1,25$$

$$k_{\text{isolant}} \approx 0,038 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$$

En remplaçant k_{isolant} par sa valeur dans l'équation précédente, on obtient :

$$k \approx k_{\text{mesurée}} \times 2,25 - 0,0475 \quad \text{II.37}$$

k et $k_{\text{mesurée}}$ représentent la conductivité réelle du pavé et la conductivité mesurée par le lambda-mètre, respectivement, exprimées en [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$].

3.2.3. Effusivité thermique, chaleur spécifique et diffusivité thermique

Dans cette partie trois propriétés thermiques ont été regroupées : effusivité, chaleur spécifique et diffusivité thermique. En effet, l'essai de mesure de l'effusivité permet de déduire les deux autres propriétés, en connaissant préalablement les valeurs de la conductivité thermique et de la masse volumique apparente.

3.2.3.1. Effusivité thermique

L'effusivité d'un matériau indique sa capacité à stocker la chaleur absorbée en son sein sans qu'il soit réchauffé significativement en sa surface. L'effusivité thermique caractérise également la sensation de chaud ou de froid que donne un matériau lors de son contact. À titre d'exemple, lorsqu'on marche pieds nus sur le marbre et sur le bois ayant tous les deux la même température de surface initiale, le marbre est ressenti comme un matériau plus froid. Ceci est dû au fait que le marbre possède une effusivité thermique supérieure à celle du bois et, par suite, il peut absorber rapidement l'apport de chaleur cédée par le pied sans que cet apport soit accumulé significativement sur sa surface.

Protocole de mesure de l'effusivité thermique

Dans ce travail, l'effusivité thermique (E_{th}) est mesurée par la méthode du plan chaud [78,79]. Cette méthode consiste à imposer un flux thermique sur la face du pavé à travers une sonde plane et à mesurer l'évolution de la température de cette face en fonction de la racine carrée du temps jusqu'à atteindre une variation linéaire pendant une durée bien déterminée. Dans ce cas-là, cette variation est donnée par :

$$T = \frac{2 Q_s}{\sqrt{\pi} \cdot E_{th}} \cdot \sqrt{t} \quad \text{II.38}$$

Avec,

T : température mesurée [K]

t : temps [s]

Q_s : flux de chauffage surfacique [W/m^2]

E_{th} : effusivité thermique [$\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-0.5}$]

La valeur de la pente stabilisée ($\frac{2 Q_s}{\sqrt{\pi} \cdot E_{th}}$) permet d'estimer l'effusivité thermique (E_{th}) du matériau. Cette méthode est basée sur un aspect théorique considérant que l'échantillon à caractériser est d'épaisseur suffisante et, par suite, il est ainsi traité comme un milieu semi-infini. Dans notre travail, on a considéré une durée de 100 s pour vérifier la linéarité de variation de la température en fonction de la racine carrée du temps.

L'essai de mesure d'effusivité thermique a été réalisé sur des pavés préalablement secs et préconditionnés, dont le montage expérimental est illustré par la Figure II.24. Ce montage est formé de trois dispositifs principaux : un boîtier d'alimentation pour régler la puissance électrique, un module d'acquisition qui permet de transférer cette puissance vers la sonde et un support de mesure dans lequel le pavé est introduit et qui renferme la sonde et les thermocouples. La sonde est constituée d'un circuit résistif et d'un thermocouple, elle permet d'exciter le pavé en température et de mesurer l'élévation de la température sur la face chauffée.

Le module d'acquisition est relié à un ordinateur qui permet de traiter les données à l'aide d'un logiciel nommé « DESPROTHERM ».

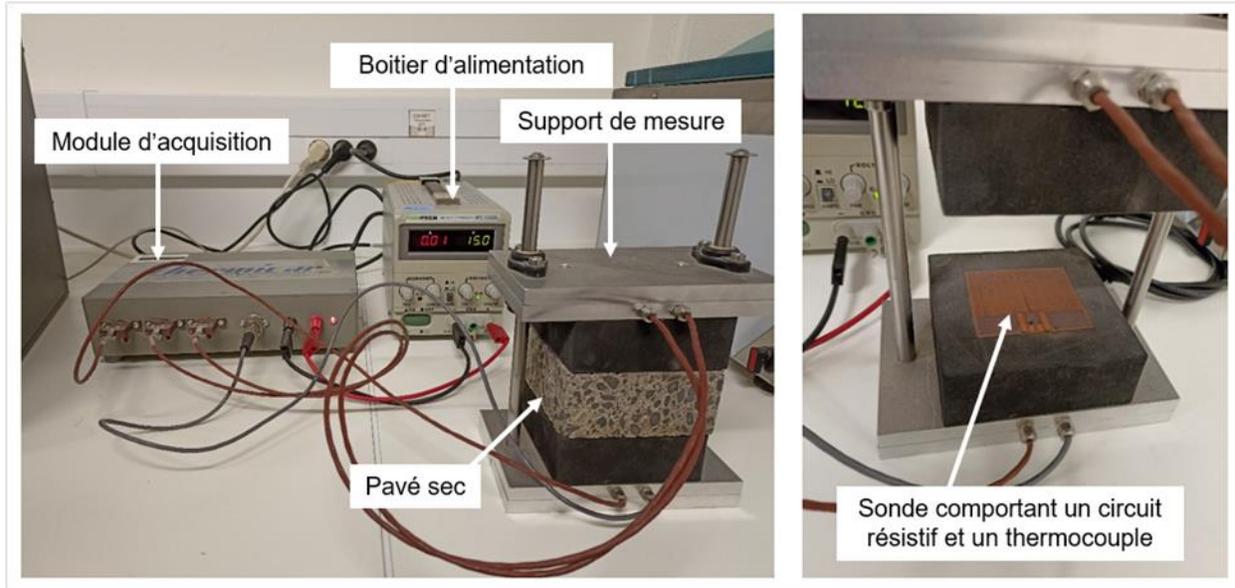


Figure II.24. Montage expérimental d'essai d'effusivité thermique

3.2.3.2. Chaleur spécifique

En thermodynamique, la chaleur spécifique (C_p), ou la capacité thermique massique, représente la quantité de chaleur qu'il faut apporter à 1 kg d'un matériau pour augmenter sa température moyenne de 1 K. Elle est souvent exprimée en $[J.kg^{-1}.K^{-1}]$. La chaleur spécifique est le rapport entre le carré de l'effusivité thermique et le produit entre la conductivité thermique et la masse volumique apparente :

$$C_p = \frac{E_{th}^2}{k \rho} \quad \text{II.39}$$

Avec,

C_p : chaleur spécifique $[J.kg^{-1}.K^{-1}]$

E_{th} : effusivité thermique $[J.m^{-2}.K^{-1}.s^{-0.5}]$

k : conductivité thermique $[W.m^{-1}.K^{-1}]$

ρ : masse volumique apparente $[kg/m^3]$

3.2.3.3. Diffusivité thermique

La diffusivité thermique (D_{th}) représente la vitesse à laquelle la chaleur se diffuse à travers un matériau. Elle est le rapport entre la conductivité thermique et la capacité thermique volumique. Cette dernière est le produit entre la masse volumique apparente et la chaleur spécifique.

La diffusivité thermique est donnée par l'expression suivante :

$$D_{th} = \frac{k}{\rho C_p} \quad \text{II.40}$$

Avec,

D_{th} : diffusivité thermique [m^2/s]

k : conductivité thermique [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]

ρ : masse volumique apparente [kg/m^3]

C_p : capacité thermique massique [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]

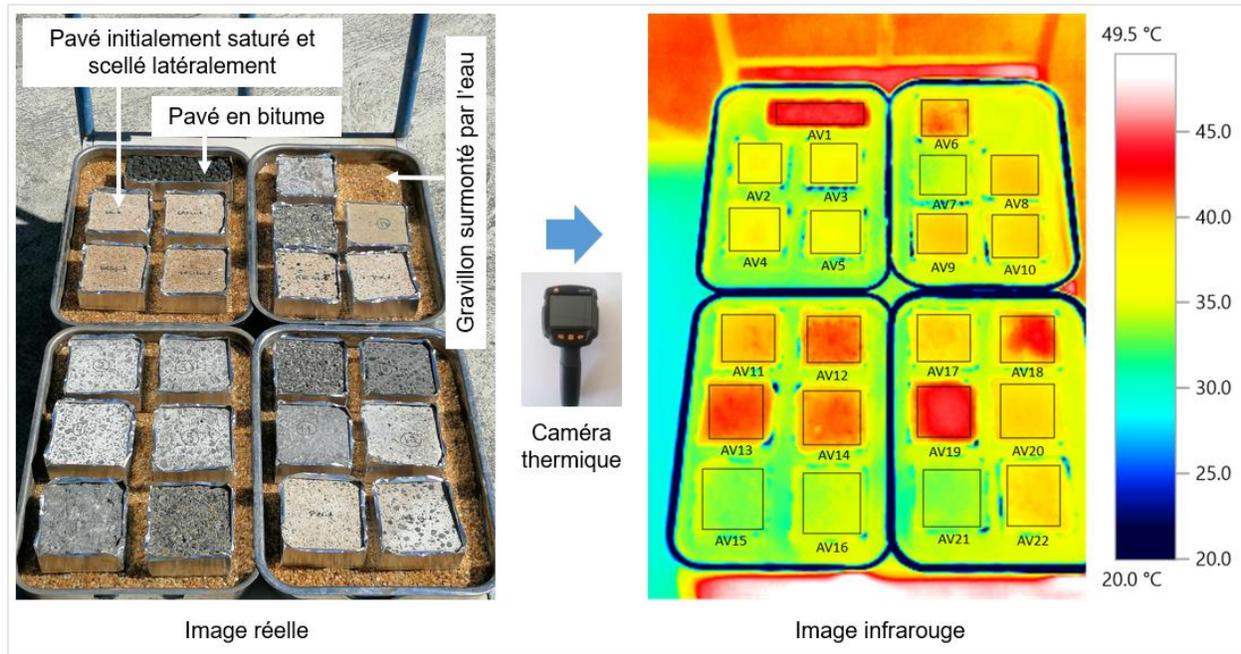
4. Exposition au rayonnement solaire et surveillance des températures de surface

Après la caractérisation thermo-physique des pavés, ces derniers sont exposés simultanément au rayonnement solaire dans un état humide et dans un état sec. L'objectif de cette expérience est de mesurer la variation de la température de surface des pavés en fonction du temps à l'aide de la caméra thermique « Testo 872 » et du logiciel « IRSoft » attribué à celle-ci. Ces deux outils ont été utilisés précédemment dans l'essai d'exposition au simulateur solaire. La valeur d'émissivité dans la caméra est gardée à 0,9 pendant l'expérience d'exposition dans les deux états, humide et sec.

4.1. Exposition à l'état humide

Les pavés à l'état humide ont été exposés au rayonnement solaire pendant trois jours ensoleillés en septembre 2020. Dans cet état, les pavés sont préalablement scellés latéralement, saturés sous-vide et préconditionnés, puis ils sont placés dans des bacs contenant des gravillons surmontés par une couche d'eau permanente. L'eau est versée de temps en temps dans les bacs pour éviter le séchage des gravillons. Les bacs sont placés sur un chariot et ce dernier est exposé pendant la journée au soleil et les températures de surface des pavés sont surveillées à l'aide de la caméra thermique. Pendant la nuit, ce chariot est placé dans une chambre climatisée de température et d'humidité relative contrôlées (20°C et 50%). L'objectif du stockage des pavés dans la chambre climatisée est qu'ils aient la même température de surface juste avant de commencer l'essai d'exposition.

La Figure II.25 montre le montage expérimental adopté pour surveiller les températures de surface. Les mesures sont réalisées chaque 30 minutes pendant 7 à 8 heures par jour. Un pavé en bitume, de couleur noire et qui n'absorbe plus d'eau par capillarité, est pris comme référence de température de surface.



4.2. Exposition à l'état sec

Dans le but d'étudier le comportement des pavés poreux à l'état sec, les pavés en béton préalablement séchés à $105 \pm 5^\circ\text{C}$ ont été exposés simultanément au rayonnement solaire pendant trois jours ensoleillés en août 2021. La même procédure que pour l'état humide a été adoptée pour surveiller la température de surface mais, ici, les pavés sont directement posés sur le chariot et non pas dans les bacs d'alimentation, comme le montre la Figure II.26. Les mesures sont réalisées chaque 1 heure pendant 9 heures par jour (de 10h00 à 19h00).

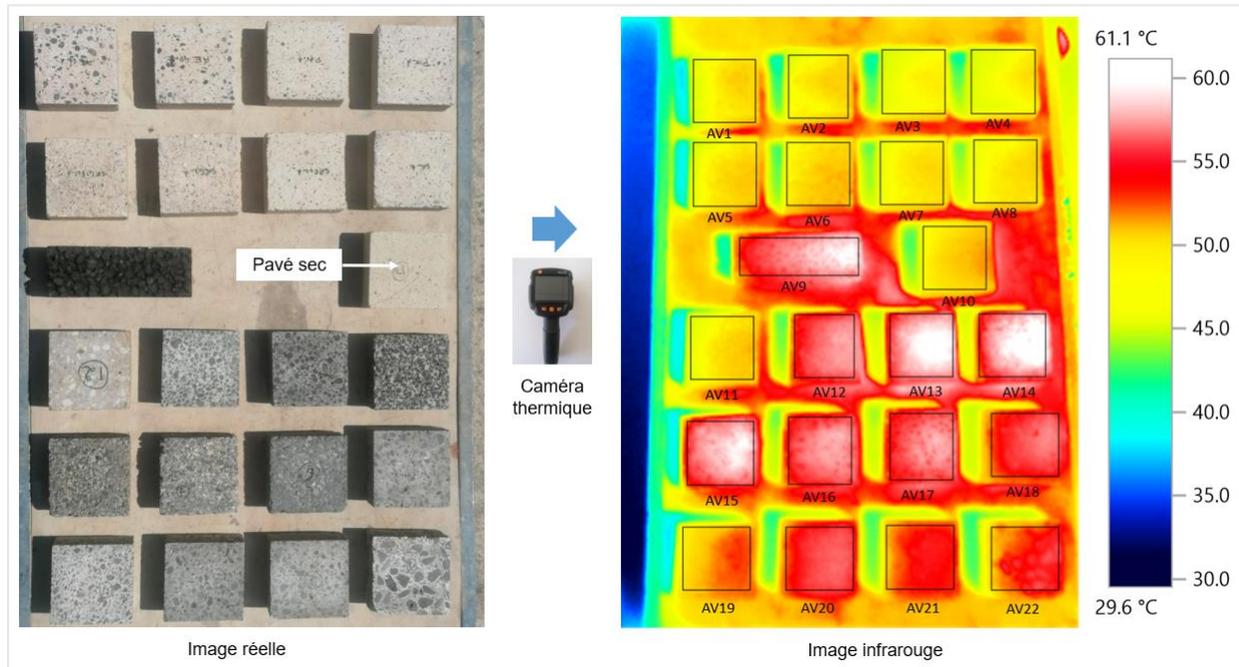


Figure II.26. Montage expérimental d'essai de mesure des températures de surface à l'état sec : à gauche pavés exposés au soleil, à droite image infrarouge des pavés

5. Conclusion

Dans ce chapitre, les deux séries des pavés étudiés ont été présentées, en fonction de leurs compositions ou leurs spécifications. Ensuite, les méthodes expérimentales de caractérisation de leurs propriétés thermo-physiques ont été présentées. La sélection de ces propriétés a été principalement basée sur l'analyse approfondie de la littérature.

Ces propriétés ont été divisées en deux catégories : les caractéristiques physiques comme la porosité ouverte, les capacités capillaires, la conductivité hydraulique, le taux d'évaporation, et les caractéristiques thermiques telles que l'albédo, la conductivité et l'effusivité thermique. Pour chaque propriété, le protocole d'essai (ou la norme) permettant de mesurer la propriété a été décrit. Deux méthodes différentes ont été développées pour mesurer la conductivité hydraulique selon la capacité de drainage du pavé. A la fin de ce chapitre, la procédure suivie dans le cadre de cette thèse pour surveiller la température de surface des pavés (en les exposant simultanément au rayonnement solaire extérieur pendant trois jours, à l'état humide et à l'état sec) a été présentée.

Le chapitre III sera consacré à expliciter les résultats obtenus lors des mesures des propriétés thermo-physiques mentionnées, ainsi qu'à la recherche de corrélations qui existeraient entre ces

propriétés et la température de surface des pavés. L'objectif final sera de déterminer quelles sont les propriétés les plus pertinentes sur l'effet de rafraîchissement à la surface.

Chapitre III : Caractérisation expérimentale des pavés et étude du potentiel de rafraîchissement

1. Introduction

Dans le chapitre précédent, les pavés étudiés ont été présentés et les méthodes adoptées pour évaluer leurs propriétés thermo-physiques ont été passées en revue. De plus, les procédures retenues pour relever leurs températures de surface, à l'état humide et à l'état sec, dans les conditions réelles d'extérieur pendant trois jours estivaux ont été détaillées. Dans ce chapitre, les résultats issus des mesures des propriétés thermo-physiques sont présentés et des corrélations entre ces propriétés et la température de surface des pavés seront recherchées. L'objectif de ces corrélations sera de déterminer quelles peuvent être les propriétés les plus pertinentes agissant sur l'effet de rafraîchissement à la surface d'un pavé. Les résultats du taux d'évaporation seront également employés pour valider le modèle numérique qui sera développé dans le chapitre IV.

2. Mesures des propriétés thermo-physiques

Cette partie vise à illustrer les résultats des propriétés thermo-physiques des pavés, en se basant sur les méthodes de caractérisation décrites dans le chapitre II.

Pour les essais répétés plusieurs fois, les barres d'erreur dans les graphes représentent les écart-types ($\pm \sigma_n$). L'écart-type (σ_n) est donné par l'expression suivante :

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad \text{III.1}$$

Avec,

x_i : valeur mesurée

\bar{x} : valeur moyenne

n : nombre de mesures

On définit également le coefficient de variation (CV) par l'équation suivante :

$$CV [\%] = \frac{\sigma_n}{\bar{x}} \cdot 100 \quad \text{III.2}$$

Dans ce travail, le coefficient de détermination (R^2) est employé pour évaluer les corrélations qui existent entre deux variables (x et y) et il est donné comme suit :

$$R^2 = \left[\frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum(y_i - \bar{y})^2}} \right]^2 \quad \text{III.3}$$

Avec,

x_i et y_i : valeurs mesurées des variables x et y , respectivement

\bar{x} et \bar{y} : valeurs moyennes des variables x et y , respectivement

Les nombres qui se trouvent après le signe (\pm) dans les tableaux récapitulatifs des résultats, représentent les incertitudes composées élargies, calculées suivant la méthodologie expliquée dans l'annexe 5.

2.1. Caractérisation physique

Dans le chapitre I, il a été constaté que pour diminuer la température de surface du pavé, il est primordial d'augmenter son flux d'évaporation en améliorant certaines propriétés physiques, comme la porosité et la perméabilité [29,33] et les capacités capillaires [35,36]. C'est pourquoi, dans cette partie, on s'intéresse à évaluer ces propriétés, dans le but d'examiner leur degré d'influence sur l'effet de rafraîchissement surfacique. De plus, les résultats du taux d'évaporation à travers l'essai d'exposition au simulateur solaire seront également présentés, dans le but de vérifier l'influence du taux d'évaporation sur la température de surface et d'utiliser ces résultats pour valider le modèle du chapitre IV.

2.1.1. Porosité ouverte et masses volumiques

La porosité ouverte représente la fraction volumique de pores ouverts qui se trouvent dans le pavé, alors que la masse volumique apparente correspond au rapport entre la masse sèche du pavé et son volume apparent. La masse volumique réelle est le rapport entre la masse sèche du pavé et le volume de la matrice solide. Elle peut être déduite à partir des valeurs de la porosité ouverte et de la masse volumique apparente.

Les résultats des mesures de porosité ouverte et de masse volumique apparente des pavés sont illustrés par l'histogramme de la Figure III.1. La porosité ouverte varie entre 15,9% (pavé 12) et 53,8% (pavé 8), alors que la masse volumique apparente varie entre 1043 kg/m³ (pavé 8) et 2238 kg/m³ (pavé 12). De plus, il peut être observé que les résultats de la série (BI) sont plus dispersés que ceux de la série (BS), pour les deux propriétés mesurées. Ce fait est traduit par les valeurs extrêmes qui correspondent aux pavés de la série (BI).

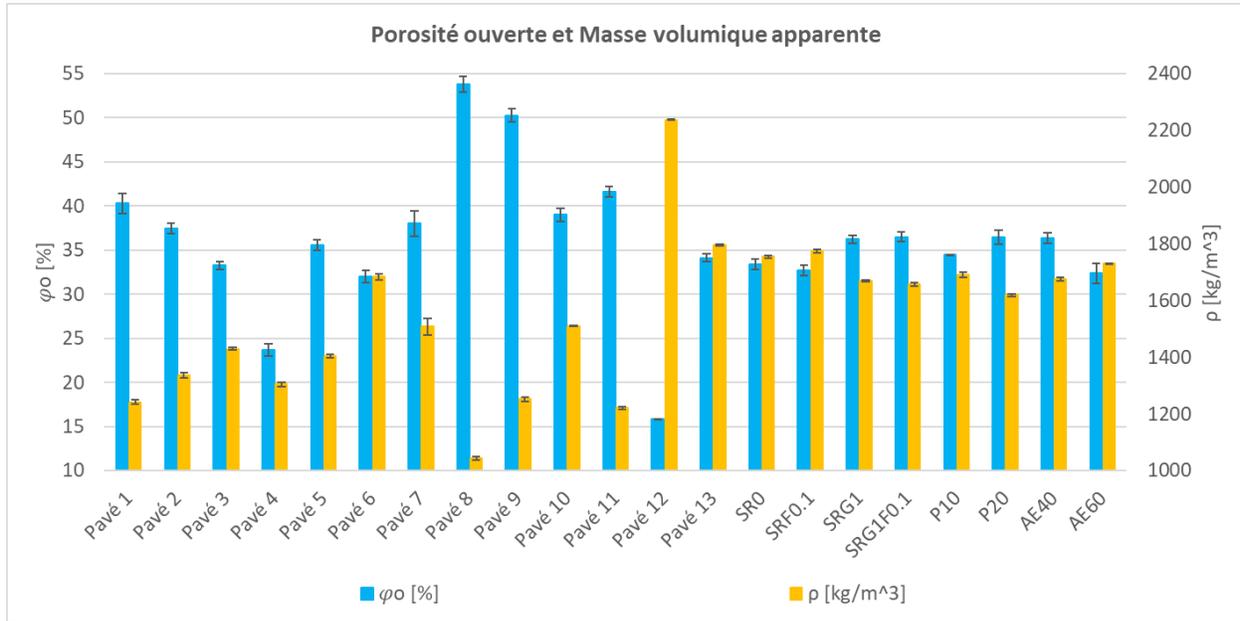


Figure III.1. Porosité ouverte et masse volumique apparente

En comparant ces valeurs avec celles de la littérature attribuées au béton, on trouve que les valeurs extrêmes de la porosité ouverte sont de l'ordre de 12% [61] et 40% [47], alors que celles de la masse volumique peuvent atteindre 1359 kg/m³ [50] et 2520 kg/m³ [62].

Ces résultats mettent en évidence l'importance de notre travail, traitant des pavés ayant des valeurs de porosité ouverte et de masse volumique qui franchissent les limites trouvées dans la littérature (la limite supérieure pour la porosité ouverte et la limite inférieure pour la masse volumique apparente).

La Figure III.2 montre une faible corrélation linéaire négative, de $R^2 = 0,53$, entre la masse volumique apparente et la porosité ouverte. Cependant, dans la littérature, des fortes corrélations linéaires ($R^2 > 0,88$) qui relient ces deux propriétés ont été trouvées, comme celles de [50], [56] et [59]. En général, plus que le volume de pores dans le pavé augmente, plus que sa masse sèche diminue. Cependant, une tendance opposée peut être observée quand les granulats naturels sont substitués par d'autres ayant une densité relativement supérieure [43,62].

Dans la Figure III.2, il peut être remarqué que la plupart des pavés (15 pavés), ont une porosité ouverte comprise entre 30% et 40%, avec une masse volumique qui varie entre 1330 kg/m³ et 1800 kg/m³. Le pavé 8 est le plus poreux (53,8%) avec une masse volumique légèrement supérieure à 1000 kg/m³, alors que le pavé 12 est le plus dense avec une masse volumique dépassant 2200 kg/m³ et une porosité de 15,9%. Un grand écart dans la masse volumique apparente est observé entre le pavé 12 et les autres pavés, avec une valeur supérieure à 400

kg/m³. Cette grande dispersion dans les résultats peut être attribuée à la diversité des propriétés et proportions des matériaux utilisés et aux procédures de compactage qui ont été adoptées pendant le coulage.

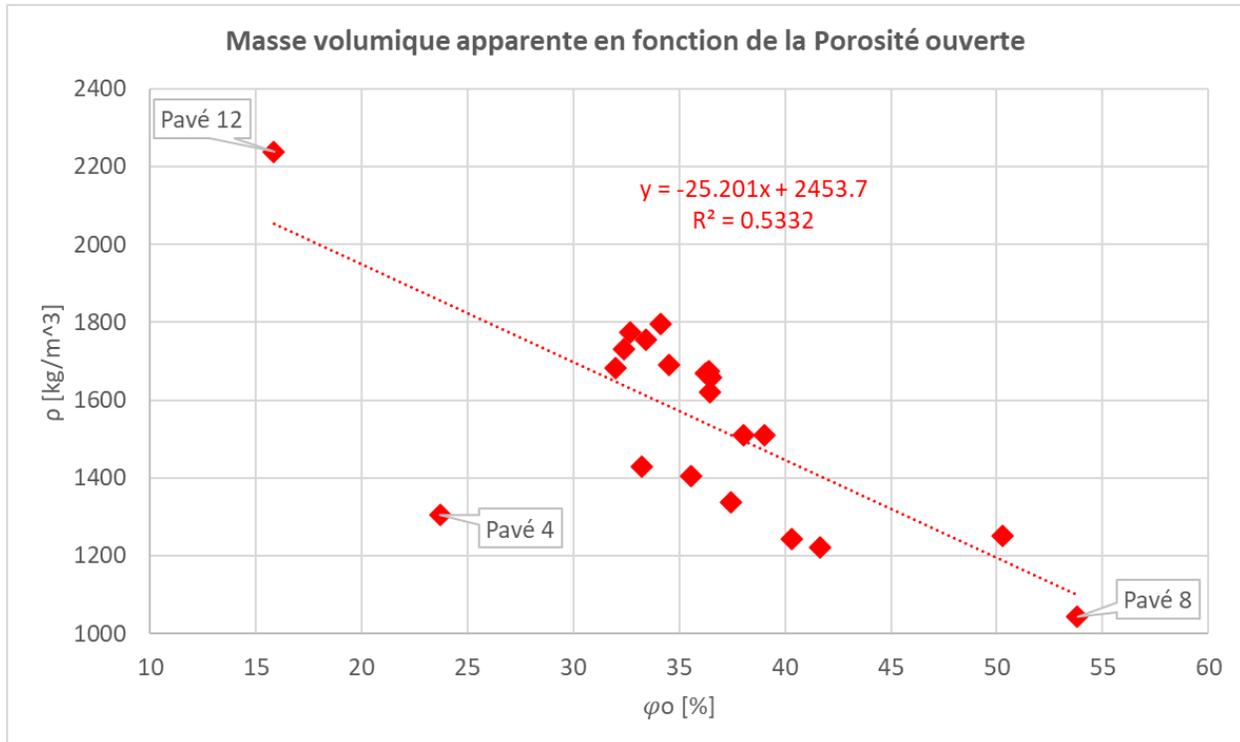


Figure III.2. Masse volumique apparente en fonction de la porosité ouverte

2.1.2. Absorption capillaire

L'absorption capillaire du pavé se traduit par sa capacité à absorber l'eau qui alimente sa face inférieure à travers ses pores capillaires. Cette propriété renferme la quantité absorbée, exprimée par W_{cap} (teneur en eau capillaire), et la vitesse d'absorption, désignée par A_{cap} (coefficient d'absorption capillaire).

La Figure III.3 illustre l'évolution de la masse d'eau absorbée en fonction de la racine carrée du temps pour l'ensemble des pavés étudiés. Comme il est mentionné par [35], ces courbes d'absorption sont composées généralement de trois phases :

- Une première phase d'absorption d'eau par les grands pores qui présente une augmentation linéaire importante de la masse d'eau absorbée.
- Une deuxième phase de transition, pendant laquelle l'eau est absorbée par les pores les plus petits, qui correspond à une diminution dans la pente d'absorption d'eau.
- Et finalement une troisième phase de saturation et de diffusion de l'air piégé dans les pores, représentée par un palier dans la courbe d'absorption.

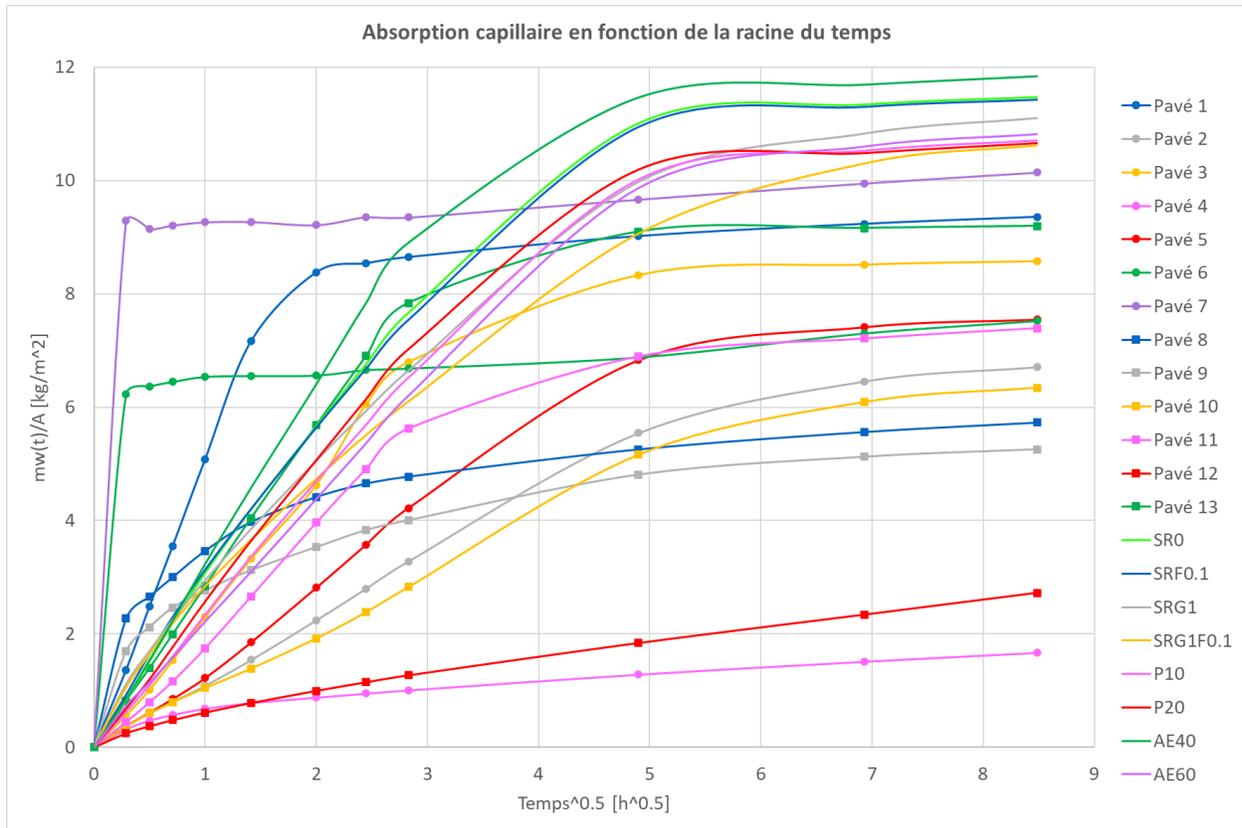


Figure III.3. Evolution de la masse d'eau absorbée en fonction de la racine carrée du temps

Dans la Figure III.3, on peut distinguer les pavés 6 et 7 qui ne montrent pas une phase transitoire et qui se saturent très rapidement par rapport aux autres. En effet, après 5 minutes du début d'essai, les pavés 6 et 7 atteignent 83% et 92% de leur saturation finale, respectivement. En revanche, il existe d'autres pavés comme les pavés 4 et 12, dont la phase de transition est très longue et qui ne semblent pas se saturer pendant la durée d'essai. A la fin de l'essai, les pavés P10 et P20 absorbent la même quantité d'eau, de l'ordre de 10,7 kg/m². A cet instant, le pavé SRG1F0.1 atteint une valeur d'environ 10,6 kg/m², presque égale à celle des pavés P10 et P20.

La teneur en eau capillaire W_{cap} , qui traduit la capacité de stockage d'eau capillaire par le pavé, et le coefficient d'absorption capillaire A_{cap} , qui reflète la vitesse d'absorption capillaire, peuvent être déterminés à partir de la courbe d'absorption capillaire en fonction de la racine carrée du temps, comme suit :

- La teneur en eau capillaire, W_{cap} [kg/m³], correspond à la masse d'eau absorbée à la fin de l'expérience ($m_{w,f}$) (après 72 h), divisée par le volume apparent du pavé (V_{app}) :

$$W_{cap} = \frac{m_{w,f}}{V_{app}} \quad \text{III.4}$$

- Le coefficient d'absorption capillaire, A_{cap} [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-0.5}$], représente la première pente de la courbe d'absorption :

$$A_{cap} = 1^{\text{ère}} \text{ pente de la courbe d'absorption capillaire} \quad \text{III.5}$$

L'histogramme de la Figure III.4 récapitule les résultats obtenus de W_{cap} et A_{cap} . W_{cap} varie entre $37,1 \text{ kg/m}^3$ (pavé 4) et $263,1 \text{ kg/m}^3$ (AE40), alors que A_{cap} peut varier entre $0,8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-0.5}$ (pavé 12) et $32,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-0.5}$ (pavé 7).

Dans la Figure III.4, Il peut être observé que les résultats de la série (BI) sont plus dispersés que ceux de la série (BS), pour les deux propriétés mesurées. De plus, à l'exception des pavés 1 et 7, les pavés de la série (BS) engendrent des teneurs en eau capillaires relativement élevées par rapport à celles de la série (BI), avec des valeurs dépassant 200 kg/m^3 . Cela est dû principalement aux matériaux hydrophiles qui constituent la série (BS) et qui tendent à absorber plus d'eau et à la stocker à l'intérieur du pavé.

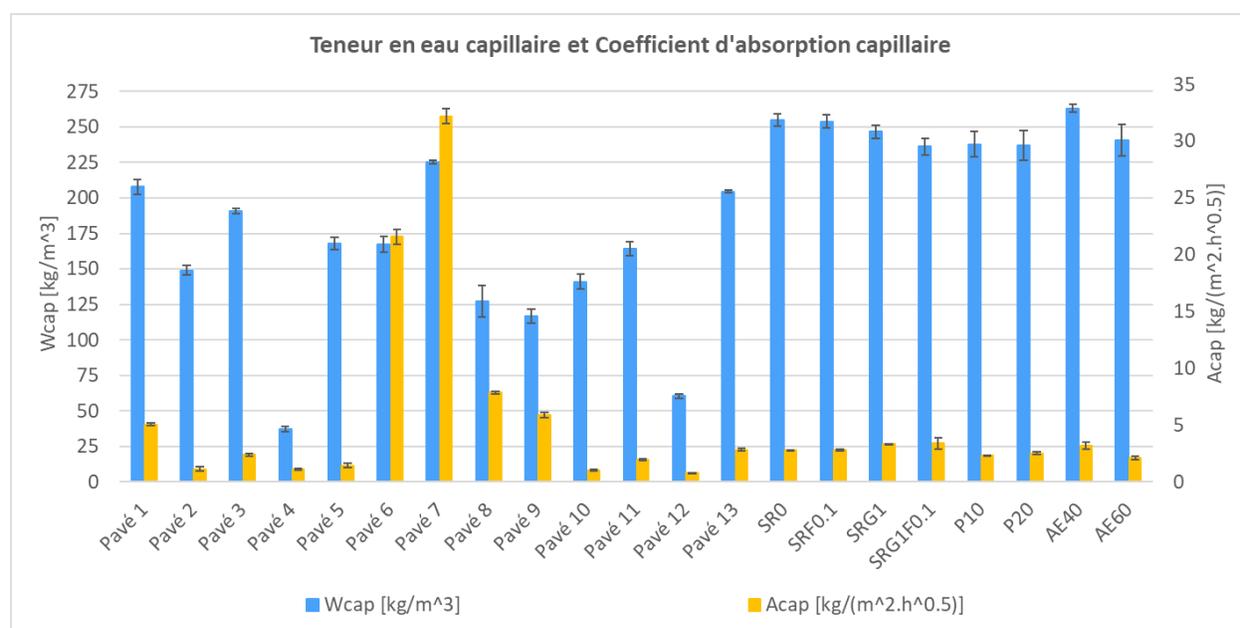


Figure III.4. Teneur en eau capillaire et coefficient d'absorption capillaire

La Figure III.5 montre que les deux propriétés caractérisant l'absorption capillaire ne sont pas corrélées entre elles. Il peut être observé que la plupart des pavés (16 pavés) ont un coefficient d'absorption capillaire inférieur à $5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-0.5}$. De plus, les pavés drainants (pavés 6, 7, 8 et 9) montrent des coefficients d'absorption capillaire (A_{cap}) supérieurs à ceux des pavés non drainants. Cela est dû principalement au rayon de pores qui semble être plus large dans les pavés drainants et qui tend à augmenter A_{cap} selon l'équation II.24 trouvée dans le chapitre II.

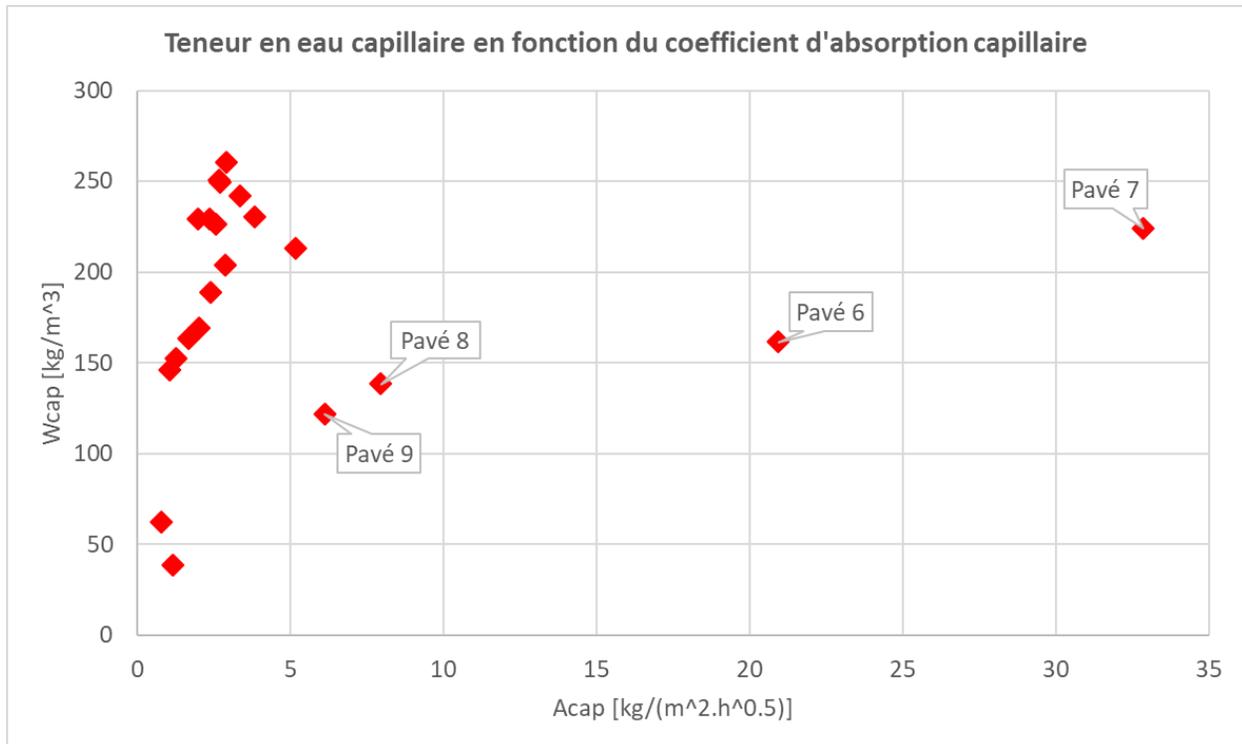


Figure III.5. Teneur en eau capillaire en fonction du coefficient d'absorption capillaire

2.1.3. Conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique du pavé représente son aptitude à se laisser traverser par l'eau liquide sous un gradient de pression. Elle reflète également l'interconnexion des pores ouverts à travers le pavé. Par conséquent, dans le cas d'une remontée capillaire, une bonne valeur de la conductivité hydraulique peut assurer une continuité dans les chemins capillaires qui alimentent la surface. En revanche, dans le cas des pavés denses ou à faible conductivité hydraulique, l'eau liquide pourra être bloquée dans les pores internes du pavé sans qu'elle puisse atteindre la surface pour s'évaporer. Dans ce travail, les résultats de la conductivité sont divisés en deux catégories selon la méthode employée, exigée par la nature des pavés. En effet, si le pavé peut drainer une couche d'eau de quelques centimètres pendant quelques minutes, la méthode à charge constante est adoptée, on parle donc d'un pavé drainant. Sinon, le pavé est considéré comme non drainant.

2.1.3.1. Pavés drainants

La conductivité hydraulique des pavés drainants est calculée par la méthode à charge constante, en se basant sur le volume d'eau récupéré à travers le pavé.

Les résultats de la conductivité hydraulique des 4 pavés drainants sont récapitulés par l’histogramme de la Figure III.6. Celui-ci montre que la conductivité hydraulique varie entre $5,068.10^{-4}$ m/s (pavé 9) et $2,485.10^{-3}$ m/s (pavé 8). La valeur maximale de l’écart-types (σ_n) vaut $5,965.10^{-6}$ m/s (pavé 7). Cette valeur relativement négligeable rend les barres d’erreur non remarquables sur les bâtons. La valeur maximale du coefficient de variance (CV) est de l’ordre de 0,4% (pavé 7). Cette précision dans les résultats est attribuée à l’écart relatif par rapport à la moyenne (χ_i), qui est limité à 1% pour toutes les mesures effectuées, comme il est indiqué dans le chapitre II.

Ces valeurs trouvées de conductivité hydraulique se situent dans les intervalles $[1,00.10^{-4}; 1,18.10^{-2}$ m/s] et $[1,00.10^{-4}; 8,50.10^{-3}$ m/s] mesurés pour le béton perméable par [56] et [64], respectivement.

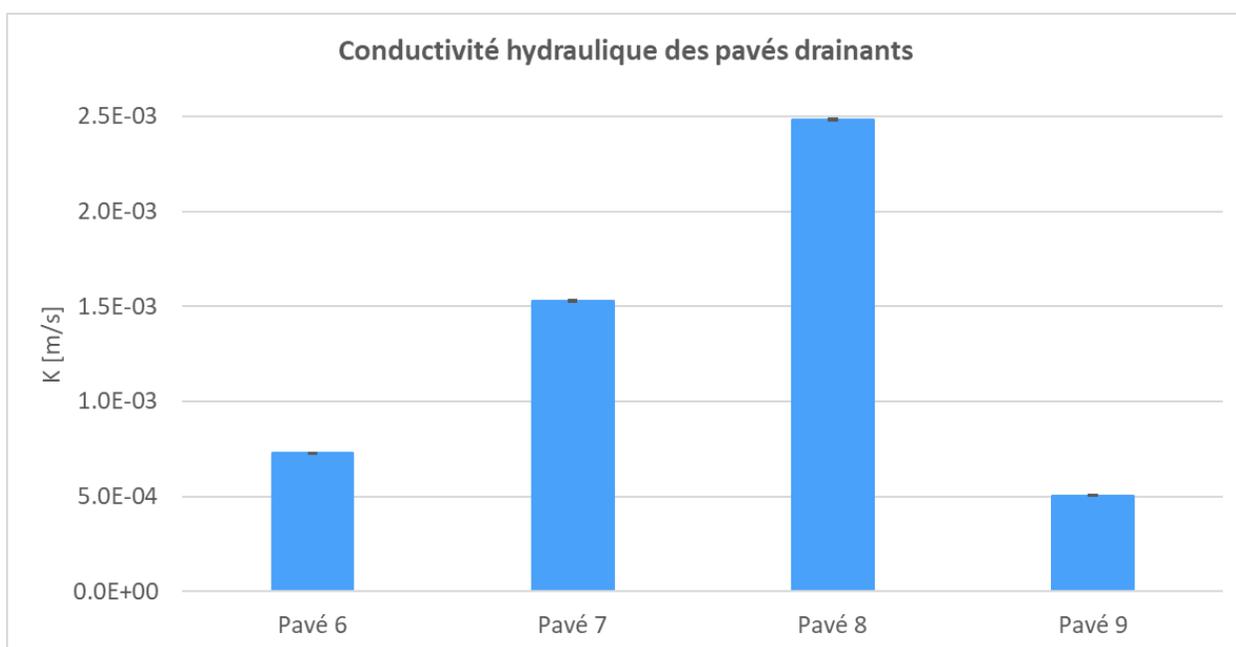


Figure III.6. Conductivité hydraulique des pavés drainants

2.1.3.2. Pavés non drainants

La conductivité hydraulique des pavés drainants, selon la méthode à charge variable, est basée sur la perte de hauteur d’eau qui surmonte le pavé.

Les résultats de la conductivité hydraulique des pavés non drainants, obtenus par la méthode à charge variable, sont résumés dans l’histogramme de la Figure III.7. L’histogramme montre que la conductivité hydraulique varie entre $1,243.10^{-10}$ m/s (pavé 4) et $4,702.10^{-9}$ m/s (AE40). Ces résultats de conductivité hydraulique sont beaucoup plus faibles que ceux trouvés dans la littérature, où la valeur la plus basse détectée est de l’ordre de $4,420.10^{-7}$ m/s [34]. Par

conséquent, les valeurs situées au-dessous de ce seuil confèrent à ce travail plus d'importance et de nouveauté dans la caractérisation des pavés.

En comparant ces résultats avec ceux des pavés drainants, un ordre de grandeur supérieur à 10^5 est trouvé. À la suite de cet essai, on peut distinguer les deux séries des pavés étudiés : les pavés drainants ayant une conductivité hydraulique supérieure à 5.10^{-4} m/s et les pavés non drainants caractérisés par une conductivité inférieure à 5.10^{-9} m/s.

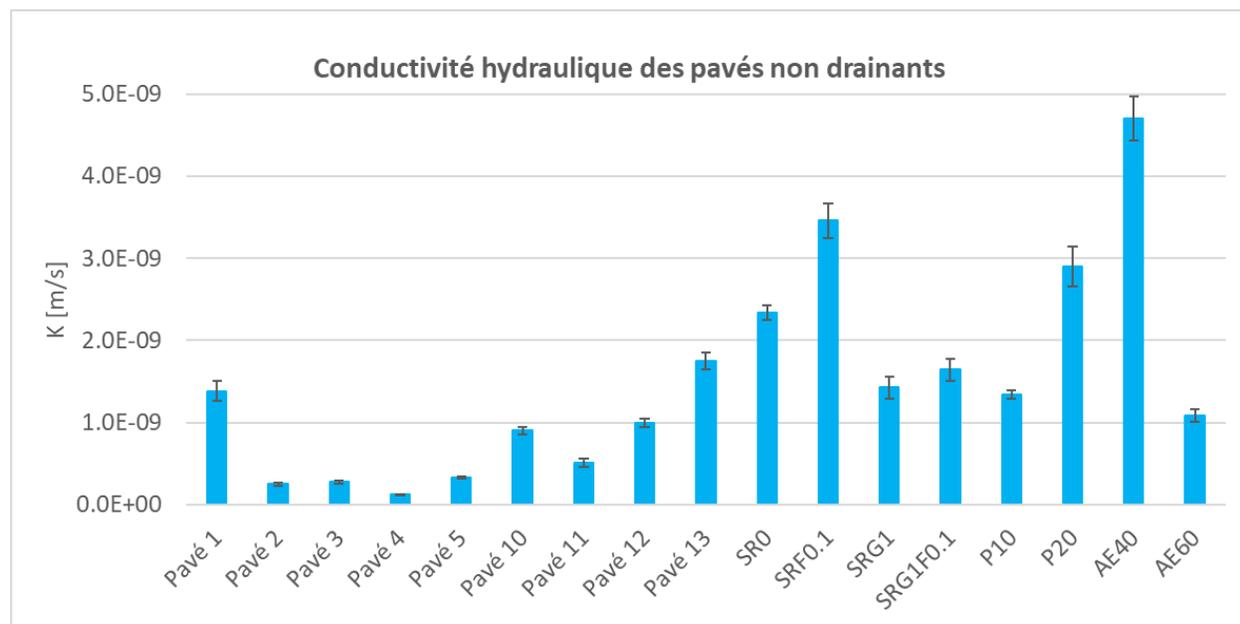


Figure III.7. Conductivité hydraulique des pavés non drainants

2.1.4. Taux d'évaporation

Dans ce travail, le taux d'évaporation du pavé est défini comme étant son aptitude à évaporer l'eau contenue dans ses pores, tant qu'il est alimenté par l'eau d'une manière continue au niveau de sa base. Le taux d'évaporation entre deux instants est calculé en divisant la perte de masse par la durée qui sépare ces deux instants et par la surface du pavé exposée à l'évaporation. Il est exprimé en $[g.m^{-2}.h^{-1}]$. Le taux d'évaporation est principalement affecté par les conditions extérieures appliquées au pavé et par les propriétés thermo-physiques de ce dernier. Ce taux permet d'évaluer le rendement d'évaporation. Ce dernier sera adopté comme une variable pour valider le modèle à l'état humide dans les conditions réelles, qui sera développé dans le chapitre IV.

Dans ce travail, la perte de masse d'eau est surveillée chaque heure, pendant 8 heures d'exposition du pavé au simulateur solaire fournissant un flux radiatif de $1000 W/m^2$. Les résultats du taux d'évaporation des pavés et de l'eau sont illustrés dans la Figure III.8. Il est à

noter que le taux d'évaporation de l'eau a été calculé en remplaçant le pavé par une couche d'eau de même épaisseur (4,5 cm).

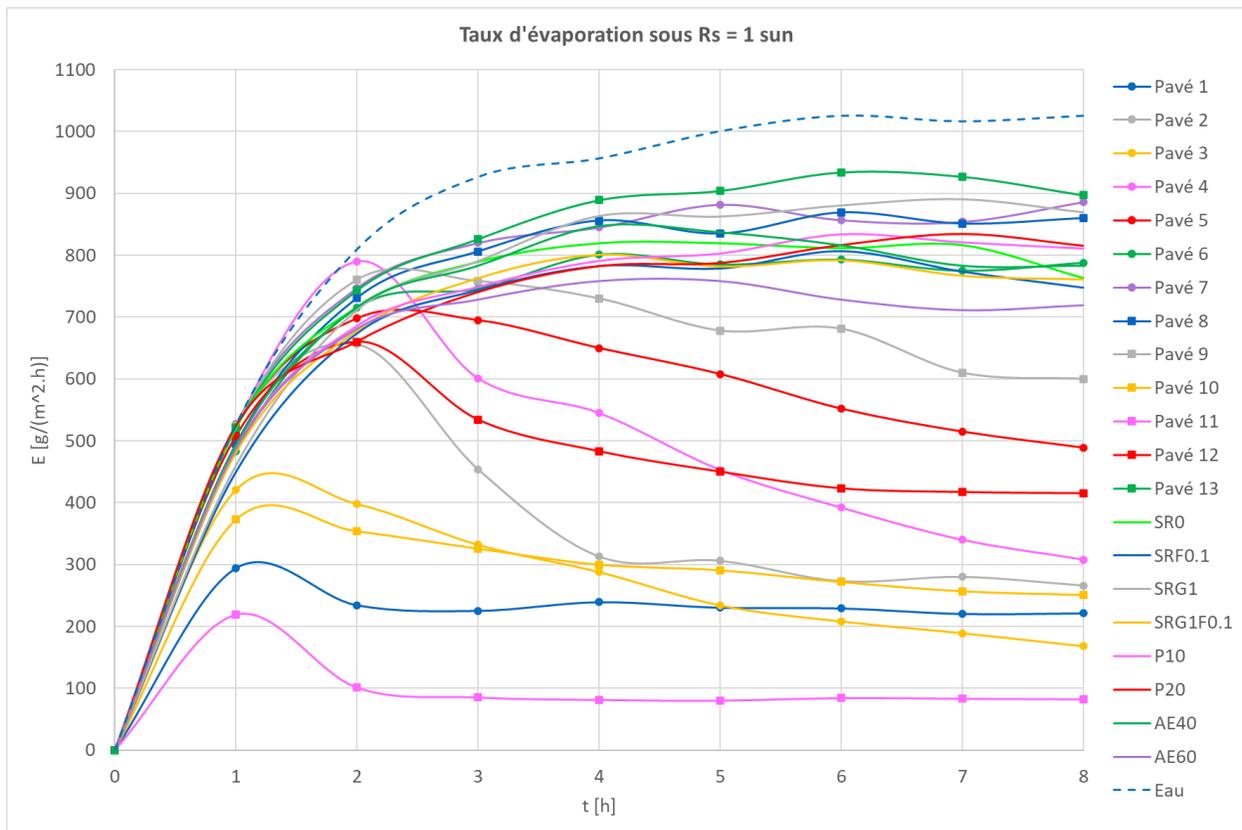


Figure III.8. Variation du taux d'évaporation en fonction du temps

Selon la Figure III.8, on peut distinguer deux types de courbes de variation du taux d'évaporation :

- **Type 1** : ce type est caractérisé par une augmentation du taux d'évaporation jusqu'à atteindre un palier après 4 heures, presque parallèle à celui de l'eau, mais avec des oscillations plus importantes. Ce type regroupe les pavés 6, 7, 8 et 13 de la série (BI) et ceux de la série (BS). Tous ces pavés sont caractérisés par un taux d'évaporation supérieur à $700 \text{ g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ après 5 heures d'exposition.
- **Type 2** : ce type correspond à une augmentation du taux d'évaporation pour atteindre une valeur maximale au bout d'une ou deux heures, puis une diminution avec le temps. Ce type renferme tous les pavés restants de la série (BI) qui sont : pavés 1 à 5 et pavés 9 à 12. De plus, pour les pavés 1 et 11, ayant un taux d'évaporation inférieur à $300 \text{ g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$, la phase de diminution de ce taux dure seulement 1 heure, avant que ce dernier se stabilise à des valeurs d'environ 230 et 80 $\text{g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$, respectivement. Pour les autres pavés de ce type, la durée d'exposition n'est pas suffisante pour évaluer leur

comportement évaporatif, mais il s'avère que ces pavés vont atteindre un palier avec une valeur minimale non nulle, comme il est observé dans le cas des pavés 2 et 12.

L'augmentation rapide du taux d'évaporation pendant la première heure (pavés 1, 3, 10 et 11) ou les deux premières heures (les autres pavés) est liée principalement à une évaporation de l'eau libre qui se trouve proche de la surface exposée.

Après le séchage de l'eau surfacique, il existe deux scénarios possibles :

- Soit les pores capillaires continuent à alimenter la surface par l'eau transportée de la base, et, dans cette situation, le taux d'évaporation atteint un palier autour de sa valeur maximale, comme le cas des pavés de Type 1.
- Soit une interruption se produit au niveau des chemins capillaires qui conduisent l'eau de la base vers la surface, et dans ce cas, le taux d'évaporation commence à diminuer et l'évaporation contrôlée par la diffusion de vapeur apparaît. C'est le cas des pavés de Type 2.

Les valeurs du taux d'évaporation moyen (E_{moy}) pendant la durée d'exposition sont récapitulées dans la Figure III.9. Ces valeurs peuvent varier entre 91 (pavé 11) et 738 $g.m^{-2}.h^{-1}$ (pavé 13). On remarque bien que les pavés de Type 1 ont un E_{moy} supérieur à 600 $g.m^{-2}.h^{-1}$ qui n'est pas très loin de celui de l'eau (810 $g.m^{-2}.h^{-1}$). En revanche, le taux d'évaporation moyen des pavés de Type 2, ne dépasse pas, au mieux, 600 $g.m^{-2}.h^{-1}$. De plus, une grande dispersion dans les résultats de E_{moy} est observée avec les pavés de la série (BI), alors que les valeurs de E_{moy} pour la série (BS) sont comprises entre 619 $g.m^{-2}.h^{-1}$ (AE60) et 703 $g.m^{-2}.h^{-1}$ (SRG1).

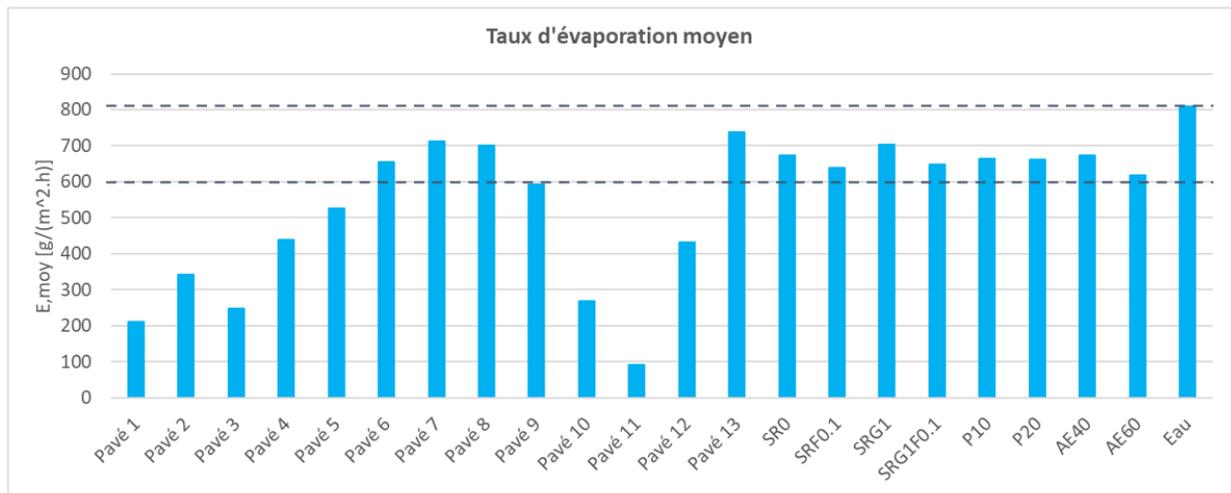


Figure III.9. Taux d'évaporation moyen

Ces valeurs trouvées de E_{moy} sont proches de la gamme évaluée par [32] qui comprend des valeurs comprises entre 244 et 841 $g.m^{-2}.h^{-1}$ sous l'exposition à un rayonnement solaire artificiel de l'ordre de 1300 W/m^2 pendant 8 heures et avec une irrigation surfacique répétitive. De plus, l'étude de [29] a montré des valeurs de E_{moy} qui varient entre 51 et 617 $g.m^{-2}.h^{-1}$ dans les

conditions extérieures où le rayonnement solaire variable peut atteindre un pic de 1000 W/m^2 pour les deux jours d'exposition avec une irrigation unique au début de l'expérience.

Il est à noter que les résultats du taux d'évaporation sont toutefois influencés par les propriétés du pavé testé, le mode d'humidification, la durée d'exposition, les conditions extérieures, et surtout le rayonnement solaire incident [30].

Pour le mode d'humidification des pavés, toutes les études mentionnées dans le chapitre I portent sur une irrigation au niveau de la surface du pavé, alors que dans ce travail il s'agit d'une alimentation d'eau au niveau de la base d'une manière continue.

2.1.5. Synthèse des résultats

Le Tableau III.1 récapitule les résultats des propriétés physiques des pavés ainsi que les valeurs minimales et maximales. Un grand écart est observé entre les valeurs extrêmes de la conductivité hydraulique, avec un ordre de grandeur de $2 \cdot 10^7$. Celui-ci vaut 40,2 pour le coefficient d'absorption capillaire et 7,1 pour la teneur en eau capillaire. De plus, les rapports entre les valeurs extrêmes sont de l'ordre de 3,4 et 2,1, pour la porosité ouverte et la masse volumique apparente, respectivement. Ces résultats fournissent une importance majeure pour ce travail, qui étudie des pavés extrêmement différents en termes de leurs propriétés physiques.

Tableau III.1. Propriétés physiques des pavés

	Porosité ouverte φ_o [%]	Masse volumique apparente ρ [kg/m ³]	Teneur en eau capillaire W_{cap} [kg/m ³]	Coefficient d'absorption capillaire A_{cap} [kg.m ⁻² .h ^{-0,5}]	Conductivité hydraulique K [m/s].10 ⁻⁹	Taux d'évaporation moyen E_{moy} [g.m ⁻² .h ⁻¹]
Pavé 1	40,3 ± 3,2	1242 ± 22	207,9 ± 15,1	5,1 ± 0,4	1,383 ± 0,276	210
Pavé 2	37,4 ± 1,7	1336 ± 23	149,1 ± 9,6	1,1 ± 0,5	0,252 ± 0,048	341
Pavé 3	33,3 ± 1,3	1430 ± 14	190,6 ± 4,7	2,4 ± 0,3	0,275 ± 0,044	249
Pavé 4	23,7 ± 2,1	1304 ± 19	37,1 ± 4,9	1,1 ± 0,2	0,124 ± 0,027	439
Pavé 5	35,6 ± 1,8	1403 ± 20	167,7 ± 12,3	1,4 ± 0,6	0,335 ± 0,042	525
Pavé 6	32,0 ± 2,0	1683 ± 31	167,2 ± 16,2	21,6 ± 2,8	730 400 ± 24 770	654
Pavé 7	38,0 ± 4,1	1509 ± 83	225,4 ± 3,6	32,2 ± 3,7	1 532 000 ± 103 500	713
Pavé 8	53,8 ± 2,4	1043 ± 16	127,3 ± 31,5	7,9 ± 0,8	2 485 000 ± 166 700	700
Pavé 9	50,3 ± 2,1	1252 ± 20	116,8 ± 13,8	5,9 ± 0,9	506 800 ± 16 980	593
Pavé 10	39,0 ± 2,1	1510 ± 4	141,0 ± 14,5	1,0 ± 0,2	0,902 ± 0,099	269
Pavé 11	41,6 ± 1,7	1221 ± 12	164,3 ± 14,4	2,0 ± 0,2	0,515 ± 0,132	91
Pavé 12	15,9 ± 0,1	2238 ± 6	60,6 ± 4,4	0,8 ± 0,0	0,994 ± 0,114	432
Pavé 13	34,1 ± 1,2	1796 ± 7	204,4 ± 2,3	2,8 ± 0,3	1,753 ± 0,193	738
SRO	33,4 ± 1,6	1754 ± 16	254,8 ± 12,6	2,8 ± 0,1	2,338 ± 0,211	673
SRF0.1	32,7 ± 1,6	1773 ± 19	253,9 ± 13,0	2,8 ± 0,2	3,457 ± 0,470	640
SRG1	36,2 ± 1,3	1670 ± 9	246,7 ± 13,4	3,3 ± 0,1	1,426 ± 0,300	703
SRG1F0.1	36,5 ± 1,6	1658 ± 16	236,1 ± 16,5	3,4 ± 1,4	1,643 ± 0,296	647
P10	34,5 ± 0,0	1691 ± 24	237,9 ± 24,8	2,3 ± 0,1	1,337 ± 0,116	665
P20	36,5 ± 2,3	1620 ± 12	237,0 ± 29,3	2,5 ± 0,4	2,898 ± 0,527	663
AE40	36,4 ± 1,6	1674 ± 17	263,1 ± 8,1	3,2 ± 0,8	4,702 ± 0,585	673
AE60	32,4 ± 3,3	1729 ± 4	240,5 ± 31,0	2,1 ± 0,3	1,086 ± 0,171	619
Valeur minimale	15,9	1043	37,1	0,8	0,124	91
Valeur maximale	53,8	2238	263,1	32,2	2 485 000	738

2.2. Caractérisation thermique

Dans le chapitre I, il a été trouvé que l'albédo [19–24] et le flux conductif [24–28] jouent des rôles importants dans la réduction de la température de surface à l'état sec. Cependant, cet effet de rafraîchissement n'a pas été étudié avec des pavés à l'état humide. Pour cela, dans cette partie, l'albédo et la conductivité thermique seront évalués dans le but d'essayer de les corrélérer avec la température de surface. De plus, l'effusivité thermique sera aussi déterminée. Le calcul de cette dernière, avec la connaissance préalable des propriétés physiques comme la masse volumique et la conductivité thermique, nous permettra d'extraire d'autres propriétés thermiques comme la diffusivité et la chaleur spécifique, qui peuvent influencer aussi la température de surface.

2.2.1. Albédo

L'albédo représente la fraction du rayonnement solaire réfléchi par la surface du pavé. Dans ce travail, l'albédo est calculé à travers le spectre de réflectivité. Ce dernier est obtenu en divisant le spectre d'émissivité du pavé par celui du spectralon, sous l'exposition au rayonnement du simulateur solaire.

Le spectre d'émissivité du pavé 1 et celui du spectralon sont illustrés dans la Figure III.10. Le spectre de réflectivité de ce même pavé 1 est présenté dans la Figure III.11. L'annexe 6 montre les spectres de réflectivité obtenus pour les autres pavés.

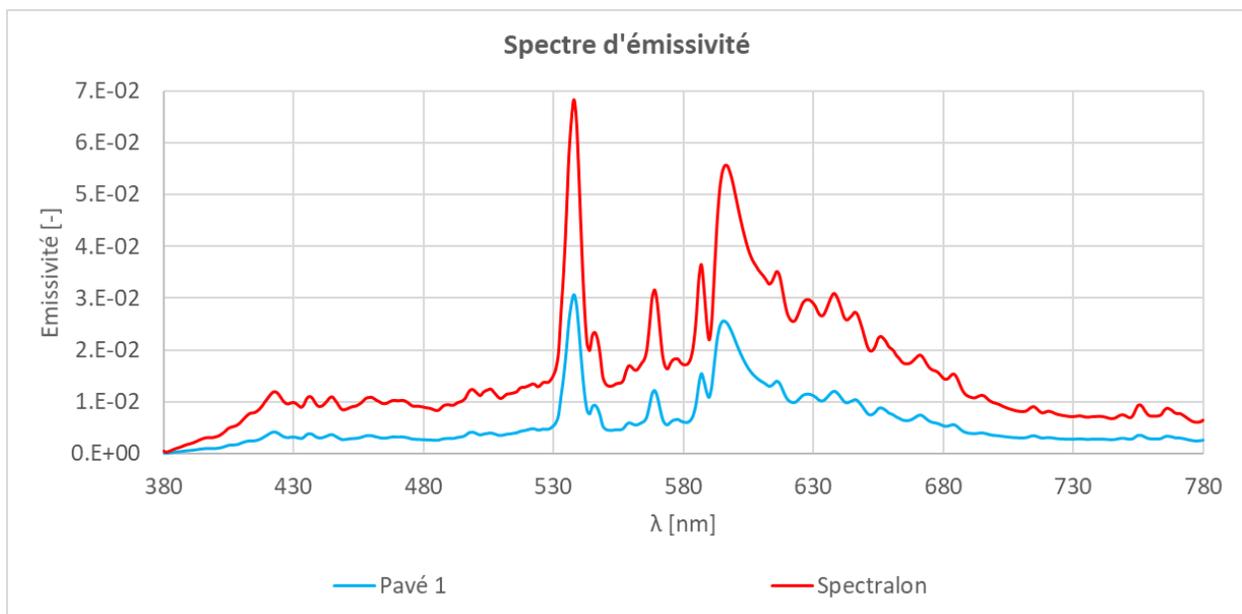


Figure III.10. Spectre d'émissivité du pavé 1 et du spectralon

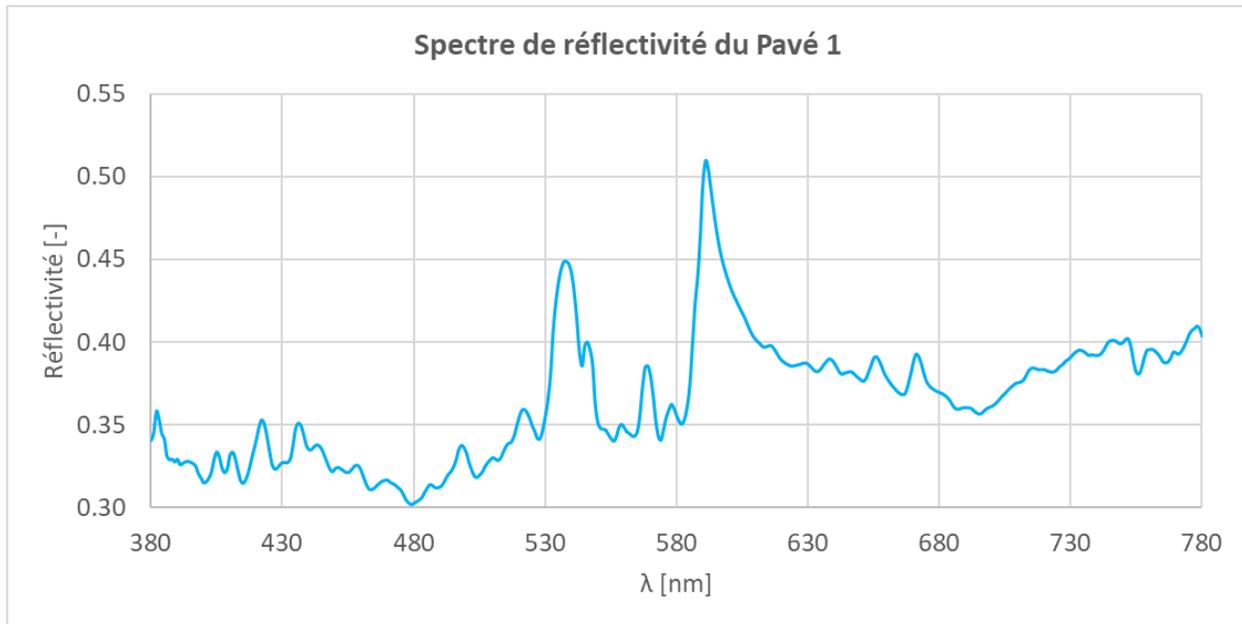


Figure III.11. Spectre de réflectivité du pavé 1

Dans la Figure III.10, on peut remarquer que les aspects des spectres sont similaires avec une différence au niveau de l'amplitude et qu'ils renferment deux pics remarquables à des longueurs d'onde d'environ 540 et 590 nm. Cette allure est également observée pour les autres pavés de la série (BI) (annexe 6).

L'amplitude du spectre d'émissivité du spectralon est toujours supérieure à celle des pavés, vu que le premier a une réflectivité proche de 1, et, par suite, la totalité du rayonnement qui atteint sa surface sera rapidement émise par elle. En revanche, une partie importante du rayonnement est absorbée par la surface des pavés, alors que l'autre partie émise est détectée par le spectroradiomètre.

Les valeurs d'albédo en [%] sont présentées dans l'histogramme de la Figure III.12. Cet histogramme révèle que ces valeurs sont comprises entre 20,2% (pavé 9) et 58,2% (P10). Il peut être remarqué une grande dispersion dans les valeurs d'albédo des pavés de la série (BI), qui varient entre 20,2% (pavé 9) et 43,7% (pavé 4), par rapport à celles de la série (BS), qui fluctuent entre 40,3% (AE60) et 58,2% (P10). De plus, à l'exception du pavé 10, les pavés drainants (pavés 6, 7, 8 et 9) ont des albédos inférieurs aux autres, avec des valeurs comprises entre 20,2% (pavé 9) et 30,2% (pavé 7). Cela est dû au fait que la surface de ces pavés est caractérisée par un aspect rugueux, et, par suite, elle peut atténuer le rayonnement réfléchi à travers des inter-réflexions qui se produisent entre les défauts surfaciques. L'albédo du pavé 10, qui est de l'ordre de 21,4%, est notamment attribué à sa couleur relativement plus sombre par rapport aux autres pavés de

la même série (BI). Cette marge de valeurs d'albédo trouvées, est incluse dans la gamme reportée par [21] pour les pavés en béton, qui varie entre 5% et 63%.

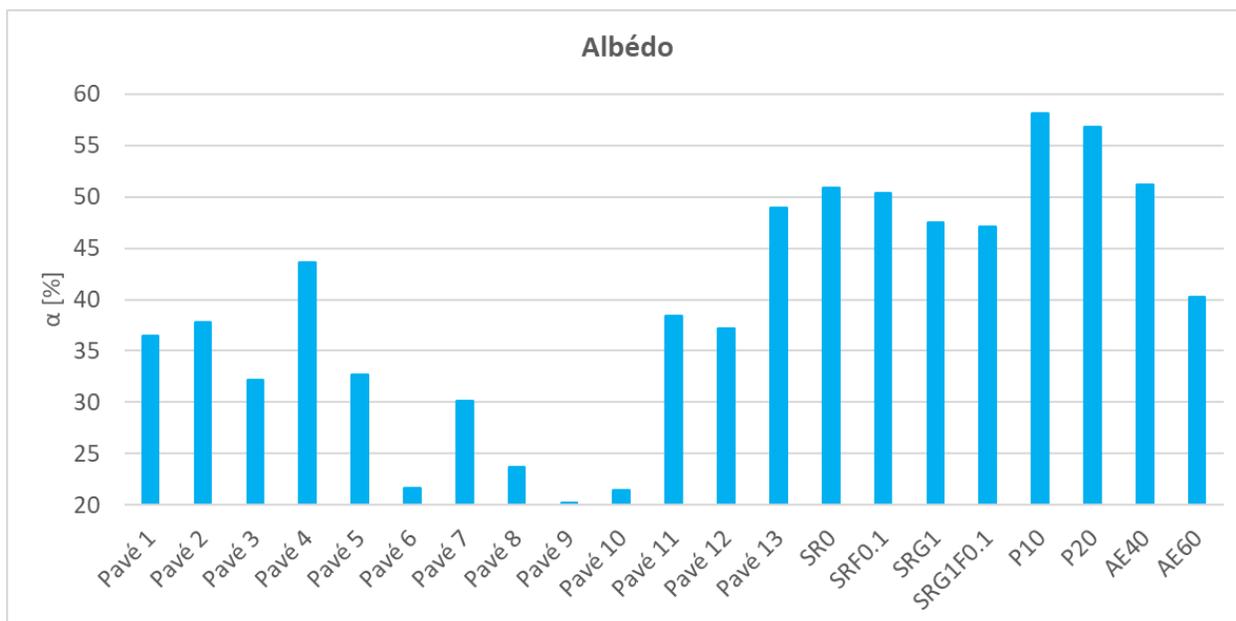


Figure III.12. Albédo

2.2.2. Conductivité thermique

La conductivité thermique traduit la vitesse du flux thermique dirigé de la surface du pavé (face chaude) vers sa base (face froide). Elle est mesurée par la méthode de la plaque chaude gardée à l'aide du lambda-mètre EP500.

Les valeurs corrigées de la conductivité thermique selon la démarche décrite dans le chapitre II, sont résumées dans l'histogramme de la Figure III.13. Ces valeurs varient entre $0,304 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ (pavé 8) et $0,765 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ (pavé 12). Le pavé 6, bien qu'il soit drainant, engendre une conductivité thermique importante d'ordre $0,626 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. La dispersion dans les résultats de la conductivité thermique est notamment observée avec les pavés de la série (BI). Cette dispersion est principalement liée à celle de la masse volumique apparente. En effet, le pavé 8 est le plus léger ($\rho = 1043 \text{ kg/m}^3$), alors que le pavé 12 est le plus dense ($\rho = 2238 \text{ kg/m}^3$). De plus, le pavé 6 a une masse volumique intermédiaire de l'ordre de 1683 kg/m^3 . Pour confirmer cette affirmation, la Figure III.14 montre une forte corrélation linéaire positive, de $R^2 = 0,88$, entre la conductivité thermique et la masse volumique apparente.

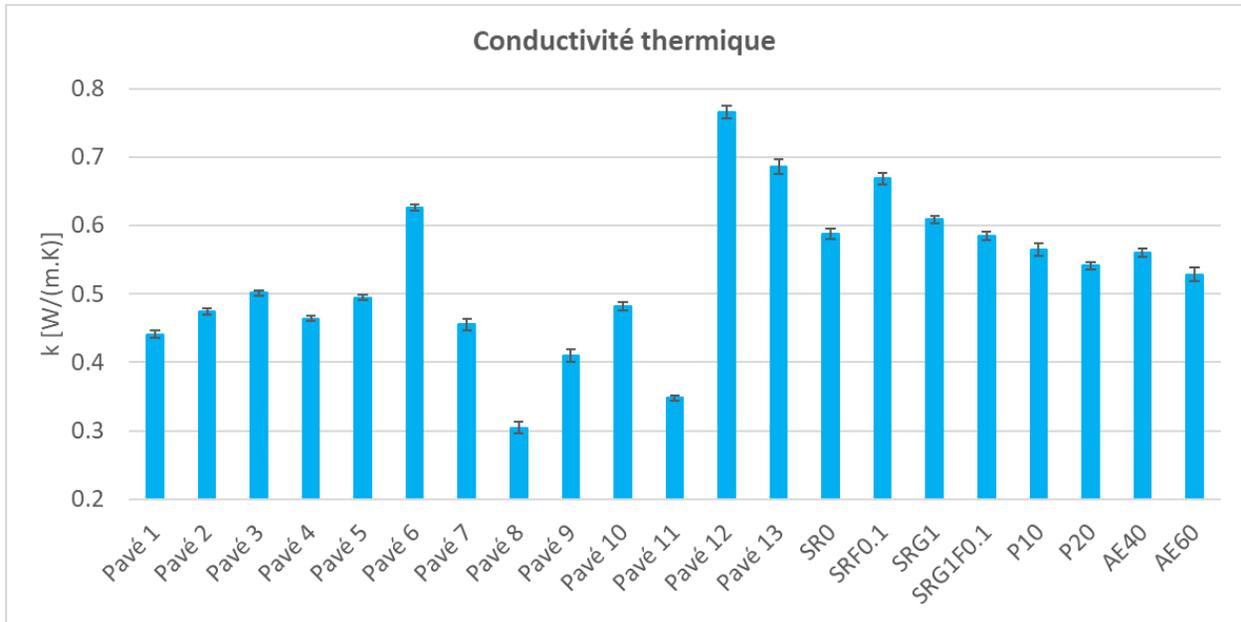


Figure III.13. Conductivité thermique

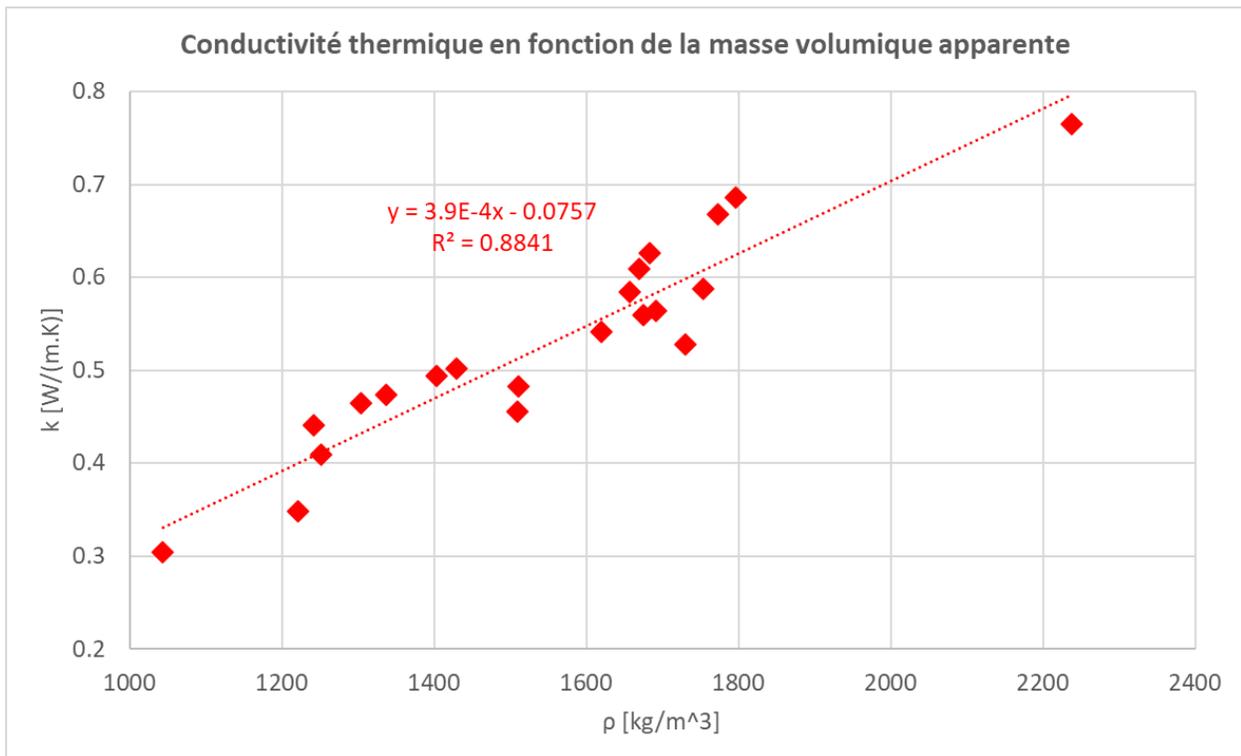


Figure III.14. Conductivité thermique en fonction de la masse volumique apparente

2.2.3. Effusivité thermique, Chaleur spécifique et Diffusivité thermique

L'effusivité thermique des pavés est mesurée par la méthode du plan chaud, en se basant sur la variation de la température de la face du pavé en fonction de la racine du temps.

Les résultats de mesure d'effusivité sont présentés dans l'histogramme de la Figure III.15. Ces valeurs varient entre $472 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-0.5}$ (pavé 8) et $1757 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-0.5}$ (pavé 12), les autres valeurs se situant globalement entre 600 et $1100 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-0.5}$.

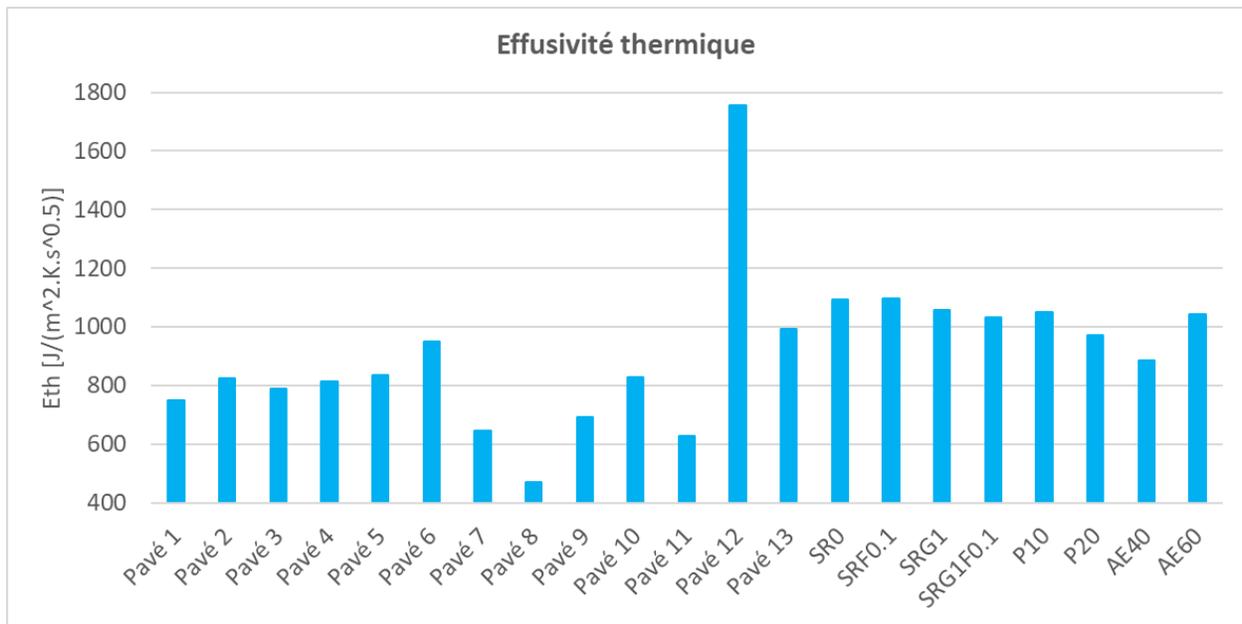


Figure III.15. Effusivité thermique

Les valeurs d'effusivité thermique pour les pavés en béton ne sont pas bien évaluées dans la littérature. Cependant, on a pu déterminer ces valeurs en utilisant l'équation II.39 du chapitre II. On a trouvé que la valeur maximale pour le pavé 12 est proche de celle rapportée par [28], qui vaut $1764 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-0.5}$ pour une masse volumique de $2291 \text{ kg}/\text{m}^3$. Cependant, la valeur minimale mesurée dans ce travail est beaucoup plus faible que celle de [28], à savoir $1035 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-0.5}$ pour une masse volumique de $1820 \text{ kg}/\text{m}^3$. Cette différence est due principalement aux grands écarts qui existent au niveau de la masse volumique et de la conductivité thermique. En effet, l'effusivité thermique représente la racine carrée du produit entre la masse volumique, la conductivité thermique et la chaleur spécifique.

En connaissant les valeurs de la conductivité thermique et de la masse volumique apparente, les valeurs de l'effusivité thermique permettent de calculer les valeurs de deux propriétés thermiques fondamentales : la chaleur spécifique (C_p) et la diffusivité thermique (D_{th}).

La chaleur spécifique est le rapport entre le carré de l'effusivité thermique et le produit entre la conductivité thermique et la masse volumique apparente.

La diffusivité thermique représente le rapport entre la conductivité thermique et la capacité thermique volumique.

Les valeurs calculées de chaleur spécifique et de diffusivité thermique sont récapitulées dans l'histogramme de la Figure III.16.

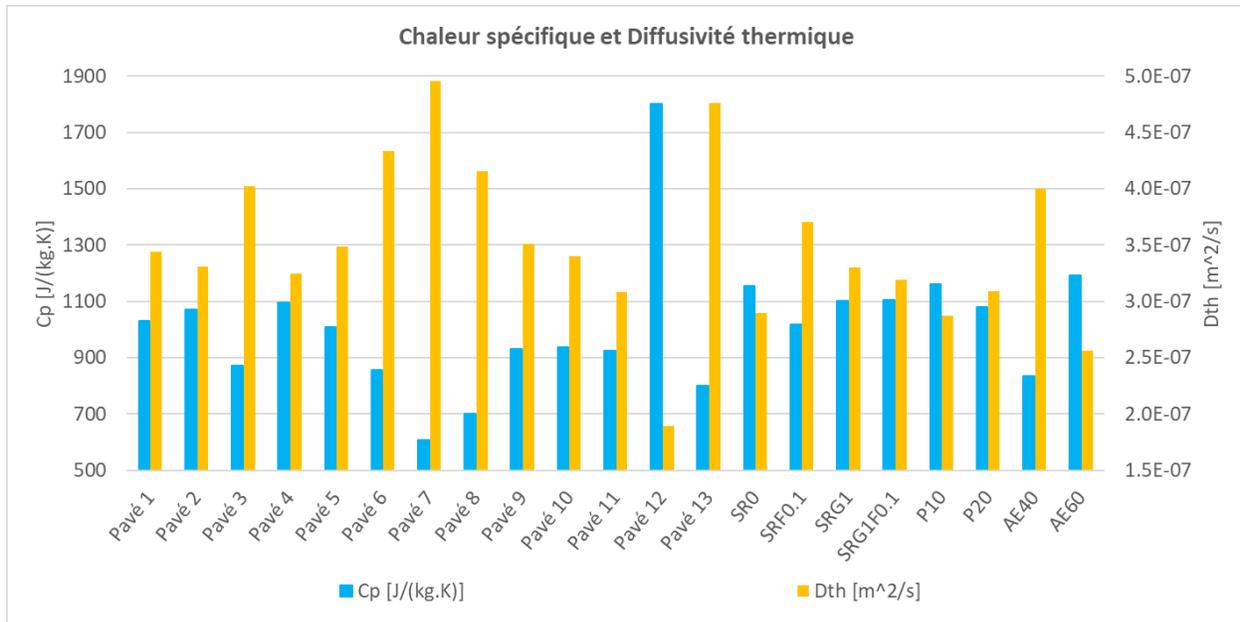


Figure III.16. Chaleur spécifique et Diffusivité thermique

La chaleur spécifique varie entre $608 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ (pavé 7) et $1802 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ (pavé 12), ou, si on fait exception du pavé 12, entre $608 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ (pavé 7) et $1098 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ (SRF0.1). Cette gamme est cohérente avec celles trouvées dans la littérature pour les pavés en béton. Par exemple, selon [18], la chaleur spécifique varie entre 850 et $1000 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$. De plus, une variation entre 957 et $997 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ est rapportée par [28]. L'écart qui existe au niveau de la valeur minimale de la chaleur spécifique avec celles de la littérature, est dû principalement à la valeur d'effusivité thermique qui vaut $472 \text{ J.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-0.5}$ (pavé 8) contre $1035 \text{ J.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-0.5}$ [28] et $1670 \text{ J.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-0.5}$ [18].

La diffusivité thermique varie entre $1,90.10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ (pavé 12) et $4,96.10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ (pavé 7). Cette propriété n'a pas toujours été bien évaluée pour les pavés en béton dans la littérature mais on a pu déduire ses valeurs en utilisant l'équation II.40 du chapitre II. On a trouvé que la gamme calculée dans notre travail est inférieure à celles de la littérature. En effet, selon [28], la diffusivité

thermique varie entre $3,25 \cdot 10^{-7}$ et $6,48 \cdot 10^{-7}$ m²/s, pour des valeurs de conductivité thermique comprises entre 0,59 et 1,42 W.m⁻¹.K⁻¹. De plus, d'après [18], la diffusivité varie entre $9,18 \cdot 10^{-7}$ et $8,51 \cdot 10^{-7}$ m²/s pour des conductivités comprises entre 1,6 et 2,0 W.m⁻¹.K⁻¹. Ces résultats montrent que les valeurs calculées de la diffusivité thermique sont significativement affectées par celles de la conductivité thermique, étant donné que ces deux propriétés sont directement proportionnelles. En effet, les valeurs de la conductivité thermique relativement plus faibles par rapport à celles de la littérature, ont conduit aux mêmes tendances dans les valeurs de la diffusivité thermique. Il est à noter aussi que la dispersion dans les résultats de l'effusivité thermique, la chaleur spécifique et la diffusivité thermique est toujours observée pour les pavés de la série (BI) par rapport aux pavés de la série (BS), vu que ces trois propriétés sont liées entre elles.

2.2.4. Synthèse des résultats

Le Tableau III.2 résume les résultats issus des mesures des propriétés thermiques des pavés, ainsi que les valeurs minimales et maximales. Une forte étendue est observée entre les valeurs extrêmes pour chaque propriété, reflétant un rapport qui peut varier entre 2,5 pour la conductivité et 3,7 pour l'effusivité. Ces valeurs remettent en lumière l'importance de ce travail qui traite un grand nombre des pavés avec des propriétés thermiques bien dispersées.

Tableau III.2. Propriétés thermiques des pavés

	Albédo α [%]	Conductivité thermique k [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Effusivité thermique E_{th} [J.m ⁻² .K ⁻¹ .s ^{0,5}]	Chaleur spécifique C_p [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Diffusivité thermique D_{th} [m ² /s].10 ⁻⁷
Pavé 1	36,5	0,441 ± 0,016	751	1031 ± 37	3,44 ± 0,12
Pavé 2	37,8	0,474 ± 0,015	824	1072 ± 35	3,31 ± 0,11
Pavé 3	32,2	0,501 ± 0,014	790	871 ± 24	4,03 ± 0,11
Pavé 4	43,7	0,464 ± 0,013	814	1095 ± 31	3,25 ± 0,09
Pavé 5	32,7	0,494 ± 0,013	837	1010 ± 27	3,49 ± 0,09
Pavé 6	21,6	0,626 ± 0,015	951	858 ± 21	4,33 ± 0,11
Pavé 7	30,2	0,455 ± 0,023	646	608 ± 31	4,96 ± 0,26
Pavé 8	23,7	0,304 ± 0,022	472	702 ± 51	4,16 ± 0,30
Pavé 9	20,2	0,410 ± 0,023	691	931 ± 52	3,51 ± 0,20
Pavé 10	21,4	0,482 ± 0,018	827	939 ± 34	3,40 ± 0,12
Pavé 11	38,5	0,348 ± 0,011	627	925 ± 30	3,08 ± 0,10
Pavé 12	37,2	0,765 ± 0,026	1757	1802 ± 61	1,90 ± 0,06
Pavé 13	48,9	0,686 ± 0,030	994	802 ± 35	4,76 ± 0,21
SR0	50,9	0,588 ± 0,022	1092	1156 ± 43	2,90 ± 0,11
SRF0.1	50,4	0,668 ± 0,024	1098	1017 ± 36	3,71 ± 0,13
SRG1	47,5	0,609 ± 0,018	1059	1103 ± 33	3,30 ± 0,10
SRG1F0.1	47,1	0,584 ± 0,018	1034	1104 ± 34	3,19 ± 0,10
P10	58,2	0,564 ± 0,025	1052	1160 ± 51	2,88 ± 0,13
P20	56,9	0,541 ± 0,016	973	1080 ± 33	3,09 ± 0,09
AE40	51,2	0,560 ± 0,018	885	836 ± 28	4,00 ± 0,13
AE60	40,3	0,528 ± 0,027	1044	1193 ± 61	2,56 ± 0,13
Valeur minimale	20,2	0,304	472	608	1,90
Valeur maximale	58,2	0,765	1757	1802	4,96

3. Résultats des mesures de températures de surface

Dans le chapitre I, il a été démontré que l'atténuation du phénomène d'ICU à travers les pavés rafraîchissants se réalise en limitant l'augmentation de leur température de surface. Cette approche permettra de réduire les flux de convection et de rayonnement infrarouge émis par les pavés, et par suite de diminuer la température de l'air proche de leurs surfaces. La température de surface du pavé dépend à la fois des conditions météo appliquées et de ses propres propriétés. Dans le cas où les pavés sont exposés simultanément aux mêmes conditions extérieures, leurs températures de surface vont dépendre principalement de leurs propriétés thermo-physiques. Pour trouver le degré d'influence de celles-ci sur la température de surface, on a évalué dans les parties précédentes ces propriétés en adoptant les mêmes méthodes de mesure pour tous les pavés. De ce point, il faut maintenant présenter leurs températures de surface dans les mêmes

conditions réelles, à l'état humide et à l'état sec. Une bonne connaissance de l'influence des propriétés du pavé sur sa température de surface permet de mettre en évidence quelle(s) propriété(s) il faudra optimiser pour assurer un effet de rafraîchissement surfacique important.

3.1. Etat humide

Dans l'essai d'exposition au rayonnement solaire, l'état humide correspond à la situation où les pavés sont préalablement saturés et alimentés par l'eau à travers leurs bases d'une manière continue.

Les températures de surface des pavés sont relevées à l'aide de la caméra thermique. Le logiciel « IRSoft » permet d'évaluer la température de surface moyenne instantanée de chaque pavé, en utilisant la thermographie fournie par la caméra chaque 30 minutes. À partir de ces températures mesurées, des courbes représentatives montrant la variation temporelle journalière de la température de surface des pavés sont réalisées. Un pavé en bitume a été ajouté pour servir de référence. Figure III.17, Figure III.18 et Figure III.19, illustrent l'évolution de la température de surface des pavés en fonction du temps, pour trois journées ensoleillées non consécutives (11/09/2020), (14/09/2020) et (17/09/2020), respectivement.

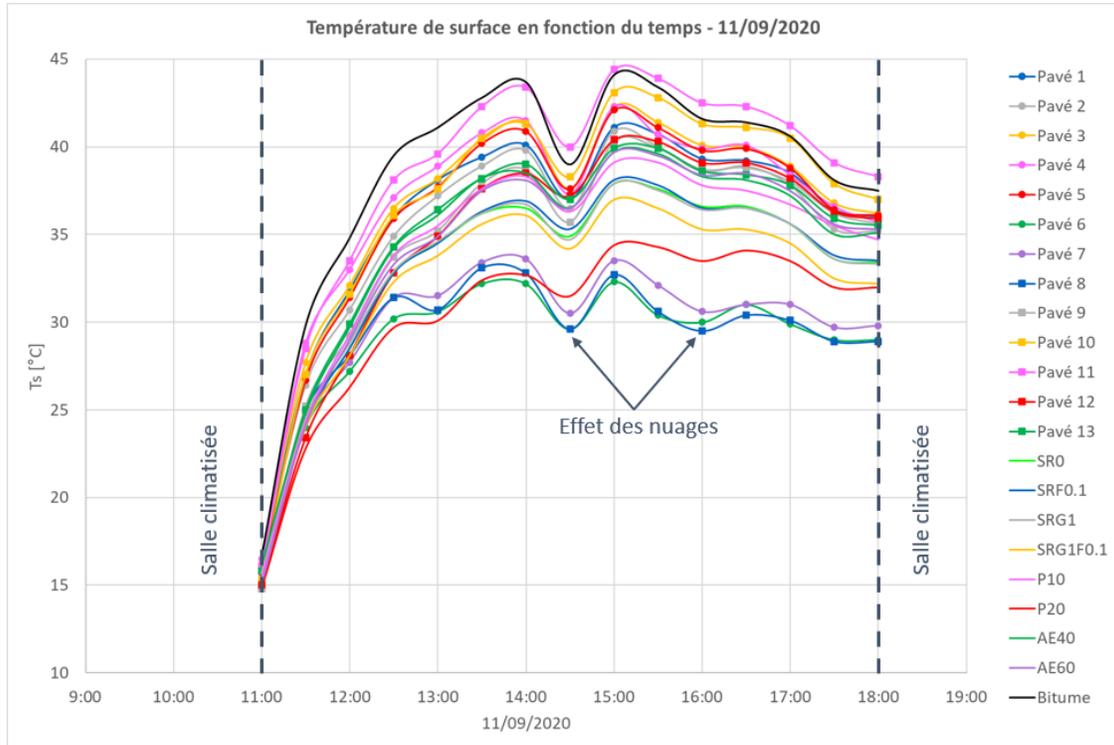


Figure III.17. Variation de la température de surface des pavés à l'état humide le 11/09/2020

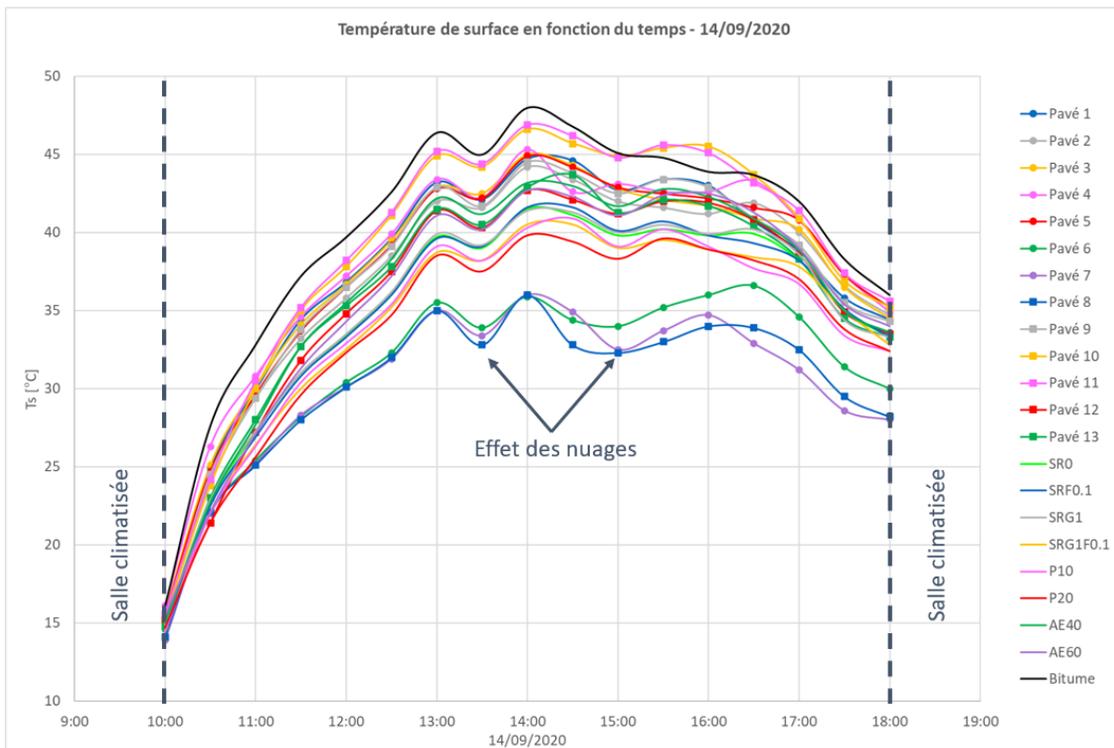


Figure III.18. Variation de la température de surface des pavés à l'état humide le 14/09/2020

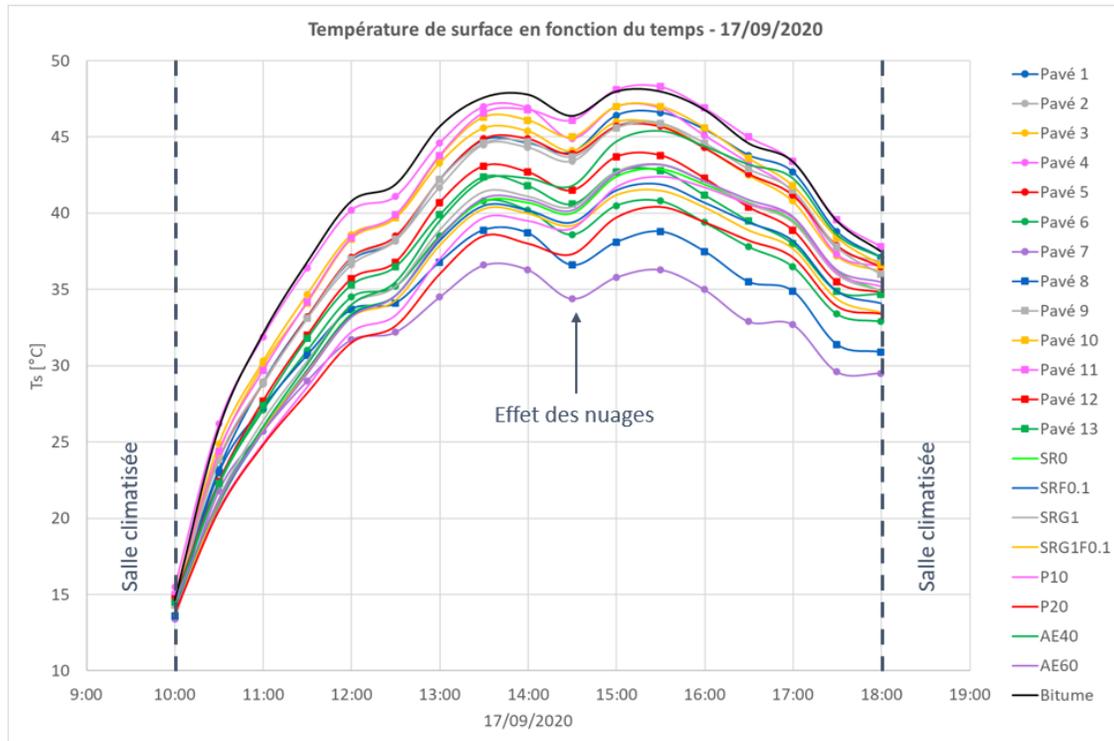


Figure III.19. Variation de la température de surface des pavés à l'état humide le 17/09/2020

On voit sur ces courbes qu'au début de chaque jour les températures de surface étaient presque les mêmes, juste avant de commencer l'essai d'exposition, puisque les pavés étaient replacés tous les soirs dans une salle à température contrôlée. On voit ensuite que les températures de surface des pavés exposés au soleil augmentent au cours de la journée, pour atteindre un maximum, puis elles commencent à diminuer. Entre 13h00 et 16h00, chaque jour, ces températures atteignent leurs valeurs maximales. Les oscillations qui apparaissent dans les courbes de variation sont expliquées par le passage des nuages qui atténuent l'intensité du rayonnement solaire. L'effet des nuages se traduit par une diminution suivie par une augmentation de la température de surface des pavés.

En se basant sur ces courbes, on peut synthétiser les résultats de mesure de la température de surface moyenne ($T_{s,moy}$) et maximale moyenne ($T_{s,max}$) pendant les trois jours d'exposition à travers l'histogramme de la Figure III.20.

Pour chaque pavé, $T_{s,moy}$ correspond à la moyenne de trois températures moyennes enregistrées pendant les trois jours, et $T_{s,max}$ représente la moyenne de trois températures maximales détectées pendant ces trois jours. $T_{s,moy}$ et $T_{s,max}$ sont données par les expressions ci-contre :

$$T_{s,moy} = \frac{\sum T_{s,moy}(jour\ i)}{\text{Nombre de jours}} \quad \text{III.6}$$

$$T_{s,max} = \frac{\sum T_{s,max}(jour\ i)}{\text{Nombre de jours}} \quad \text{III.7}$$

Avec,

$T_{s,moy}(jour\ i)$: température de surface moyenne du pavé pendant le jour « i »

$T_{s,max}(jour\ i)$: température de surface maximale du pavé pendant le jour « i »

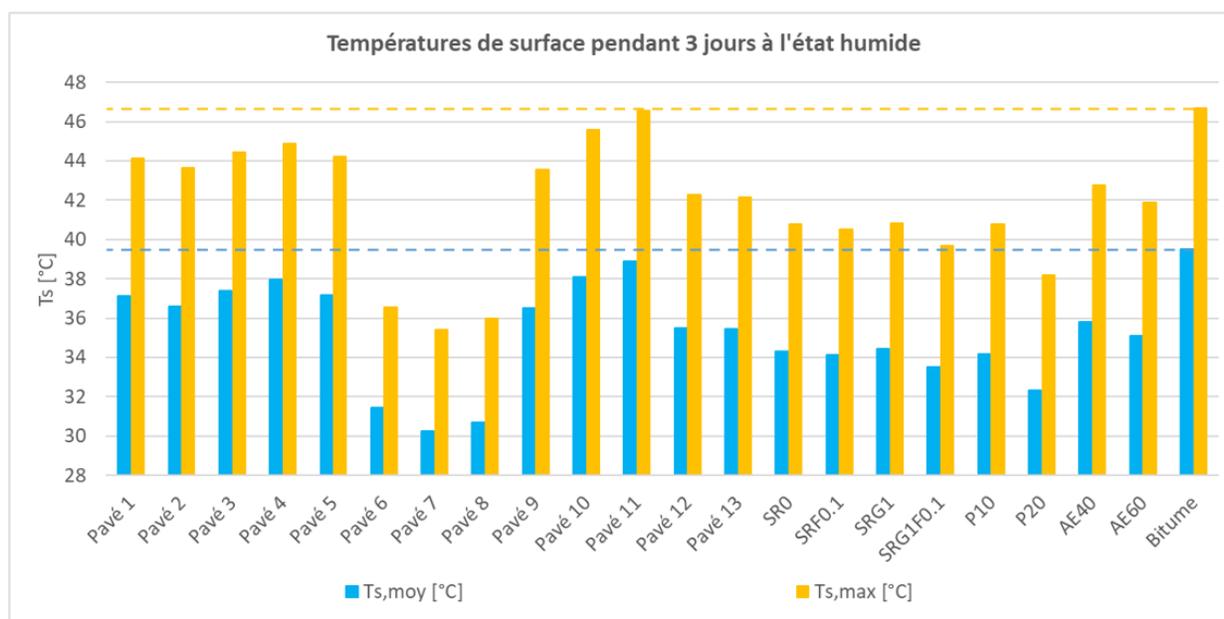


Figure III.20. Température de surface moyenne et maximale moyenne pendant trois jours d'exposition à l'état humide

La Figure III.20 montre que la température de surface moyenne varie entre 30,3°C (pavé 7) et 39,5°C (bitume). La température de surface maximale moyenne (sur 3 jours) suit la même tendance que la température de surface moyenne et varie entre 35,4°C (pavé 7) et 46,7°C (bitume). Ainsi, alors que certains pavés ne permettent pas d'abaisser significativement la température par rapport au bitume (pavés 1 à 5 et 9 à 11 par exemple), d'autres, au contraire, sont particulièrement efficaces pour diminuer la température de surface (pavés 6 à 8). Le pavé 11 engendre des températures proches de celles du bitume.

De plus, il peut être remarqué que les températures de surface des pavés de la série (BI) sont plus dispersées que celles des pavés de la série (BS). En effet, les températures de surface moyennes des pavés de la série (BI) varient entre 30,3°C (pavé 7) et 38,9°C (pavé 11), alors que celles de la série (BS) sont comprises entre 32,3°C (P20) et 35,8°C (AE40). Cette dispersion est due principalement aux écarts trouvés dans les propriétés thermo-physiques mesurées.

Pour mettre en évidence la capacité de rafraîchissement des pavés, l'histogramme de la Figure III.21 révèle les différences trouvées entre les températures de surface des pavés et celle du bitume. Il apparaît bien que les pavés 6, 7 et 8 sont ceux qui abaissent d'une manière remarquable la température de surface moyenne par rapport au bitume, avec des différences de l'ordre de 8,0, 9,2 et 8,8°C, respectivement. De plus, on peut diviser les pavés en trois niveaux de rafraîchissement, selon leur capacité à abaisser la température de surface moyenne par rapport au bitume, comme suit :

- Niveau faible : $\Delta T_{s,moy} \leq 3^{\circ}\text{C}$
- Niveau moyen : $3^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_{s,moy} \leq 6^{\circ}\text{C}$
- Niveau fort : $\Delta T_{s,moy} \geq 6^{\circ}\text{C}$

Avec cette division, on trouve que les pavés de la série (BI), sauf les pavés 6, 7 et 8, sont caractérisés par un niveau faible de rafraîchissement. Les pavés de la série (BS) sauf le pavé P20, ont un niveau moyen. Et finalement, les pavés 6, 7, 8 et P20 sont qualifiés par un niveau fort de rafraîchissement surfacique.

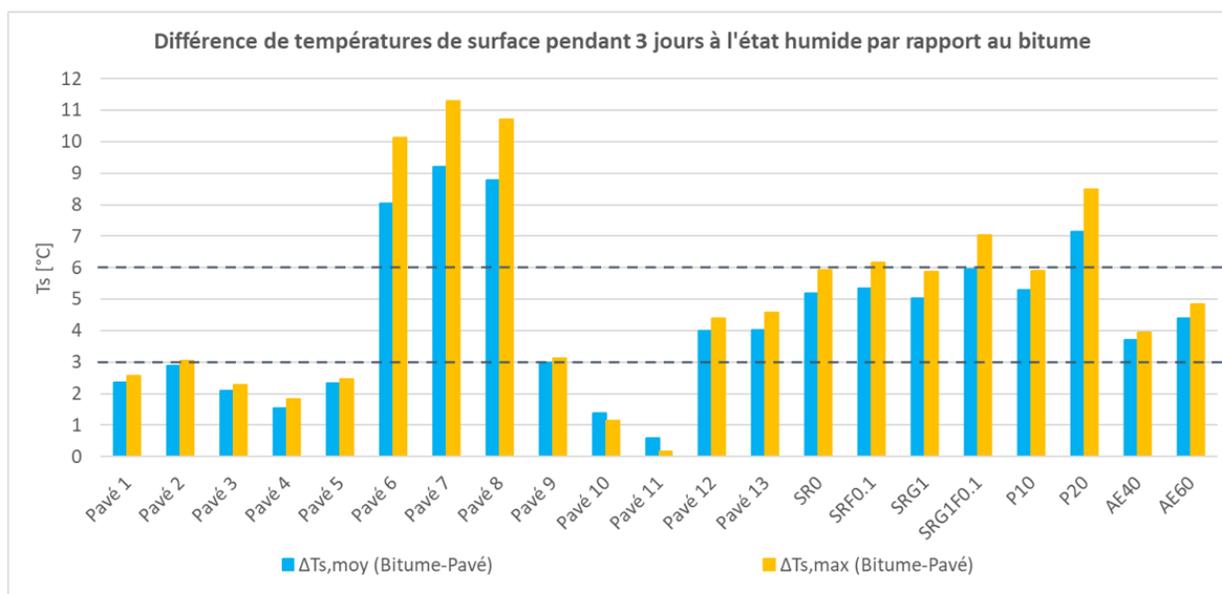


Figure III.21. Différences de température de surface moyenne et maximale moyenne pendant trois jours d'exposition à l'état humide par rapport au bitume

3.2. Etat sec

Dans ce travail, l'état sec exprime le cas où les pavés non alimentés par l'eau, sont préalablement secs avant d'être exposés au rayonnement solaire.

L'outil « IRSoft » permet de traiter les températures de surface moyennes enregistrées par la caméra thermique chaque heure. Les courbes journalières de la variation temporelle de la température de surface des pavés sont illustrées sur Figure III.22, Figure III.23 et Figure III.24, pour le 1^{er} jour (25/08/2021), le 2^{ème} jour (26/08/2021) et le 3^{ème} jour (31/08/2021), respectivement.

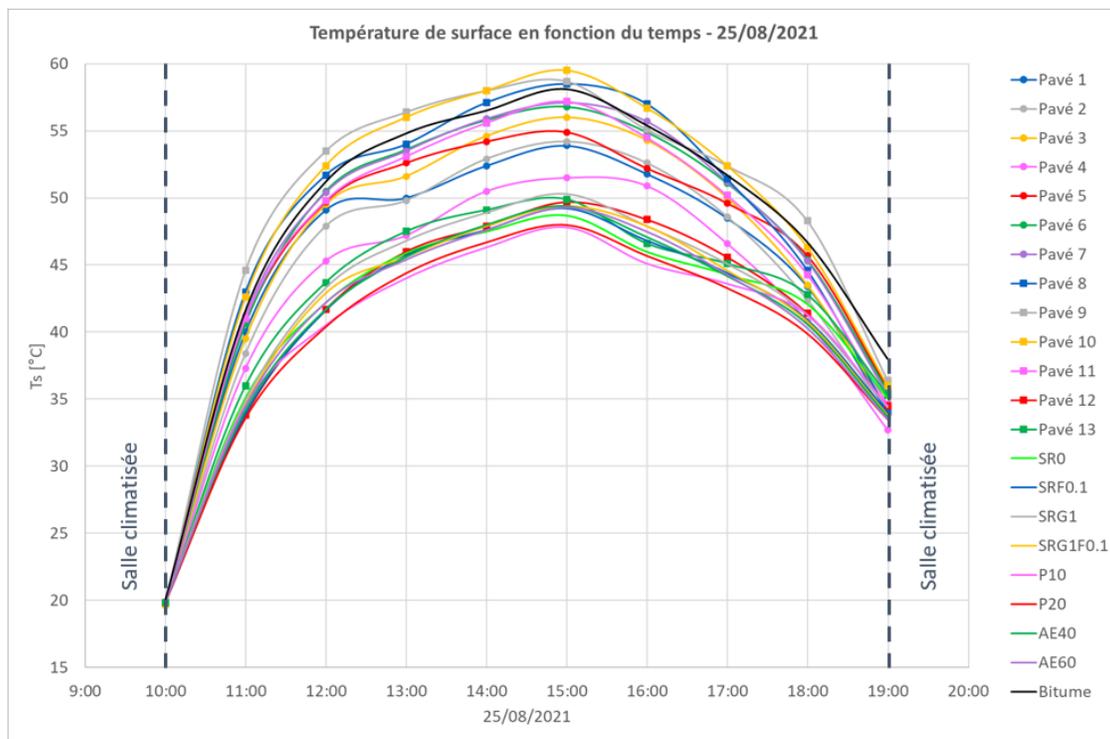


Figure III.22. Variation de la température de surface des pavés à l'état sec le 25/08/2021

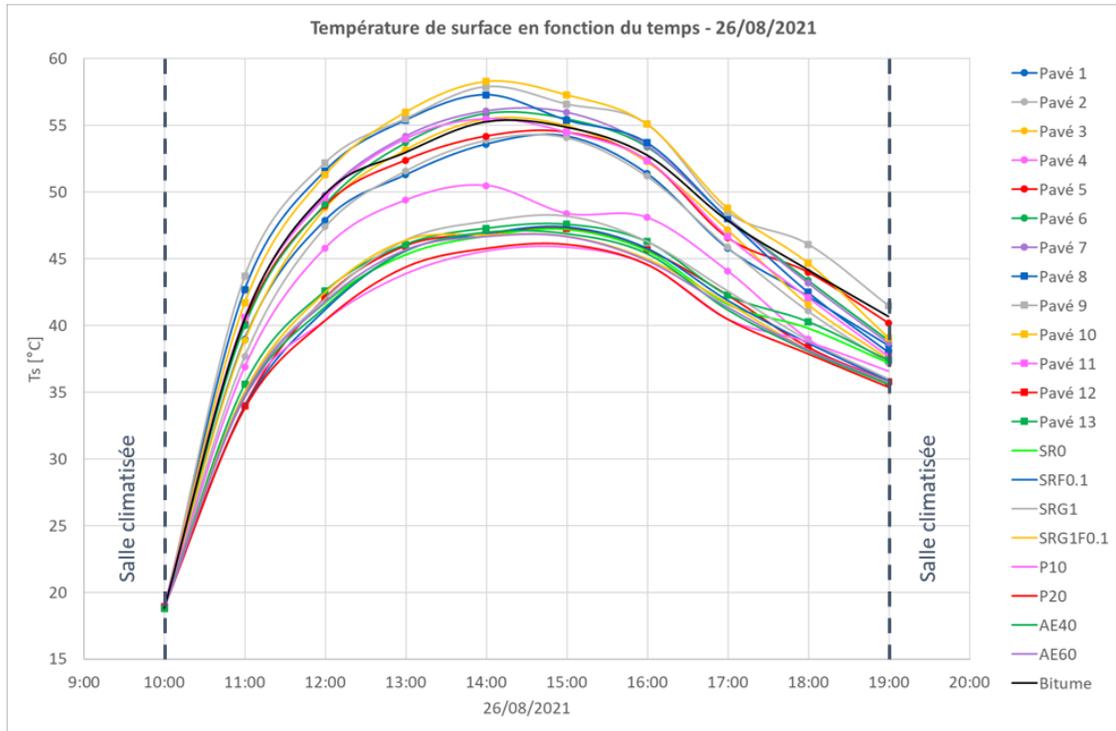


Figure III.23. Variation de la température de surface des pavés à l'état sec le 26/08/2021

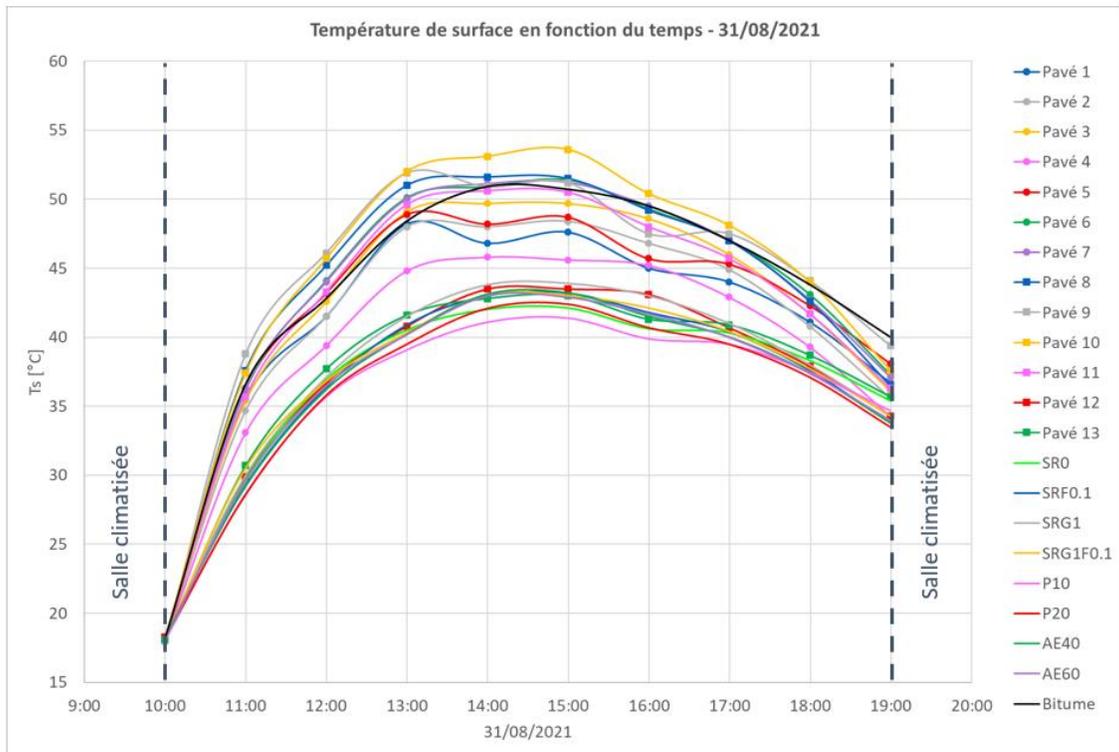


Figure III.24. Variation de la température de surface des pavés à l'état sec le 31/08/2021

Sur ces courbes, les températures de surface initiales étaient presque les mêmes au début de chaque jour. Ces températures correspondent à celle de la chambre climatisée où sont stockés les pavés pendant la nuit. Après exposition au soleil en début de matinée, les températures de surface augmentent pour atteindre un pic entre 14h00 et 15h00, avant de commencer à diminuer. Les courbes à l'état sec sont moins perturbées que celles à l'état humide vu que le ciel était quasiment sans nuages pendant les trois jours choisis au mois d'août 2021

Les résultats de la température de surface moyenne et de la température de surface maximale moyenne pendant les trois jours d'exposition sont présentés sur l'histogramme de la Figure III.25. Ce dernier indique que la température de surface moyenne varie entre 38,0°C (P20) et 46,5°C (pavé 9), alors que la température de surface maximale moyenne varie entre 45,0°C (P10) et 57,1°C (pavé 10).

De plus, il peut être remarqué que les pavés 9 et 10 ont les températures de surface moyennes les plus élevées, alors que celles des pavés P10 et P20 sont les plus basses. On peut observer également qu'à l'exception des pavés 12 et 13, les pavés de la série (BS) sont plus rafraîchissants que ceux de la série (BI). En effet, en comparant les aspects des pavés, on trouve que les couleurs des pavés 1 à 10 sont plus sombres que celle des autres pavés. Ceci est traduit par les valeurs d'albédo mesurées.

Cependant, le bitume qui est le pavé le plus sombre et le moins rafraîchissant à l'état humide a une température de surface moyenne de 45,3°C, légèrement inférieure à celle du pavé 8 (45,5°C). Pour expliquer ce fait, il faut noter que les pavés à l'état sec n'ont pas été scellés latéralement. Le bitume possède la structure la plus poreuse parmi tous les pavés. Par suite, l'air peut pénétrer dans le bitume à travers ses pores latéraux et peut s'écouler facilement à l'intérieur de ce pavé en y créant un effet rafraîchissant, ce qui permet de diminuer légèrement sa température de surface par rapport aux pavés 8, 9 et 10.

La grande dispersion qui a été observée dans les résultats de température de surface de la série (BI) à l'état humide, est également remarquée à l'état sec, avec un écart qui peut atteindre 7,3°C pour la température de surface moyenne (entre pavé 12 et pavé 9). En revanche, cet écart est limité à 1,5°C pour la série (BS) (entre P20 et SRG1). Ces écarts sont attribués notamment aux valeurs des propriétés thermo-physiques mesurées.

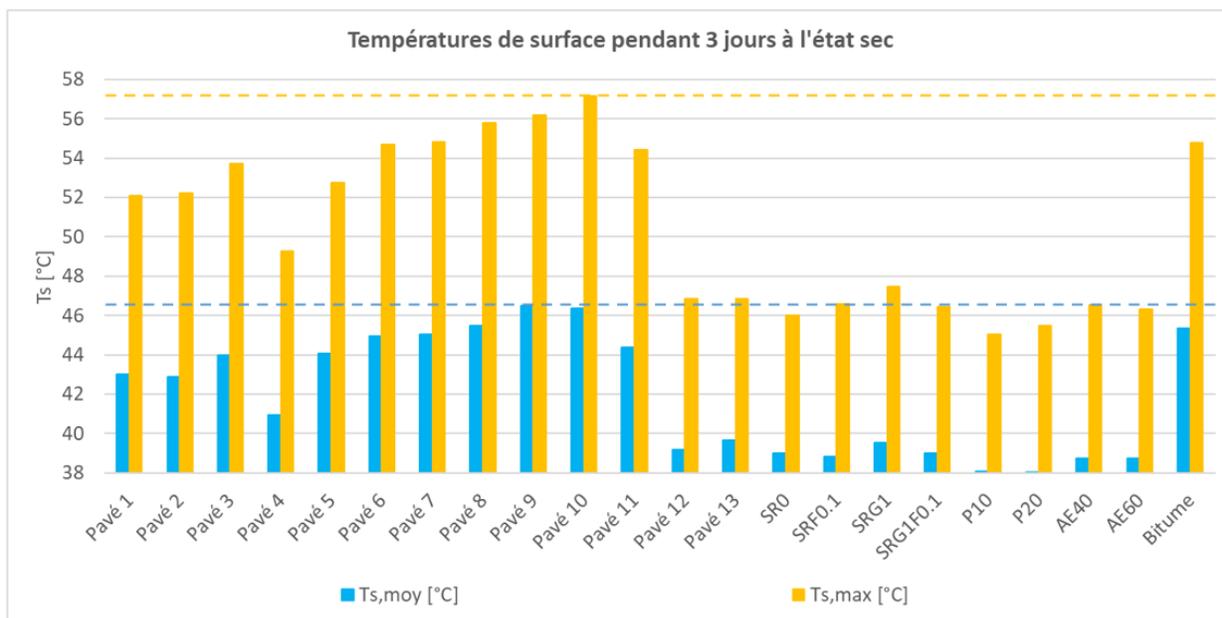


Figure III.25. Température de surface moyenne pendant trois jours d'exposition à l'état sec

3.3. Synthèse des résultats

Le Tableau III.3 synthétise les résultats trouvés des températures de surface des pavés à l'état humide et à l'état sec, ainsi que les valeurs minimales et maximales. L'incertitude composée élargie de la température de surface est calculée selon l'annexe 6 et vaut 2.3°C pour tous les pavés étudiés.

Un écart important est observé entre les valeurs extrêmes de température. Pour la température de surface moyenne, ces écarts sont de l'ordre de 9,2°C et 8,5°C, pour l'état humide et l'état sec respectivement. De plus, ces écarts atteignent des valeurs de 11,3°C et 12,1°C, pour la température de surface maximale moyenne, à l'état humide et à l'état sec, respectivement.

Ces différences sont dues principalement aux grands écarts détectés dans les propriétés thermo-physiques mesurées et confirment de nouveau l'intérêt de ce travail qui étudie un grand nombre des pavés de formulations très différentes.

Tableau III.3. Températures de surface des pavés

	Etat Humide		Etat Sec	
	$T_{s,moy}$ [°C]	$T_{s,max}$ [°C]	$T_{s,moy}$ [°C]	$T_{s,max}$ [°C]
Pavé 1	37,1	44,1	43,0	52,1
Pavé 2	36,6	43,7	42,9	52,2
Pavé 3	37,4	44,4	44,0	53,7
Pavé 4	38,0	44,9	40,9	49,3
Pavé 5	37,1	44,2	44,1	52,8
Pavé 6	31,5	36,6	45,0	54,7
Pavé 7	30,3	35,4	45,1	54,8
Pavé 8	30,7	36,0	45,5	55,8
Pavé 9	36,5	43,6	46,5	56,2
Pavé 10	38,1	45,6	46,4	57,1
Pavé 11	38,9	46,5	44,4	54,4
Pavé 12	35,5	42,3	39,2	46,8
Pavé 13	35,5	42,1	39,7	46,8
SR0	34,3	40,8	39,0	46,0
SRF0.1	34,1	40,5	38,8	46,6
SRG1	34,5	40,8	39,5	47,5
SRG1F0.1	33,5	39,7	39,0	46,4
P10	34,2	40,8	38,1	45,0
P20	32,3	38,2	38,0	45,5
AE40	35,8	42,8	38,7	46,5
AE60	35,1	41,9	38,8	46,3
Bitume	39,5	46,7	45,3	54,8
Valeur minimale	30,3	35,4	38,0	45,0
Valeur maximale	39,5	46,7	46,5	57,1

4. Corrélations entre la température de surface et les propriétés thermo-physiques

Dans le chapitre I, il a été montré que, selon la littérature, les pavés rafraîchissants permettent d'atténuer le phénomène d'ICU en limitant l'augmentation de leurs températures de surface. Par suite, pour juger de l'effet de rafraîchissement des pavés, il faut comparer leurs températures de surface dans les mêmes conditions climatiques. Dans ce cas-là, ce sont les propriétés thermo-physiques des pavés qui contrôlent leurs températures. Sur ce point, plusieurs études ont tenté de corréler la température de surface du pavé à ses propriétés thermo-physiques. En effet, il existe plusieurs recherches qui ont montré une influence importante de l'albédo et de la

conductivité thermique sur la variation de la température de surface du pavé à l'état sec. Cependant, les études qui investiguent cette variation à l'état humide traitent chaque propriété à part pour traduire son effet sur la température de surface, avec un nombre limité de pavés.

Pour cela, l'objectif de cette partie est de vérifier les tendances de la température de surface déjà trouvées dans la littérature et de chercher de nouvelles corrélations qui relient la température de surface à l'état humide avec les autres propriétés évaluées dans ce chapitre. Le grand nombre des pavés étudiés, accompagné par leurs propriétés thermo-physiques extrêmement dispersées, justifie l'importance et la nouveauté de ce travail. En effet, cette étude peut combler les lacunes qui existent dans la littérature, au niveau de l'effet du couplage des propriétés thermo-physiques sur la température de surface, pour un grand nombre de pavés.

4.1. Etude de l'état sec

Dans le chapitre I, nous avons vu que des auteurs présentaient des corrélations linéaires négatives reliant la température de surface maximale avec l'albédo ou avec la conductivité thermique à l'état sec. Dans cette partie, nous allons tester ces corrélations au moyen des mesures que nous avons réalisées sur nos pavés. Par la suite, nous allons identifier laquelle de ces deux propriétés thermiques a la plus grande influence sur la température de surface du pavé à l'état sec. Finalement, nous positionnerons nos résultats sur les graphiques du chapitre I dans le but de les comparer avec ceux de la littérature.

4.1.1. Relation entre la température de surface maximale moyenne et l'albédo

La relation entre la température de surface maximale moyenne et l'albédo à l'état sec est présentée sur la Figure III.26. Dans cette figure, nous avons positionné 21 mesures différentes, chaque point correspondant à un pavé en béton.

Une forte corrélation linéaire négative, de $R^2 = 0,83$, est trouvée entre la température de surface maximale moyenne et l'albédo. Seuls, 3 pavés s'éloignent de la droite de tendance (pavés 11, 12 et AE60).

Ce résultat est en concordance avec ceux trouvés dans la littérature comme l'indique la Figure III.27. En effet, une augmentation de la valeur d'albédo conduit à absorber moins d'énergie solaire par la surface du pavé. Dans la Figure III.27, on voit aussi que les valeurs de $T_{s,max}$ et de α identifiées dans notre travail se trouvent toujours dans le domaine de nuages des points qui correspond aux autres références mentionnées.

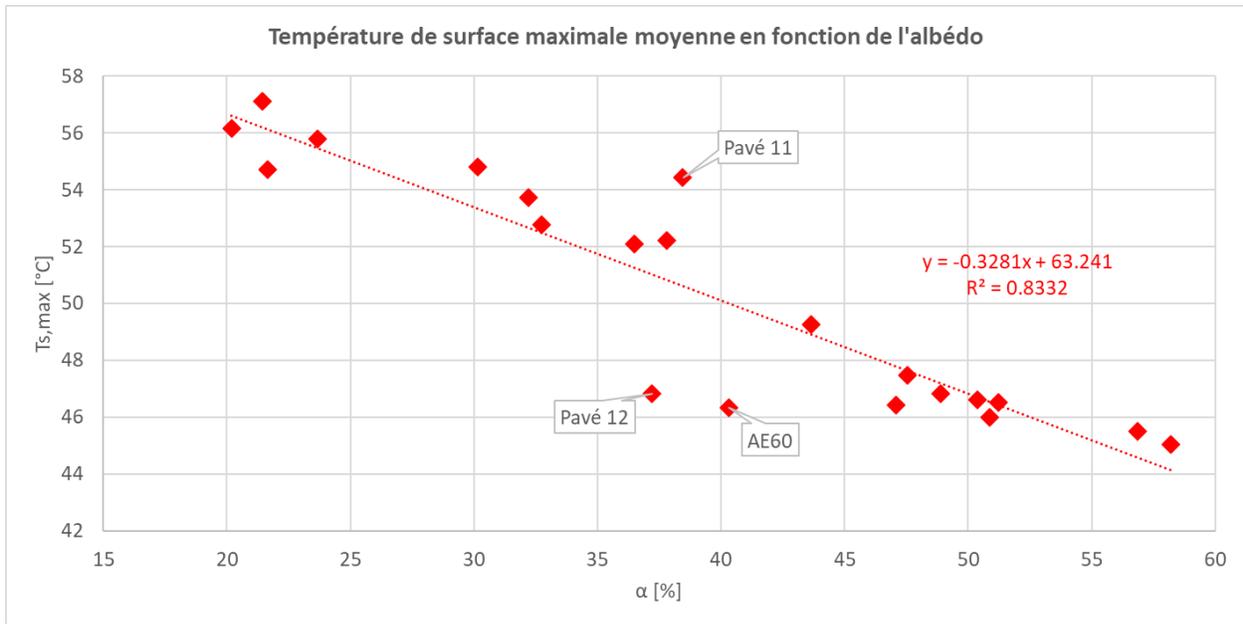


Figure III.26. Température de surface maximale moyenne en fonction de l'albédo à l'état sec

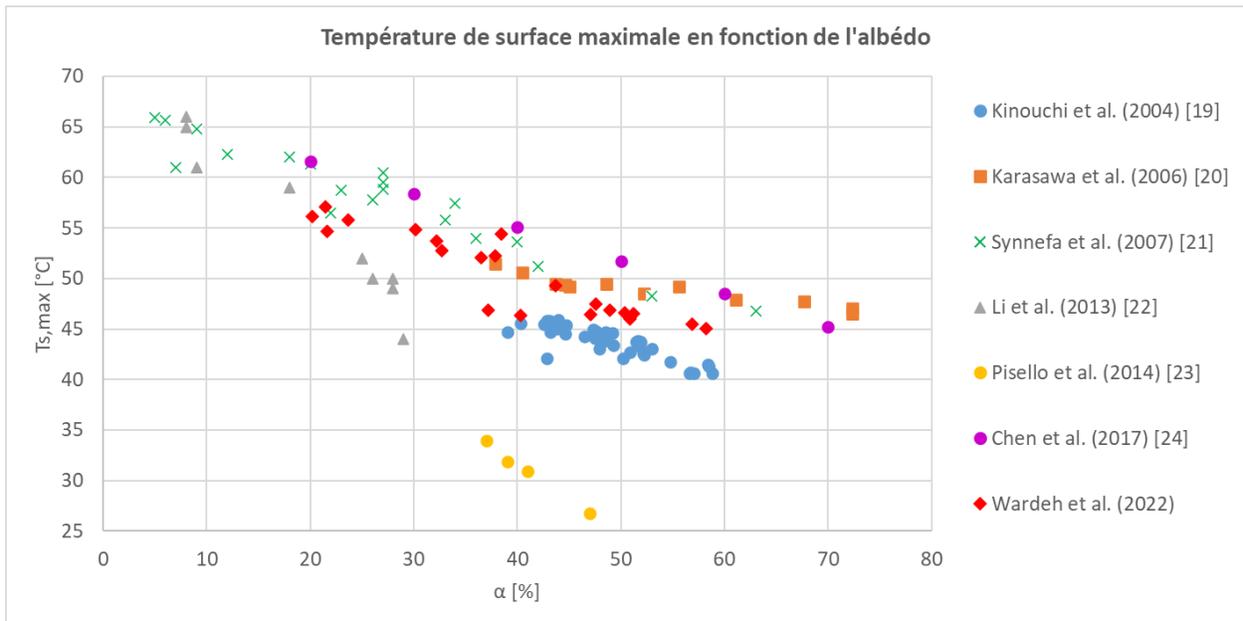


Figure III.27. Température de surface maximale moyenne en fonction de l'albédo à l'état sec : valeurs de la bibliographie (indiquées par référence) et nos valeurs

4.1.2. Relation entre la température de surface maximale moyenne et la conductivité thermique

La Figure III.28 présente les résultats de température de surface maximale en fonction de la conductivité thermique.

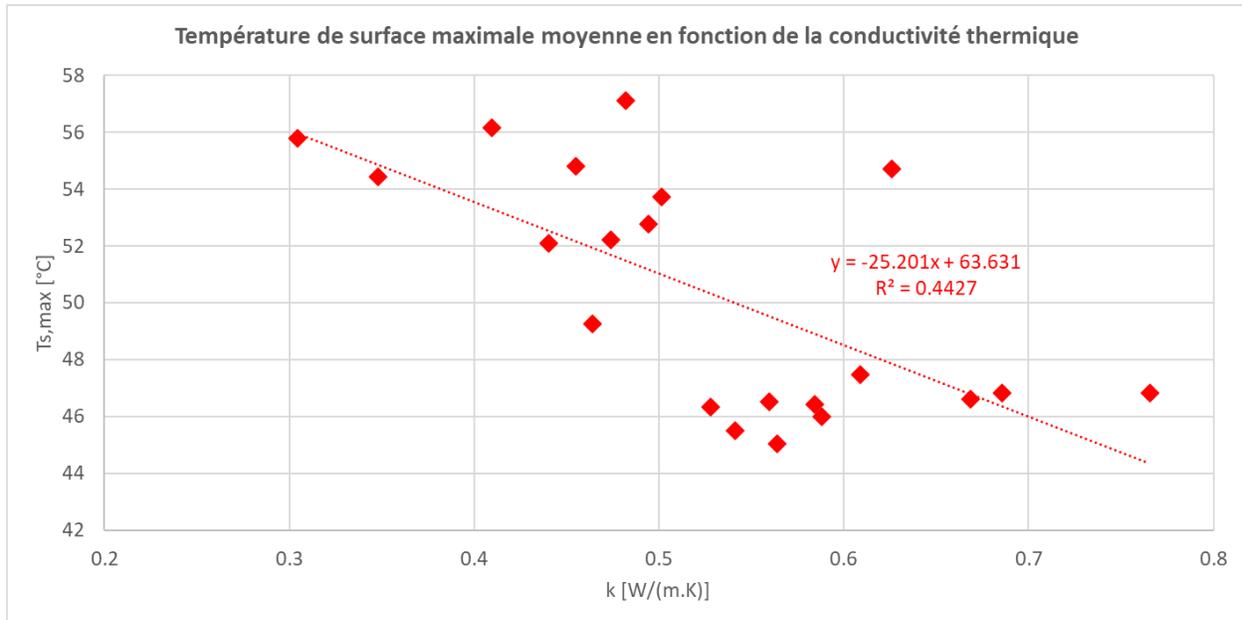


Figure III.28. Température de surface maximale moyenne en fonction de la conductivité thermique à l'état sec

On peut voir sur cette figure qu'il existe une faible corrélation linéaire négative ($R^2 = 0,44$) entre la température de surface maximale et la conductivité thermique. En comparant ce résultat avec celui montré sur la Figure III.26, on peut en déduire que c'est surtout l'albédo qui influence la température de surface maximale à l'état sec.

Pour confirmer cette affirmation, on a incorporé dans la Figure III.29 nos propres résultats dans le graphe du chapitre I qui regroupe les résultats des références. Dans cette figure, on observe que nos résultats de $T_{s,max}$ et k sont beaucoup plus faibles que ceux des références citées. En effet, les valeurs maximales de $T_{s,max}$ et k dans notre travail étaient de 57,1°C (pavé 10) et 0,765 W.m⁻¹.K⁻¹ (pavé 12). Toutes les valeurs trouvées de $T_{s,max}$ dans la littérature sont supérieures à 57,1°C à l'exception de l'étude de Wang et al. (2010) qui contient seulement deux valeurs relativement inférieures.

La Figure III.29 montrerait donc que la conductivité thermique commencerait à influencer sur la température de surface de nos pavés uniquement à partir d'une valeur supérieure à $2,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Autrement dit, avec une valeur de conductivité inférieure à ce seuil, la température de surface à l'état sec semble uniquement influencée par l'albédo.

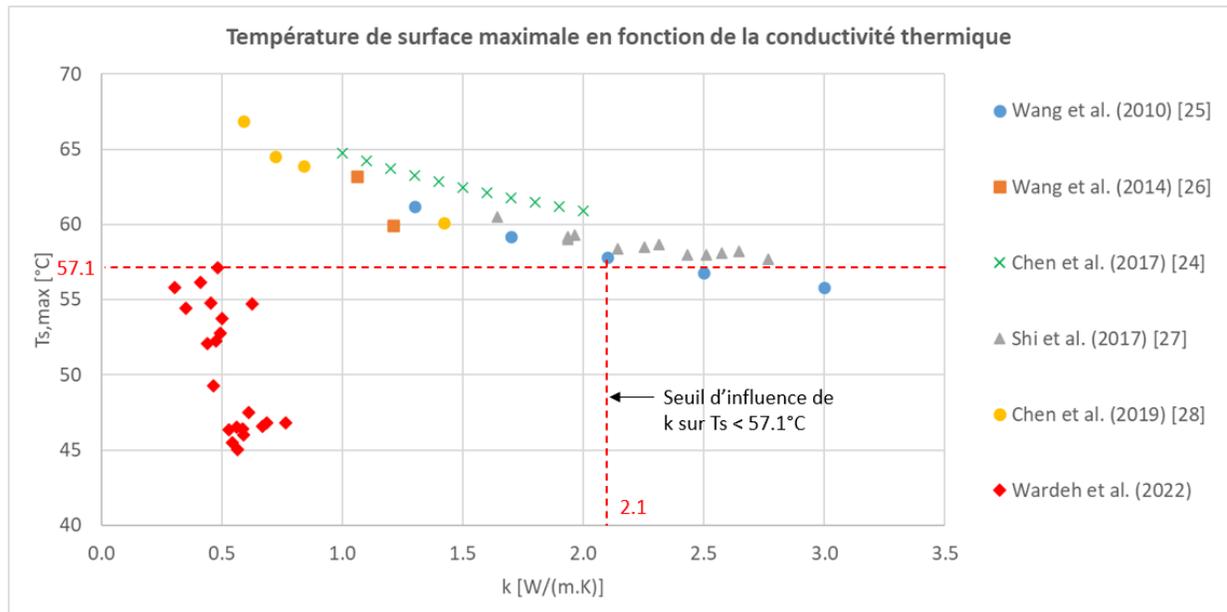


Figure III.29. Température de surface maximale moyenne en fonction de la conductivité thermique à l'état sec : valeurs de la bibliographie (indiquées par référence) et nos valeurs

4.2. Etat humide

Dans ce qui précède, on a vu que le pavé 9 a la plus faible conductivité hydraulique parmi les quatre pavés drainants, avec une valeur de $5,068 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$. En revanche, le pavé AE40 possède la plus grande conductivité hydraulique parmi les 17 pavés non drainants, avec une valeur de $4,702 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$. En comparant ces deux valeurs de conductivité, on remarque qu'il existe un ordre de grandeur de 10^5 entre les deux types de pavés. Ainsi, dans cette partie, on fera l'analyse des pavés en deux séries (drainants et non drainants) afin de trouver une corrélation entre la température de surface moyenne à l'état humide et les autres propriétés évaluées.

4.2.1. Cas des pavés drainants

La Figure III.30 montre la variation de la température de surface moyenne ($T_{s,moy}$) en fonction du terme $K\theta_{cap}$ pour les pavés drainants. Ce terme représente le produit entre la conductivité hydraulique (K) exprimée en $[\text{m/s}]$ et la fraction volumique des pores capillaires (θ_{cap}) en $[\%]$.

Θ_{cap} représente le rapport entre le volume d'eau capillaire ($V_{w,cap}$) et le volume d'eau maximal ($V_{w,max}$) qui correspond à la saturation :

$$\Theta_{cap} [\%] = \frac{V_{w,cap}}{V_{w,max}} \cdot 100 = \frac{m_{w,f}}{m_{sat,a} - m_s} \cdot 100 \quad \text{III.8}$$

Avec,

$m_{w,f}$: masse d'eau absorbée à la fin d'essai d'absorption capillaire [kg]

$m_{sat,a}$: masse saturée du pavé dans l'air [kg]

m_s : masse sèche du pavé [kg]

Le terme physique $K\Theta_{cap}$ reflète la quantité d'eau capillaire qui atteint la surface du pavé. En effet, Θ_{cap} exprime la quantité d'eau qui se trouve dans les pores capillaires internes, alors que K traduit la capacité du pavé à transporter cette quantité vers sa surface pour qu'elle soit évaporée. A noter toutefois que ce processus de transport est susceptible d'être perturbé par les forces gravitationnelles.

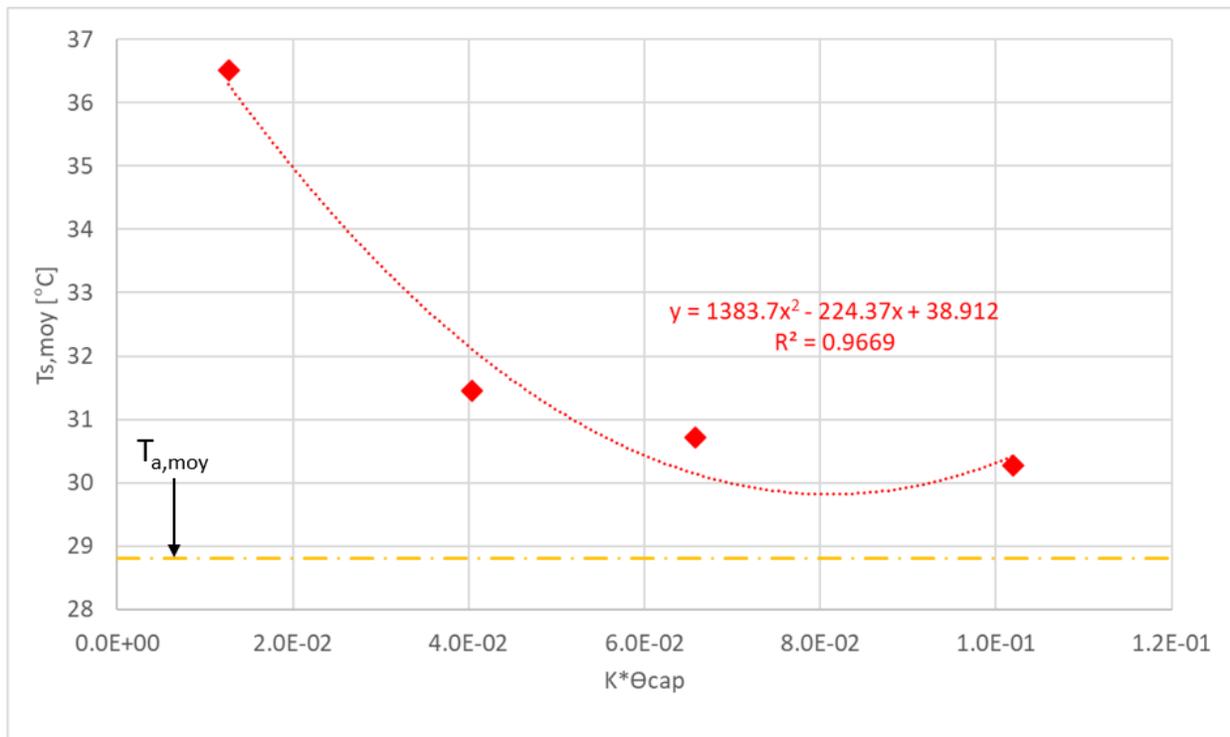


Figure III.30. Température de surface moyenne des pavés drainants en fonction du terme $K\Theta_{cap}$

Pour ces pavés drainants, une forte corrélation polynomiale du second degré, avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,97$, a été trouvée entre la température de surface moyenne ($T_{s,moy}$) et le terme $K\Theta_{cap}$. On voit aussi que la température de surface moyenne atteint une valeur

minimale proche de la température moyenne de l'air ($T_{a,moy}$) qui vaut 28,7°C. Cette valeur minimale obtenue correspond à une taille optimale de pores capillaires pour laquelle les forces capillaires dépassent celles de gravité. Il est à noter aussi que l'effet de rafraîchissement est maximal lorsque $T_{s,moy}$ est égale à $T_{a,moy}$.

4.2.2. Cas des pavés non drainants

La Figure III.31 montre la variation de la température de surface moyenne ($T_{s,moy}$) en fonction du terme $\alpha E_{th} \theta_{cap}$ pour les pavés non drainants. Ce terme représente le produit entre trois propriétés : l'albédo (α) en [%], l'effusivité thermique (E_{th}) en [J.m⁻².K⁻¹.s^{-0.5}] et la fraction volumique des pores capillaires (θ_{cap}) en [%]. Il exprime la quantité d'eau capillaire chauffée par la chaleur stockée dans le pavé, sans que sa surface soit réchauffée significativement. Plus ce terme est important, moins d'énergie s'accumule à la surface et plus d'énergie sera stockée au sein du pavé et donc plus d'eau capillaire se réchauffe par cette énergie emmagasinée, ainsi le phénomène d'évaporation d'eau par un processus de diffusion sera accentué. Néanmoins, ce processus d'évaporation par diffusion est susceptible d'être perturbé par la résistance du pavé à la diffusion de la vapeur d'eau.

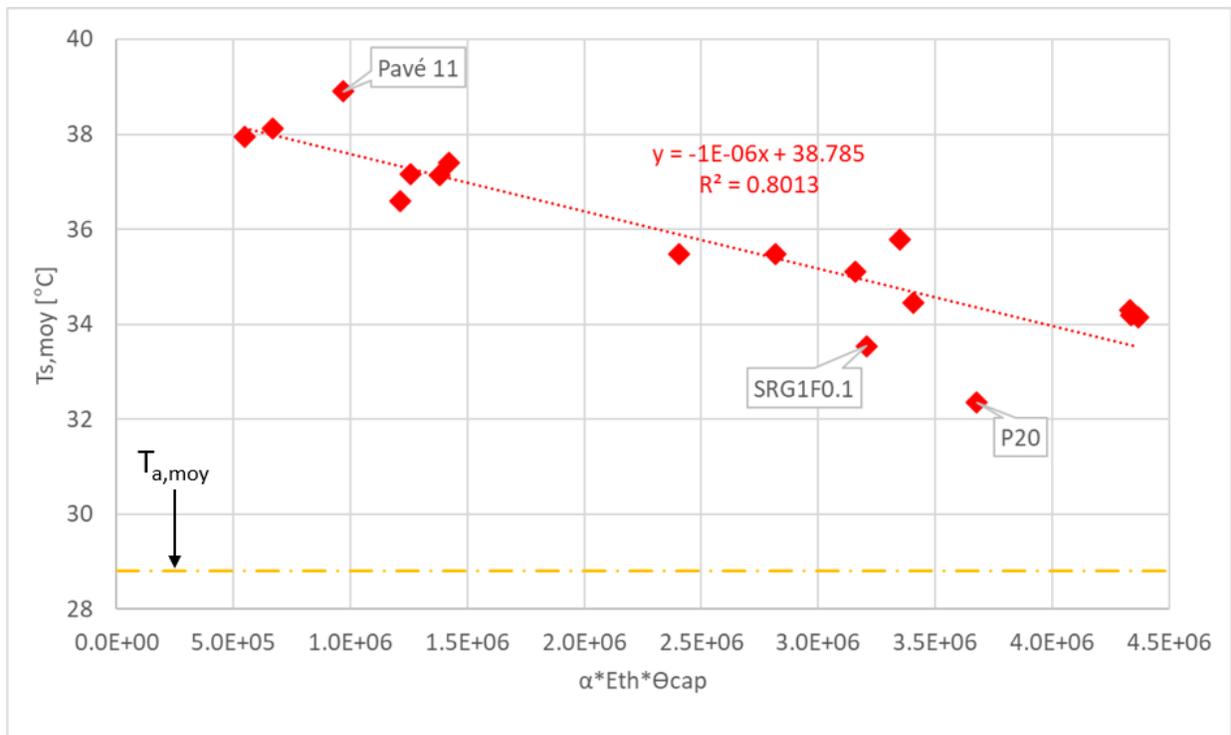


Figure III.31. Température de surface moyenne des pavés non drainants en fonction du terme $\alpha E_{th} \theta_{cap}$

Pour ces pavés non drainants, une bonne corrélation linéaire négative, avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,80$, a été trouvée entre la température de surface moyenne ($T_{s,moy}$) et le terme $\alpha E_{th} \Theta_{cap}$. De plus, il peut être observé que les pavés P20 et SRG1F0.1 (pavés non drainants les plus rafraîchissants) et le pavé 11 (pavé non drainant le moins rafraîchissant) se démarquent de la corrélation trouvée. Ceci peut être attribué, comme déjà mentionné, à la résistance du pavé à la diffusion de la vapeur d'eau. Cette résistance peut être caractérisée à travers des essais de perméabilité à la vapeur d'eau. Ensuite, une bonne connaissance de cette résistance pourra améliorer la corrélation trouvée.

4.2.3. Relation entre le taux d'évaporation et la température de surface

Les études antérieures ont montré que la température de surface est négativement corrélée au taux d'évaporation [18,20,29,32,35,36]. Pour vérifier cette corrélation, la température de surface et la perte de masse ont été mesurées chaque une heure pendant l'essai d'exposition au simulateur solaire qui a duré 8 heures. La variation de la température de surface moyenne en fonction du taux d'évaporation moyen pendant cet essai est présentée dans la Figure III.32. Celle-ci montre une forte corrélation linéaire négative, d'ordre $R^2 = 0,92$, entre les deux propriétés mesurées, révélant ainsi que pour les deux séries des pavés (drainants et non drainants), c'est l'évaporation qui contrôle la température de surface des pavés à l'état humide.

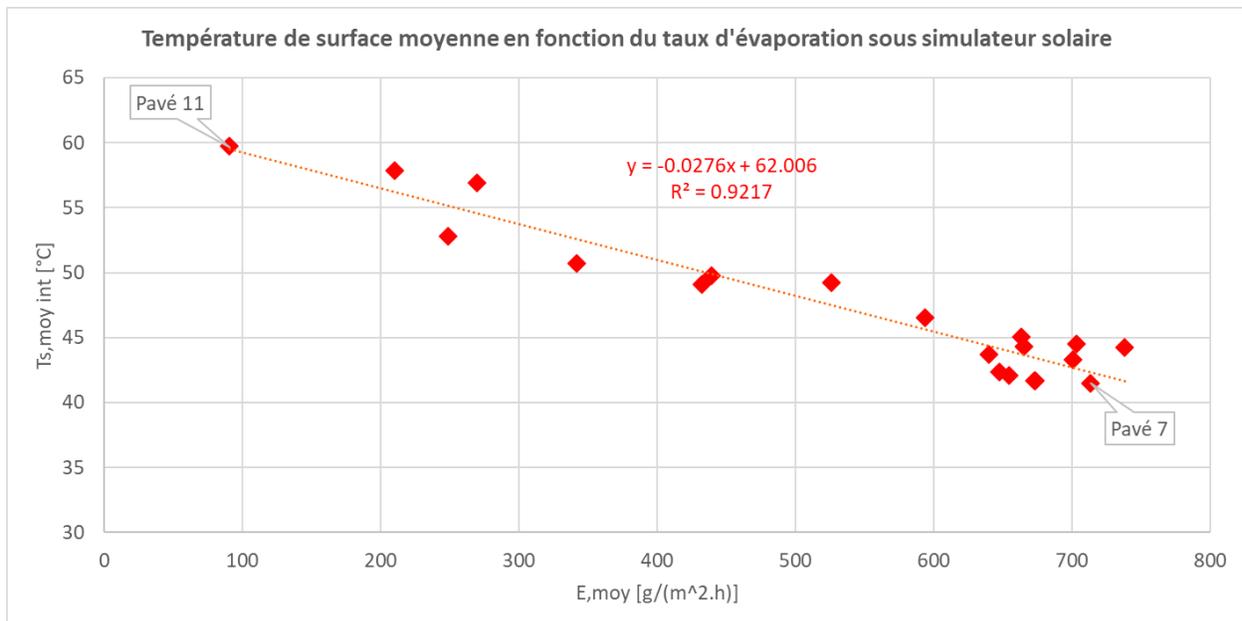


Figure III.32. Température de surface moyenne en fonction du taux d'évaporation moyen sous l'essai d'exposition au simulateur solaire

Cependant, en comparant les températures de surface moyennes intérieures (sous le simulateur solaire) et extérieures (sous le rayonnement solaire), on a trouvé, qu'à l'exception des pavés 7 et 11, ces températures n'ont pas les mêmes tendances, comme le montre la Figure III.33. En effet, ces deux pavés mentionnés sont des pavés extrêmes en termes de température de surface dans les deux situations. Cette inconsistance entre les tendances, à l'intérieur et à l'extérieur, est également observée pour les températures de surface maximales. Ce désaccord est dû principalement au spectre du simulateur solaire utilisé dans cette expérience, qui s'avère différent de celui du soleil.

En comparant, les résultats de la température de surface avec ceux de la littérature, on a trouvé que les premiers sont plus élevés avec des différences qui dépassent 9,3°C. Cet écart est dû notamment à la durée pendant laquelle la moyenne de température est calculée et à la valeur du rayonnement solaire appliqué. En effet, dans cette expérience, la température de surface moyenne est calculée pendant 8 heures d'exposition à un rayonnement solaire de 1000 W/m², alors que dans les autres études, cette durée peut s'étendre sur plusieurs jours avec un rayonnement solaire variable et qui s'annule pendant la nuit, comme l'étude de [35].

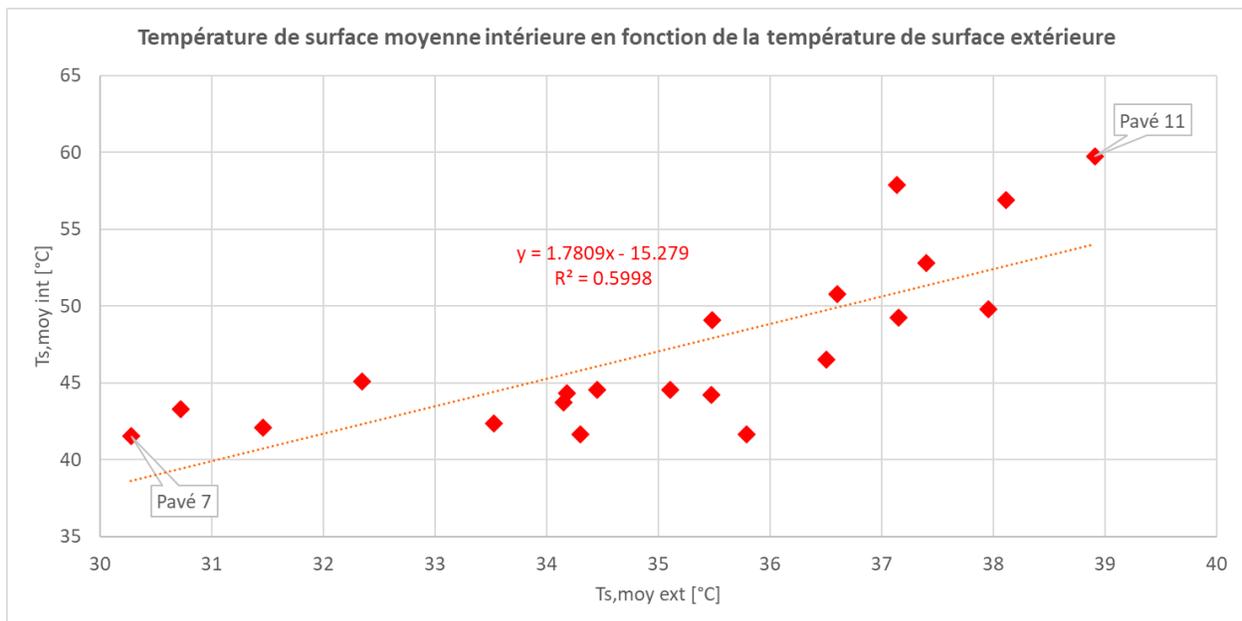


Figure III.33. Température de surface moyenne sous l'exposition au simulateur solaire en fonction de la température de surface moyenne pendant trois jours d'exposition à l'extérieur

Il est à noter que dans l'expérience d'exposition à l'extérieur, il était compliqué de quantifier le taux d'évaporation, qui sera employé dans la modélisation du chapitre IV, pour les raisons suivantes :

- Le risque de perturber les chemins d'eau capillaires qui alimentent la surface, quand le pavé est retiré du bac, essuyé, pesé, puis remis dans le bac.

- Le grand nombre de pavés exposés aux mêmes conditions extérieures, et par suite la difficulté de peser simultanément ces pavés.

Une solution qui pourrait résoudre cette limitation serait d'exposer chaque pavé au rayonnement solaire réel en utilisant l'eau à proximité comme référence. Dans ce cas-là, il faudra utiliser les moules en silicone (employés dans l'essai d'exposition au simulateur solaire) pour supporter le pavé et la couche d'eau ayant tous les deux la même épaisseur, ce qui permettra de calculer le taux d'évaporation relatif du pavé.

5. Conclusion

Dans ce chapitre, les résultats des mesures des propriétés thermo-physiques des pavés étudiés ont été présentés. Comme dans le chapitre précédent, ces résultats ont été classifiés en deux catégories : les propriétés physiques (comme la porosité ouverte, les capacités capillaires, la conductivité hydraulique et le taux d'évaporation) et les propriétés thermiques (comme l'albédo, la conductivité et l'effusivité thermique). Pour chaque catégorie, un tableau récapitulatif a été dressé pour synthétiser les valeurs trouvées en relevant les valeurs extrêmes. Pour les essais répétés plusieurs fois, nous avons ajouté aux graphes représentatifs des barres d'erreurs qui représentent les écart-types et les incertitudes composées élargies aux tableaux récapitulatifs des résultats.

Ensuite, la variation de la température de surface des pavés au cours de la journée, pour trois jours d'exposition et pour chaque état (sec et humide) a été présentée. Les résultats de la température de surface moyenne et maximale moyenne pendant les trois jours ont été ensuite résumés par des histogrammes et par des tableaux récapitulatifs. Une grande différence entre les résultats des pavés provenant de la série (BI) a été observée : cela est dû principalement aux différents types de matériaux qui constituent ces pavés. Cette dispersion a été notamment observée depuis le premier essai réalisé, portant sur la porosité ouverte et la masse volumique apparente. De plus, dans la série (BI), on note la présence de quatre pavés drainants caractérisés par leur haute conductivité hydraulique par rapport aux autres pavés de la même série. Cela nous a conduit à séparer les pavés en fonction des résultats de mesure de la conductivité hydraulique selon la méthode adoptée (ordre de grandeur qui ne permet pas de présenter ces résultats dans un même graphique).

Les corrélations entre la température de surface et les autres propriétés ont été analysées en répartissant les pavés en deux catégories selon l'état : corrélations à l'état sec et corrélations à l'état humide.

Comme attendu pour l'état sec des pavés, une forte corrélation linéaire négative, de $R^2 = 0,83$, entre la température de surface maximale et l'albédo a été mise en évidence. Ce résultat est tout à fait en accord avec la littérature. En effet, plus l'albédo est important, moins l'énergie solaire est absorbée par la surface du pavé. De plus, les couples de valeurs mesurées de la température de surface maximale et d'albédo se trouvent entièrement dans l'enveloppe des valeurs de la littérature.

En revanche, une faible corrélation linéaire négative, de $R^2 = 0,44$, a été observée entre la température de surface maximale et la conductivité thermique à l'état sec. De plus, en comparant nos propres résultats avec ceux de la littérature, nous avons constaté qu'il existe un seuil de la conductivité thermique qui peut influencer la valeur de la température de surface maximale. Au dessous de ce seuil, cette température à l'état sec serait principalement contrôlée par l'albédo.

Pour ce qui concerne les pavés dans leur état humide, les déterminations des corrélations entre la température de surface moyenne et l'albédo ont été divisées en deux groupes selon que les pavés soient drainants ou non drainants.

Pour les pavés drainants à l'état humide, une forte corrélation polynomiale du second degré, avec $R^2 = 0,97$, a été trouvée entre la température de surface moyenne ($T_{s,moy}$) et le terme $K\theta_{cap}$ qui reflète la quantité d'eau capillaire qui arrive à la surface pour qu'elle soit évaporée. Cependant, ce processus de transport est susceptible d'être perturbé par les forces de gravité. En effet, il existe une taille optimale de pores capillaires pour laquelle les forces capillaires dépassent celles de gravité, conduisant à atteindre la valeur minimale de $T_{s,moy}$.

Pour les pavés non drainants à l'état humide, une bonne corrélation linéaire négative, avec $R^2 = 0,80$, a été trouvée entre la température de surface moyenne ($T_{s,moy}$) et le terme $\alpha E_{th}\theta_{cap}$ qui exprime la quantité d'eau capillaire chauffée par la chaleur emmagasinée dans le pavé, sans que sa surface soit réchauffée significativement. Ce processus d'évaporation par diffusion est apparemment gêné par la résistance du matériau à la diffusion de la vapeur d'eau. Une bonne connaissance de cette résistance pourra améliorer la corrélation obtenue.

Comme prévu, une forte corrélation linéaire négative, de $R^2 = 0,92$, a été constatée entre la température de surface moyenne et le taux d'évaporation moyen pendant l'essai d'exposition au simulateur solaire. Les valeurs de ce taux seront employées pour valider le modèle qui sera développé dans le chapitre suivant.

Le chapitre IV sera dédié au développement d'un modèle numérique capable de prédire l'évolution de la température de surface du pavé dans les conditions réelles. Ce modèle doit permettre également d'examiner l'influence de certaines propriétés thermo-physiques sur le comportement hygrothermique du pavé. La construction de ce modèle sera principalement

basée sur les propriétés thermo-physiques évaluées et sur les conditions climatiques estivales mesurées par une station météo située à environ 500 m du lieu d'exposition.

Chapitre IV : Modélisation numérique

1. Introduction

Dans le chapitre III, les résultats des mesures des propriétés thermo-physiques des pavés ont été présentés et les variations mesurées des températures journalières de surface ont été également tracées. Dans ce chapitre, ces résultats expérimentaux sont utilisés pour contribuer à l'élaboration d'un premier modèle numérique capable de prédire la variation de la température de surface du pavé (qui est un indicateur particulièrement pertinent pour notre étude) en fonction du temps et dans les conditions réelles. Cette prédiction sera validée en comparant les profils de température de surface, expérimentaux et numériques, pendant les trois jours d'exposition. Dans un premier temps, nous procédons tout d'abord à une validation d'un modèle représentant l'état sec des pavés avant de passer à l'état humide. Les données météo de la station Université Paul Sabatier (UPS) sont retenues. Celle-ci a été choisie comme étant la station la plus proche de l'endroit d'exposition des pavés aux conditions climatiques extérieures. L'outil employé pour la modélisation est « COMSOL Multiphysics 6.0 ». Cet outil est caractérisé par des interfaces prédéfinies, capables de simuler les transferts couplés de chaleur et de masse, à travers des équations différentielles aux dérivées partielles.

2. Modèle numérique à l'état sec

2.1. Géométrie

Le pavé est modélisé en 3D sur « COMSOL 6.0 », comme un parallélépipède de côtés $L_s = 10$ cm et d'épaisseur $H_s = 4,5$ cm (Figure IV.1). Cette forme tridimensionnelle rend le modèle plus réaliste et offre la possibilité d'ajouter les flux sur les faces latérales du pavé.

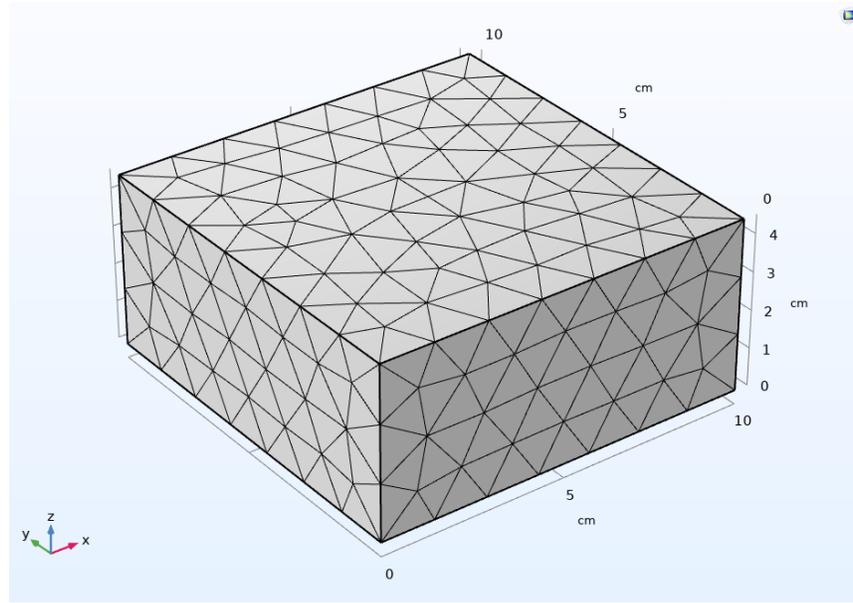


Figure IV.1. Pavé en 3D sur COMSOL

2.2. Hypothèses

Sur le plan technique, la plateforme du chariot qui supporte les pavés est en bois. Elle est surélevée par rapport au sol grâce aux roues qui pilotent le chariot, formant ainsi une couche d'air entre la plateforme et le sol. En première approximation, on peut donc supposer que la base du pavé est isolée thermiquement et qu'elle n'est pas soumise à un flux de chaleur venant de l'extérieur.

Les pavés étudiés sont considérés isotropes, leurs propriétés étant indépendantes de la direction.

Au début de l'exposition, la température est supposée uniformément répartie dans le pavé et égale à la température initiale de sa surface.

L'émissivité de la surface du pavé est considérée de sorte qu'elle obéisse à la loi de Kirchhoff, donnée par Cengel [80]. Elle est liée à l'albédo (α) selon la relation suivante :

$$\varepsilon = 1 - \alpha \quad \text{IV.1}$$

Cette approche est également adoptée par Kumar et Arakeri [81] dans leur équation du bilan énergétique qui se produit à la surface du pavé. Dans leur bilan, le rayonnement total est multiplié par l'émissivité du pavé pour exprimer le rayonnement absorbé par la surface.

Les données météo mesurées par la station (UPS), située à d'environ 500 m de l'endroit d'exposition des pavés, sont censées être les mêmes que celles qui sont présentes autour de ces pavés pendant la durée d'exposition. La pression atmosphérique est supposée constante, égale à 1 atm.

2.3. Equation Gouvernante

En faisant l'hypothèse que l'on ait affaire principalement à un transfert thermique conductif, l'équation qui régit le transfert de chaleur dans le pavé est donnée par la loi de Fourier [18,82] comme suit :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad \text{IV.2}$$

Avec,

ρ : masse volumique apparente du pavé [kg/m^3]

C_p : chaleur spécifique du pavé [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

k : conductivité thermique du pavé [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

T : température [K]

t : temps [s]

Cette équation permet de calculer la température et elle est présentée par le module « Transfert de chaleur dans les solides » dans COMSOL.

2.4. Conditions initiales et aux limites

La condition initiale utilisée pour ce modèle est la température initiale du pavé qui est supposée être égale à sa température de surface initiale. Celle-ci a été mesurée par la caméra thermique à l'intérieur de la salle climatisée, juste avant de sortir les pavés à l'extérieur.

La Figure IV.2 illustre le bilan énergétique qui se produit dans le pavé sec exposé aux conditions extérieures.

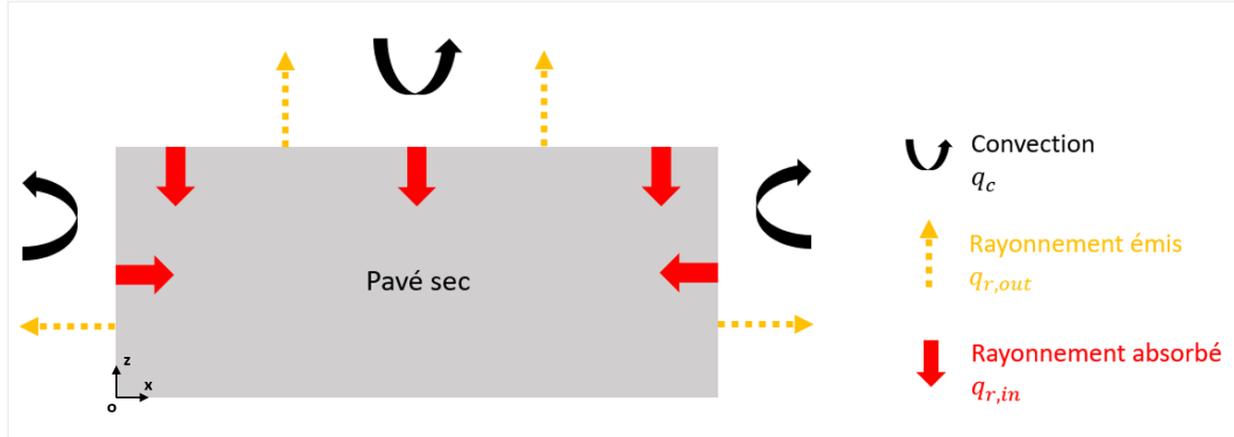


Figure IV.2. Phénomènes produits sur le pavé sec dans les conditions extérieures

Pendant l'exposition, la face supérieure et les faces latérales du pavé sont soumises au rayonnement solaire et au vent. Le flux thermique appliqué sur ces limites est donc formé d'un flux de rayonnement entrant dans le pavé ou absorbé par le pavé ($q_{r,in}$), d'un flux de rayonnement sortant du pavé (ou émis par le pavé) ($q_{r,out}$), et d'un flux de convection (q_c). Par conséquent, le flux total appliqué sur chacune de ces surfaces limites (en $x = 0$, $x = L_s$, $y = 0$, $y = L_s$ et $z = H_s$) sera :

$$q = q_{r,in} - q_{r,out} - q_c \quad \text{IV.3}$$

$$q_{r,in} = (1 - \alpha) R_s \quad \text{IV.4}$$

Avec,

$q_{r,in}$: flux de rayonnement entrant [W/m^2]

α : albédo du pavé [-]

R_s : flux de rayonnement solaire incident [W/m^2]

$$q_{r,out} = \varepsilon \sigma (T^4 - T_a^4) \quad \text{IV.5}$$

Avec,

$q_{r,out}$: flux de rayonnement sortant [W/m^2]

ε : émissivité de la surface du pavé [-]

σ : constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$]

T : température de la face exposée [K]

T_a : température de l'air [K]

$$q_c = h_c (T - T_a) \quad \text{IV.6}$$

Avec,

q_c : flux de convection [W/m^2]

h_c : coefficient de convection [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]

T : température de la face exposée [K]

La face inférieure est en contact permanent avec la plateforme du chariot, et comme vu précédemment, le flux thermique appliqué à cette face est considéré comme nul.

2.5. Paramètres et Variables

Les paramètres introduits dans le modèle correspondent aux propriétés du pavé, notamment ses dimensions, ses caractéristiques thermo-physiques et sa température initiale. Ces paramètres sont présentés par le Tableau IV.1.

Tableau IV.1. Paramètres introduits dans le modèle à l'état sec

	Symbole	Nom	Valeur	Unité
Propriétés du pavé	L_s	Longueur	10	cm
	H_s	Hauteur	4,5	cm
	ρ	Masse volumique apparente	Mesurée	kg/m ³
	C_p	Chaleur spécifique	Mesurée	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
	k	Conductivité thermique	Mesurée	W.m ⁻¹ .K ⁻¹
	α	Albédo	Mesurée	-
	ε	Emissivité	$1 - \alpha$	-
	T_i	Température initiale	Mesurée	K

Les données météo pour les trois jours d'exposition (25, 26 et 31 août 2021) sont illustrées par Figure IV.3, Figure IV.4 et Figure IV.5, respectivement. Ces données sont l'humidité relative (HR), la température de l'air (T_a), le rayonnement solaire (R_s) et la vitesse de l'air (U_a). Elles sont des variables qui dépendent du temps et ont été mesurées par la station (UPS) à un intervalle de temps d'une demi-heure pendant 9 heures pour chaque jour. Les données qui sont utilisées dans ce modèle sont la température de l'air, le rayonnement solaire et la vitesse de l'air.

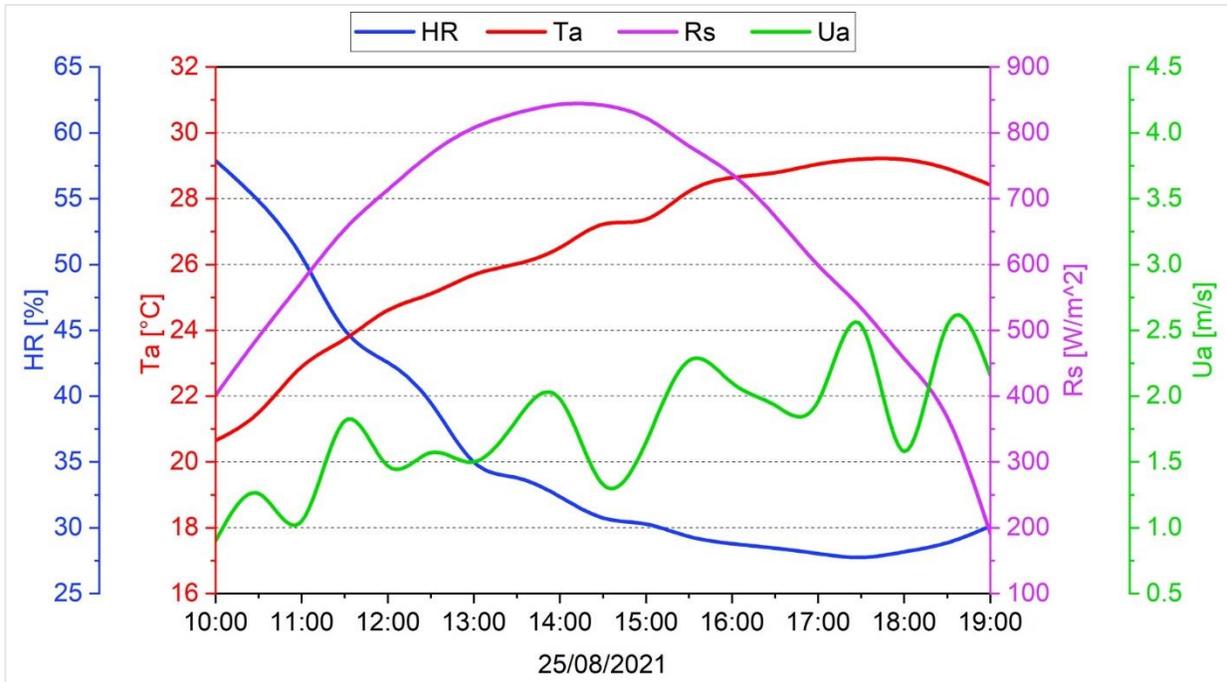


Figure IV.3. Données météo du 25/08/2021

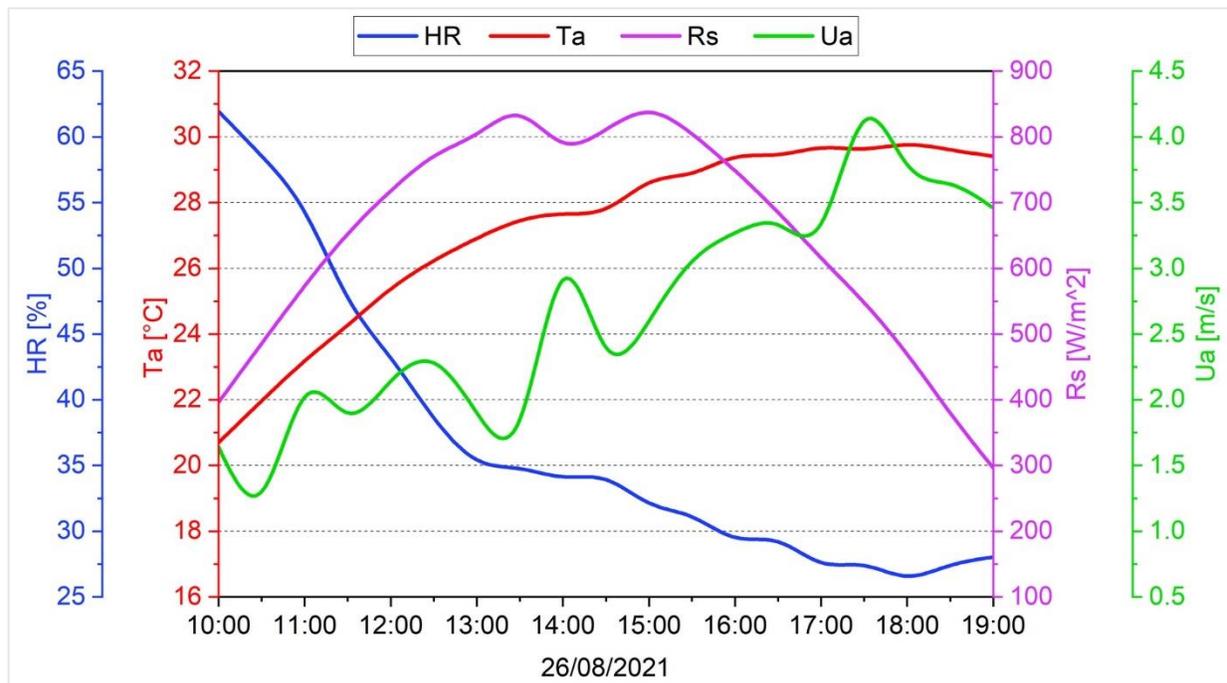


Figure IV.4. Données météo du 26/08/2021

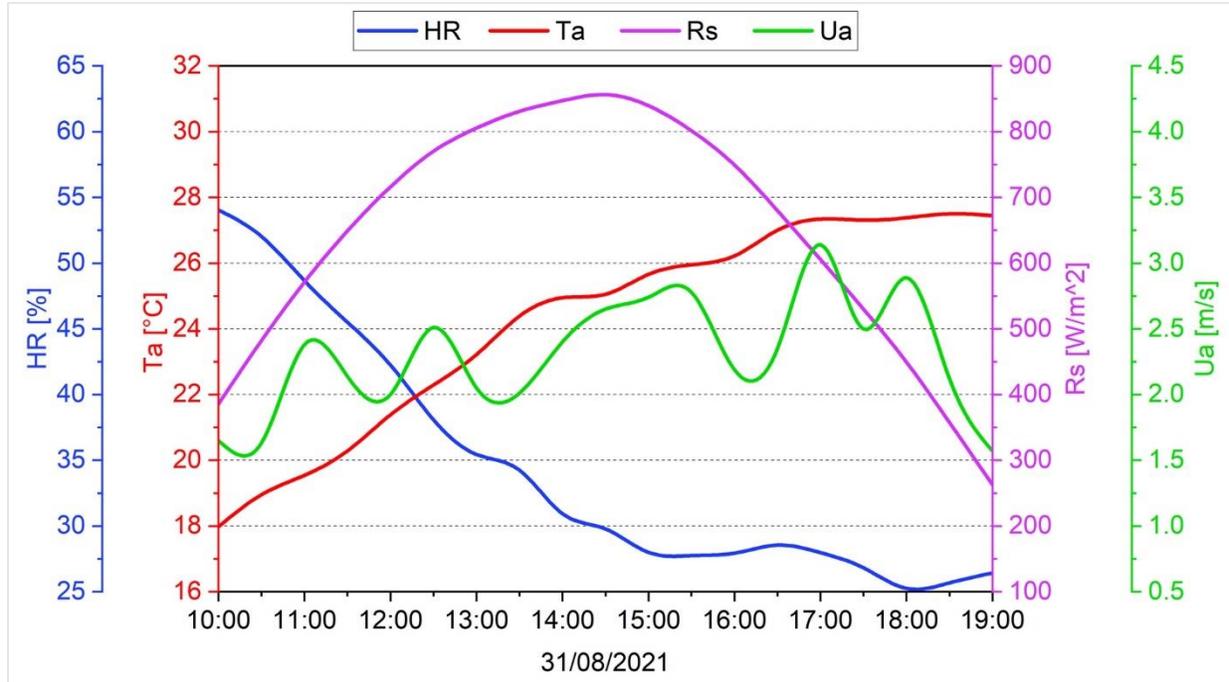


Figure IV.5. Données météo du 31/08/2021

Le coefficient de convection (h_c) est une variable qui dépend du nombre de Nusselt (Nu), de la conductivité thermique du film (k_f) et de la longueur caractéristique (L_c). Le coefficient de convection est donné par :

$$h_c = \frac{Nu k_f}{L_c} \quad \text{IV.7}$$

Avec,

- Nu : nombre de Nusselt [-]
- k_f : conductivité thermique du film [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
- L_c : longueur caractéristique [m]

La longueur caractéristique est la longueur parallèle au sens d'écoulement de l'air. Puisque dans ce modèle, les pavés ont une section carrée, cette longueur est égale au côté du pavé donc $L_c = L_s$.

Le film représente l'air qui s'écoule dans la couche limite thermique entre la surface du pavé et l'air environnant. Les propriétés thermo-physiques de ce film dépendent donc de sa température. Selon Cengel [80], cette température est la moyenne arithmétique entre la température de surface du pavé et celle de l'air environnant :

$$T_f = \frac{T_s + T_a}{2} \quad \text{IV.8}$$

Par conséquent, les propriétés du film représentent celles de l'air à une température (T_f). Les propriétés de l'air qui interviennent dans la modélisation sont les suivantes :

- La masse volumique (ρ_a),
- La chaleur spécifique ($C_{p,a}$),
- La conductivité thermique (k_a),
- La viscosité dynamique (μ_a).

Les propriétés de l'air en fonction de sa température à une pression de 1 atm, sont listées par Cengel [80] dans des tableaux, pour des températures comprises entre -150°C et 2 000°C.

Le Tableau IV.2 montre les valeurs extraites de [80] pour une gamme de température entre 0°C et 100°C. En se basant sur ce tableau, une fonction d'interpolation a été définie dans le modèle pour chaque propriété comme le montre la Figure IV.6. A partir de ces fonctions, les propriétés du film pour une température donnée, entre 0 et 100°C, peuvent être déterminées.

Tableau IV.2. Propriétés de l'air à une pression de 1 atm [80]

Température T [°C]	Masse volumique ρ [kg/m ³]	Chaleur spécifique C_p [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Conductivité thermique k [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Viscosité dynamique μ [Pa.s].10 ⁻⁵
0	1,292	1006	0,02364	1,729
5	1,269	1006	0,02401	1,754
10	1,246	1006	0,02439	1,778
15	1,225	1007	0,02476	1,802
20	1,204	1007	0,02514	1,825
25	1,184	1007	0,02551	1,849
30	1,164	1007	0,02588	1,872
35	1,145	1007	0,02625	1,895
40	1,127	1007	0,02662	1,918
45	1,109	1007	0,02699	1,941
50	1,092	1007	0,02735	1,963
60	1,059	1007	0,02808	2,008
70	1,028	1007	0,02881	2,052
80	0,999	1008	0,02953	2,096
90	0,972	1008	0,03024	2,139
100	0,946	1009	0,03095	2,181

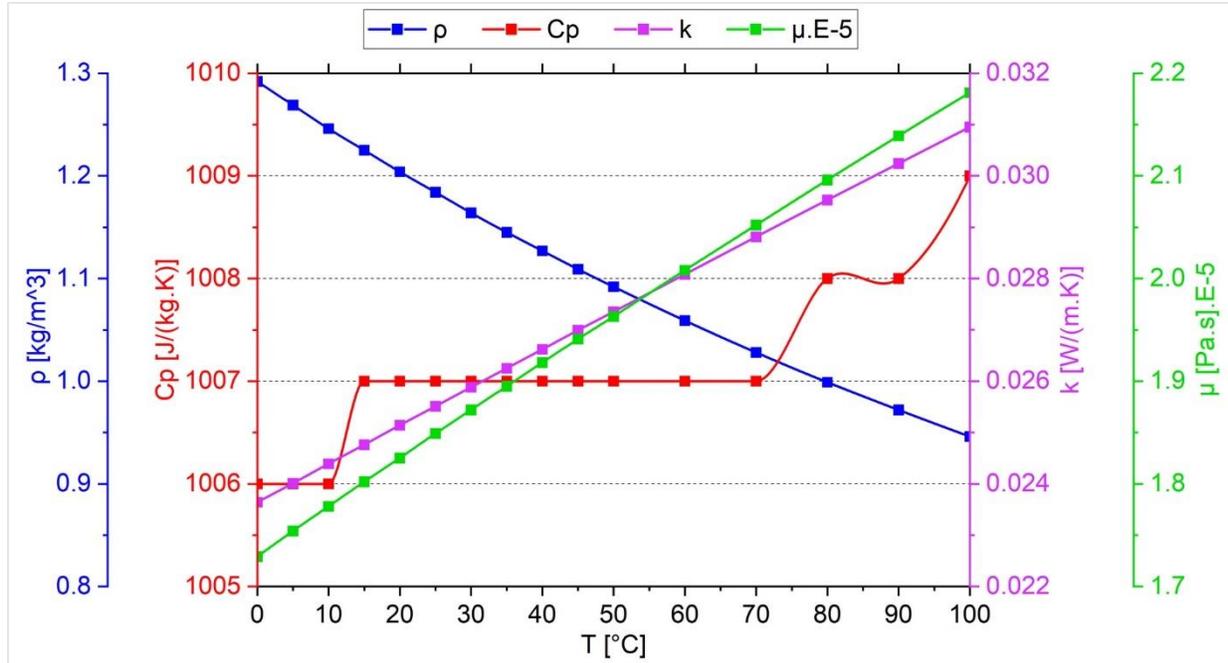


Figure IV.6. Courbes d'interpolation des propriétés de l'air basées sur les données de [80]

Dans le cas d'une convection forcée sur des plaques horizontales, le nombre de Nusselt (Nu) est donné par [80] selon le régime d'écoulement :

$$Nu = \begin{cases} 0,664 Re^{0.5} Pr^{(1/3)} & \text{si } Re < 5 \times 10^5 \text{ (régime laminaire)} \\ 0,037 Re^{0.8} Pr^{(1/3)} & \text{si } Re \geq 5 \times 10^5 \text{ (régime turbulent)} \end{cases} \quad \text{IV.9}$$

Avec,

Re : nombre de Reynolds [-]

Pr : nombre de Prandtl [-]

Le nombre de Reynolds (Re) est donné par l'équation suivante :

$$Re = \frac{\rho_f U_a L_c}{\mu_f} \quad \text{IV.10}$$

Avec,

ρ_f : masse volumique du film [kg/m^3]

U_a : vitesse de l'air [m/s]

μ_f : viscosité dynamique du film [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]

Le nombre de Prandtl (Pr) est calculé comme suit :

$$Pr = \frac{\mu_f C_{p,f}}{k_f} \quad \text{IV.11}$$

Où $C_{p,f}$ représente la chaleur spécifique du film [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]

Les variables utilisées dans le modèle à l'état sec sont récapitulées dans le Tableau IV.3.

Tableau IV.3. Variables employées dans le modèle à l'état humide

Symbole	Nom	Expression/Valeur	Unité
HR	Humidité relative	Données météo	-
T_a	Température de l'air	Données météo	K
R_s	Rayonnement solaire	Données météo	W/m ²
U_a	Vitesse de l'air	Données météo	m/s
h_c	Coefficient de convection	$\frac{Nu k_f}{L_c}$	W.m ⁻² .K ⁻¹
T_f	Température du film	$(T_s + T_a)/2$	K
Nu	Nombre de Nusselt	$0,664 Re^{0.5} Pr^{(1/3)}$. si $Re < 5 \times 10^5$ $0,037 Re^{0.8} Pr^{(1/3)}$. si $Re \geq 5 \times 10^5$	-
Re	Nombre de Reynolds	$\frac{\rho_f U_a L_c}{\mu_f}$	-
Pr	Nombre de Prandtl	$\frac{\mu_f C_{p,f}}{k_f}$	-

La durée de l'étude est réglée à 9 heures avec un pas de temps d'une heure. Ce réglage est compatible avec l'expérience d'exposition à l'extérieur dans laquelle la température de surface a été mesurée chaque heure pendant 9 heures.

Le maillage grossier triangulaire est adopté comme le montre la Figure IV.1, comprenant 2091 éléments au total. Cette taille de maillage est employée vu que son raffinement n'a pas d'influence sensible sur les résultats, mais il augmente significativement la durée de calcul. L'ordinateur utilisé pour la simulation est de type Intel Core™ i7 – 10510U avec 8 GB de RAM. La simulation a demandé 147 pas de calcul, avec un pas de temps autodéterminé par le logiciel et une tolérance relative d'ordre 10⁻⁴.

La démarche suivie pour construire et valider le modèle à l'état sec, est illustrée par la Figure IV.7.

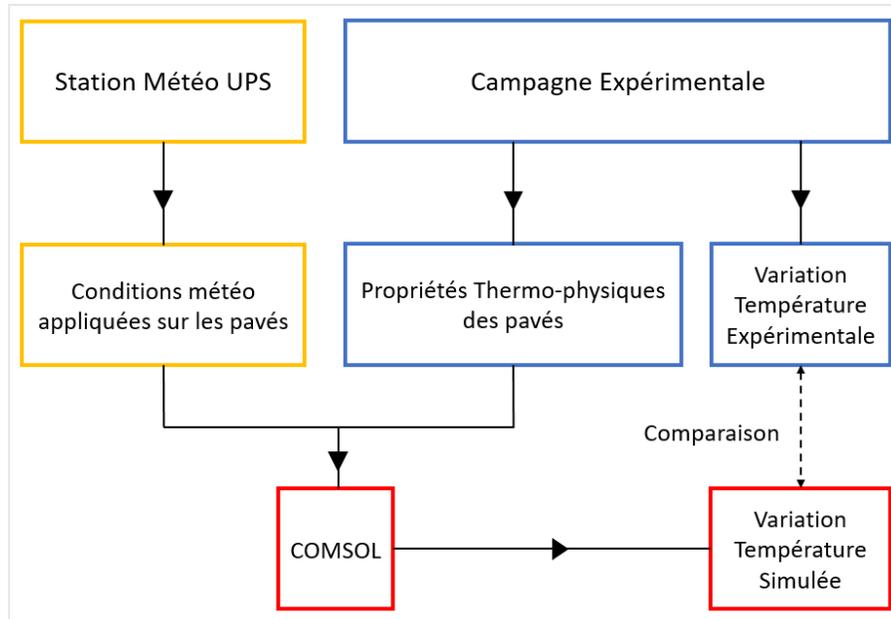


Figure IV.7. Démarche de construction et de validation du modèle à l'état sec

2.6. Validation du modèle à l'état sec

Avant de passer à la modélisation à l'état humide, il est primordial de valider le modèle à l'état sec. En effet, à l'état humide, il existe un plus grand nombre de paramètres et de variables qui interviennent dans la construction du modèle. Si un écart entre les résultats numériques et expérimentaux est trouvé, il sera difficile de chercher les sources de cet écart.

La validation du modèle à l'état sec dans les conditions extérieures est réalisée en comparant les profils de température de surface, expérimentaux et numériques, pendant les trois jours d'exposition. Cette comparaison a été basée sur les deux pavés extrêmes en termes de température de surface moyenne mesurée pendant cette durée. Ces pavés sont le pavé P20 (le plus rafraîchissant avec $T_{s,moy} = 38,0^{\circ}\text{C}$), et le pavé 9 (le moins rafraîchissant avec $T_{s,moy} = 46,5^{\circ}\text{C}$).

Les résultats des températures de surface, expérimentales et numériques, pour ces deux pavés, pendant les trois jours d'exposition (25, 26 et 31 août 2021), sont illustrés par Figure IV.9, Figure IV.8 et Figure IV.10, respectivement. Les profils de la température expérimentale sont tracés en ligne pointillée, alors que ceux de la température modélisée sont présentés en ligne continue.

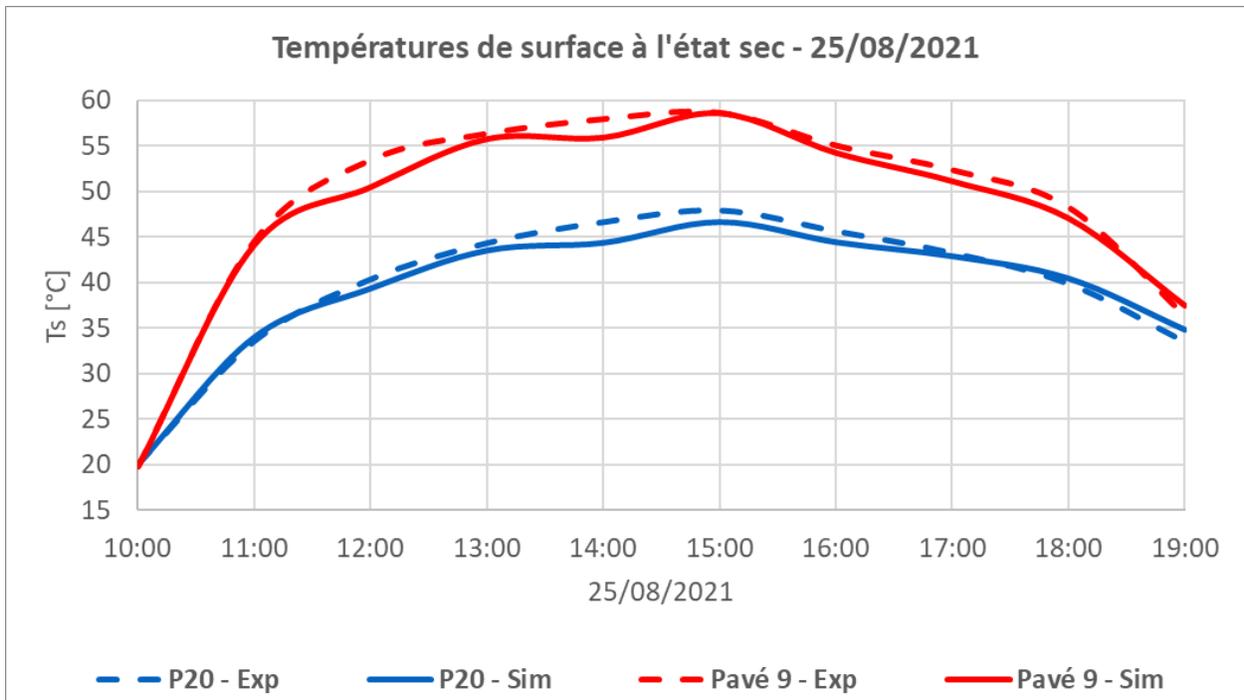


Figure IV.9. Températures de surface du P20 et du pavé 9 à l'état sec le 25/08/2021

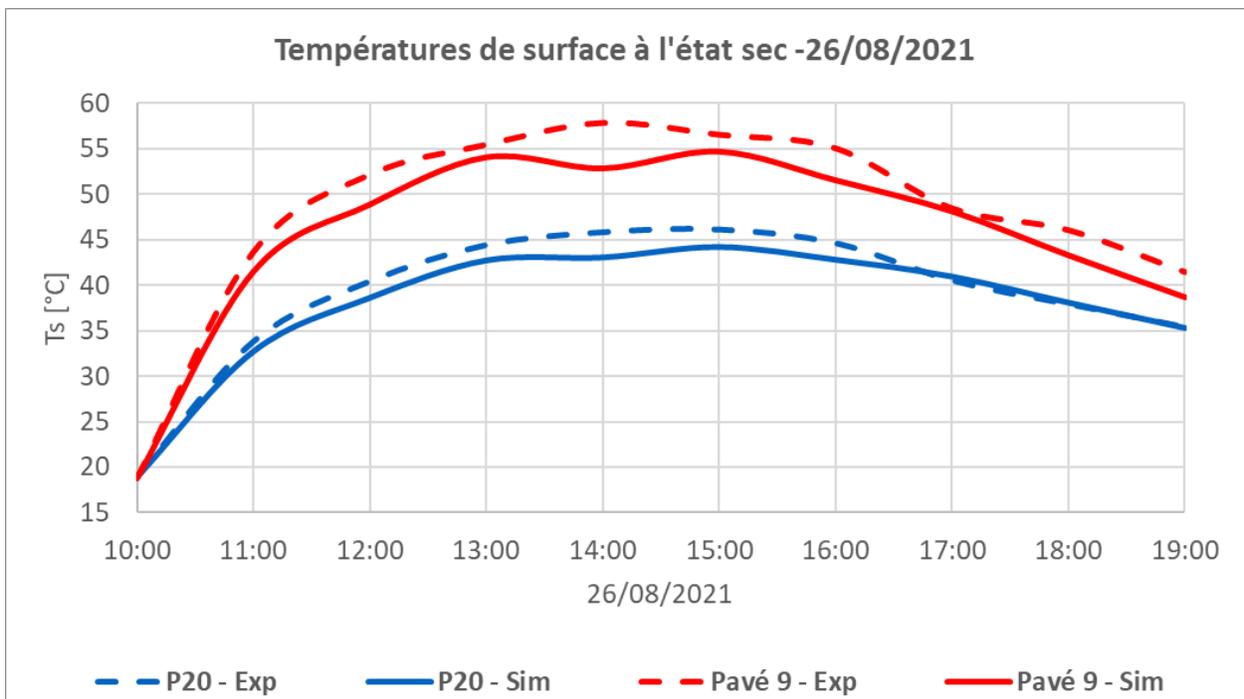


Figure IV.8. Températures de surface du P20 et du pavé 9 à l'état sec le 26/08/2021

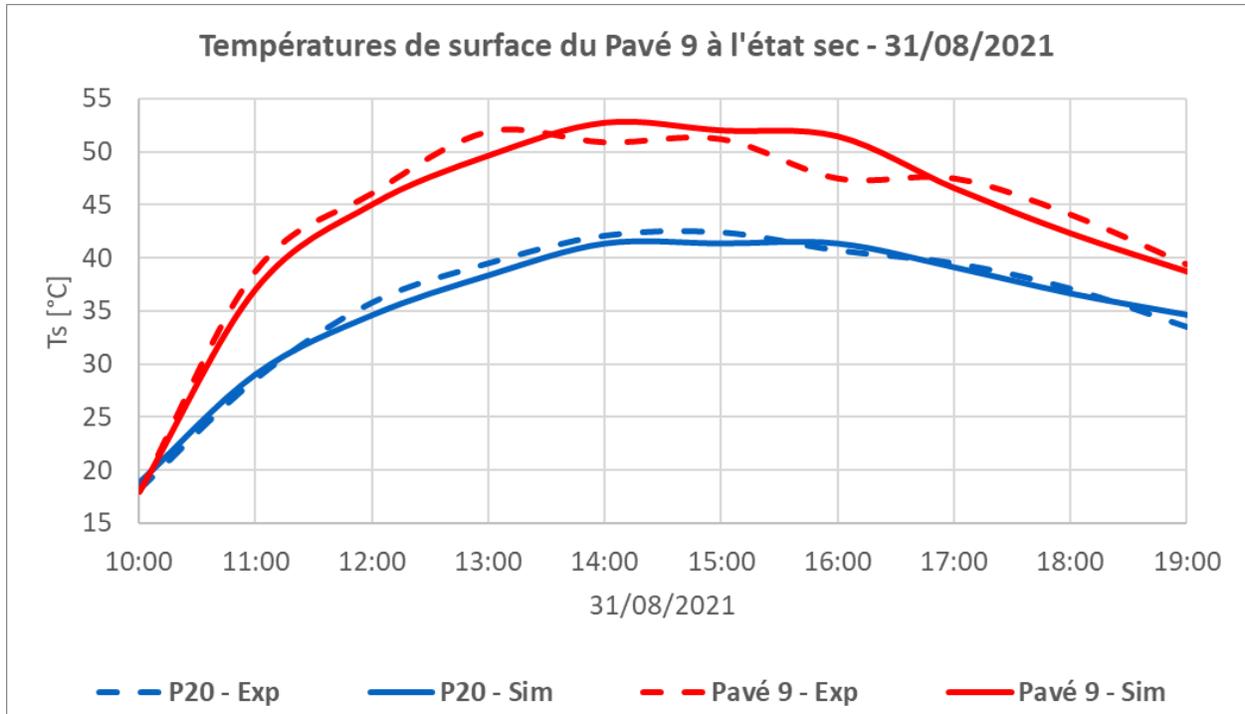


Figure IV.10. Températures de surface du P20 et du pavé 9 à l'état sec le 31/08/2021

La comparaison entre les profils de température de surface, expérimentale et numérique, est basée sur trois indices statistiques : l'erreur absolue maximale (EA_{max}), l'erreur absolue moyenne (MAE) et le coefficient de détermination (R^2).

L'erreur absolue maximale (EA_{max}), exprimée en [°C], est calculé comme suit :

$$EA_{max} = \text{Max}|T_{sim}(t_i) - T_{exp}(t_i)| \quad \text{IV.12}$$

$T_{exp}(t_i)$ et $T_{sim}(t_i)$ désignent les températures de surface en [°C], expérimentale et simulée à l'instant (t_i), respectivement.

L'erreur absolue moyenne (MAE), en [°C], est donnée par l'expression suivante :

$$MAE = \frac{\sum_1^n |T_{sim}(t_i) - T_{exp}(t_i)|}{n} \quad \text{IV.13}$$

Où n représente le nombre de mesures de la température de surface.

L'expression du coefficient de détermination (R^2) est indiquée par l'équation III.3.

Le Tableau IV.4 montre les valeurs de EA_{max} , MAE et R^2 , pour les deux pavés choisis et pendant les trois jours d'exposition.

Tableau IV.4. Indices de comparaison des températures de surface à l'état sec

Date	Indice	P20	Pavé 9
25/08/2021	EA_{max} [°C]	2,4	3,0
	MAE [°C]	1,0	1,1
	R^2 [-]	0,99	0,99
26/08/2021	EA_{max} [°C]	2,8	5,0
	MAE [°C]	1,2	2,3
	R^2 [-]	0,99	0,99
31/08/2021	EA_{max} [°C]	1,2	4,0
	MAE [°C]	0,8	1,5
	R^2 [-]	0,99	0,97

D'après ce tableau, il peut être remarqué que les températures simulées sont fortement corrélées aux températures expérimentales avec des coefficients de détermination (R^2) supérieurs à 0,97.

Les valeurs maximales de EA_{max} sont atteintes le 26/08/2021, avec des valeurs de l'ordre de 5,0°C et 2,8°C pour le pavé 9 et le P20, respectivement. Ces écarts peuvent être notamment attribués aux différentes hypothèses et conditions météo prises en considération et surtout la vitesse du vent qui peut varier d'un endroit à un autre. En effet, en comparant les vitesses du vent pendant les trois jours d'exposition, il peut être remarqué que la vitesse moyenne du vent est de l'ordre de 2,7 m/s le 26/08, alors qu'elle vaut 1,8 m/s et 2,3 m/s le 25/08 et le 31/08, respectivement. Cette vitesse relativement élevée tend à diminuer la température de surface prédite, et, par suite, à sous-estimer les températures de surface du 26/08.

Identiquement à EA_{max} , MAE atteint ses valeurs maximales le 26/08. Elle est de l'ordre de 2,3°C pour le pavé 9 et de l'ordre de 1,2°C pour P20.

En se basant sur ces résultats, il peut être constaté que le modèle peut prédire, avec une bonne précision, la température de surface dans les conditions réelles à l'état sec. Malgré le fait que EA_{max} est de l'ordre de 5,0°C, la valeur de MAE ne dépasse pas 2,3°C. Cette valeur est exactement égale à l'incertitude composée élargie de la mesure par la caméra thermique, déterminée dans le chapitre III, montrant ainsi la fiabilité du modèle développé.

Enfin, cette première étape de modélisation révèle également que les propriétés thermo-physiques introduites sont bien évaluées expérimentalement, et que les conditions météo

mesurées sont utiles. Par conséquent, ces paramètres et variables seront employés dans le modèle à l'état humide qui sera abordé dans la partie suivante.

3. Modèle numérique à l'état humide

3.1. Introduction

Les modèles de transferts couplés de chaleur et de masse revêtent un intérêt majeur, en particulier dans le domaine de la recherche sur les matériaux de construction au sens large. Dans la littérature, on retrouve plusieurs modèles qui portent sur le séchage convectif par air chaud [82–86], ou par rayonnements micro-ondes [87–89]. De plus, on peut trouver d'autres modèles qui étudient le comportement hygrothermique des matériaux sous l'action d'écoulement laminaire d'air sec [90,91], ou sous une ambiance hygrothermique contrôlée [92–94].

Cependant, le nombre d'études numériques portant sur un séchage radiatif solaire reste bien limité. Dans ce cadre, on peut citer deux modèles pertinents : le premier est celui de Dong et al. [95] et l'autre a été développé par Fillet et al. [96].

- Dans le modèle de Dong et al. [95], les auteurs ont étudié les transferts couplés de chaleur et de masse dans un pavé retenant l'eau, soumis à un rayonnement infrarouge artificiel. Dans ce modèle, l'expression de la saturation en eau est donnée par le modèle de Van Genuchten (1980) [97]. Elle est exprimée en fonction de la charge hydraulique dans le matériau. Pour construire ce modèle, il s'avère donc primordial de mesurer la hauteur d'eau dans le matériau. Cependant, ce n'est pas le cas dans notre travail, puisque les pavés ont été scellés latéralement tout au long de l'expérience d'exposition, pour que l'évaporation s'effectue principalement au niveau de la surface du pavé.
- Le modèle de Fillet et al. [96] porte sur l'étude de transferts couplés dans une mousse rigide qui flotte à la surface d'eau, exposée à un rayonnement solaire artificiel. Ce modèle a été validé expérimentalement grâce à des résultats montrant la variation de la température et de la masse d'eau évaporée dans la mousse en fonction du temps.

Cependant, ces deux modèles portent sur des transferts dans des conditions intérieures contrôlées à l'abri du vent, c.à.d. avec des données climatiques comme le rayonnement solaire, la température ambiante et l'humidité relative qui ne varient pas au cours du temps. Dans le modèle de Fillet et al. [96], le rayonnement solaire absorbé est associé à trois valeurs distinctes (700, 1000 et 1300 W/m²), dont chacune correspond à un intervalle déterminé de la durée totale d'exposition.

Par conséquent, l'intérêt de notre travail réside dans la construction d'un modèle qui permet de prédire l'évolution de la température et de la masse d'eau évaporée des pavés dans les conditions réelles. Puisque le modèle de Fillet et al. [96] est très proche de notre travail, au niveau du principe, de l'équipement et du logiciel, notre modèle développé sera construit en se basant sur les équations de transfert adoptées dans ce modèle. Par suite, les étapes portant sur la construction du modèle dans les conditions réelles vont être explicitées.

3.2. Géométrie et Hypothèses

La même géométrie des pavés modélisés à l'état sec est adoptée pour le modèle à l'état humide, comme indiqué dans la Figure IV.1.

Les pavés à l'état humide sont placés dans des bacs contenant du gravillon surmonté par une pellicule d'eau permanente. Les bacs sont supportés par la plateforme du chariot mobile (Figure IV.11). En absence d'un contact entre la base du pavé et la terre, on peut considérer que le pavé est isolé thermiquement au niveau de sa base.

Les pavés sont supposés totalement saturés par l'eau liquide au début de l'exposition.

Les mêmes hypothèses mentionnées dans la modélisation de l'état sec sont prises en considération dans le modèle à l'état humide.

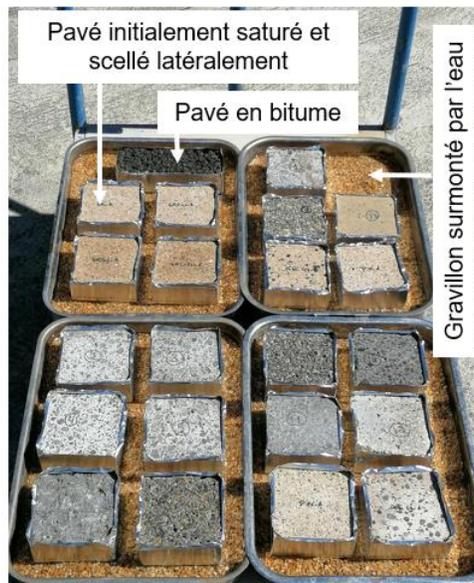


Figure IV.11. Pavés à l'état humide pendant l'exposition à l'extérieur

3.3. Equations gouvernantes

Les transferts couplés de chaleur et de masse dans les pavés à l'état humide, sont gouvernés par l'équation de transfert de chaleur et celle de transfert de masse.

L'équation de transfert de chaleur permet de calculer la température à travers le pavé, elle est basée sur la loi de Fourier comme l'indique l'équation IV.3, mais en utilisant les propriétés effectives du pavé. Elle est donnée par Fillet et al. [96] sous la forme suivante :

$$\rho_{eff} C_{p,eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k_{eff} \nabla T) = 0 \quad \text{IV.14}$$

Avec,

$\rho_{eff} C_{p,eff}$: capacité thermique volumique effective du pavé [J.m⁻³.K⁻¹]

k_{eff} : conductivité thermique effective du pavé [W.m⁻¹.K⁻¹]

T : température [K]

t : temps [s]

En se basant sur la deuxième loi de Fick [88,92], l'équation de transfert de masse donne la distribution de la quantité d'eau dans le pavé et donnée par [96] comme suit :

$$\rho_w \frac{\partial \varepsilon_w}{\partial t} + \nabla \cdot \left(-\rho_w D \frac{\varepsilon_w \rho_w}{\varepsilon_s \rho_s} \nabla \varepsilon_w \right) = 0 \quad \text{IV.15}$$

Avec,

ε_w : teneur volumique en eau dans le pavé [-]

ρ_w : masse volumique de l'eau liquide [kg/m³]

t : temps [s]

D : coefficient de diffusion de l'eau dans le pavé [m²/s]

ε_s : fraction volumique du solide [-]

ρ_s : masse volumique du solide [kg/m³]

Chaque équation de transfert est définie à travers le module « Equation de convection-diffusion stabilisée » dans COMSOL.

3.4. Conditions initiales et aux limites

Les phénomènes qui se produisent sur le pavé dans les conditions extérieures sont illustrés par la Figure IV.12.

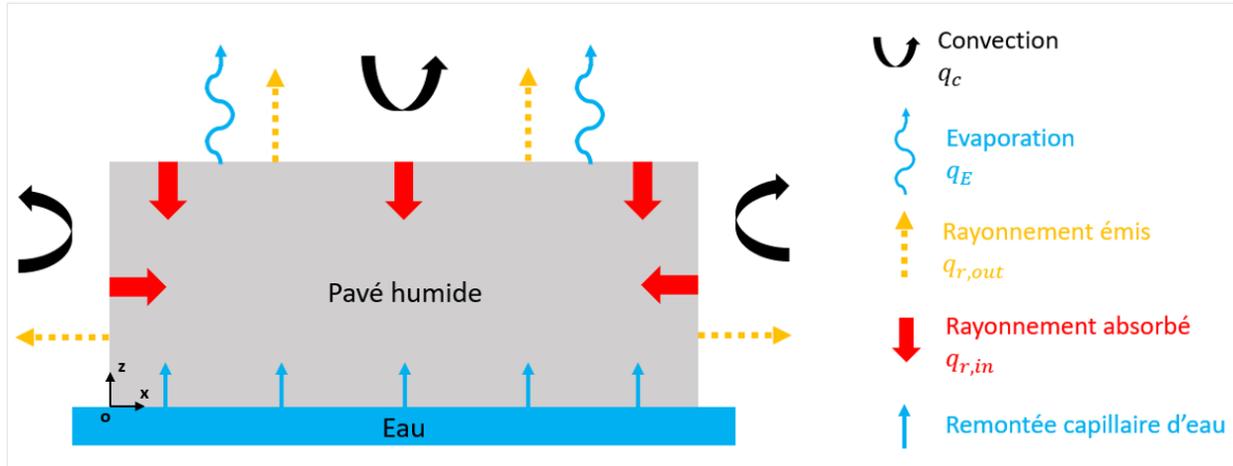


Figure IV.12. Phénomènes produits sur le pavé humide dans les conditions extérieures

3.4.1. Transfert de chaleur

Pour le transfert de chaleur, il est considéré qu'à l'état initial, la température est uniformément répartie dans le pavé. Elle correspond à la température initiale de la surface du pavé, qui a été mesurée par la caméra thermique dans la chambre climatisée, juste avant d'exposer les pavés au soleil.

Pendant l'exposition, la surface du pavé est soumise à un flux de rayonnement absorbé ($q_{r,in}$), un flux de rayonnement émis ($q_{r,out}$), un flux de convection (q_c) et un flux d'évaporation (q_E).

Dans ce cadre, le flux appliqué à la face supérieure du pavé (en $z = H_s$), désigné par (q_{surf}) est :

$$q_{surf} = q_{r,in} - q_{r,out} - q_c - q_E \quad \text{IV.16}$$

Les flux de rayonnement ($q_{r,in}$ et $q_{r,out}$), et le flux de convection (q_c) sont définis précédemment par les équations IV.4, IV.5 et IV.6, respectivement.

Pour faire le lien entre cette équation et l'équation I.1 du bilan énergétique du chapitre I, il faut partir de la deuxième équation donnée par :

$$(1 - R) I = G + H + L + E \quad \text{IV.17}$$

En remplaçant les notations des termes R , I , G , H , L et E par α , R_s , q_{cond} , q_c , $q_{r,out}$ et q_E , respectivement, l'équation (IV.17) devient :

$$(1 - \alpha) R_s = q_{cond} + q_c + q_{r,out} + q_E \quad \text{IV.18}$$

Avec q_{cond} représente le flux de conduction, par suite :

$$q_{r,in} = q_{cond} + q_c + q_{r,out} + q_E \quad \text{IV.19}$$

Autrement dit,

$$q_{cond} = q_{r,in} - q_{r,out} - q_c - q_E \quad \text{IV.20}$$

On retrouve donc l'équation (IV.16), et dans ce cas q_{cond} correspond au flux de conduction absorbé par la surface du pavé ou q_{surf} .

Le flux d'évaporation (q_E) ou le flux de chaleur latente est donné par l'équation suivante :

$$q_E = m_{surf} h_v \quad \text{IV.21}$$

Avec,

q_E : flux d'évaporation [W/m²]

m_{surf} : taux d'évaporation surfacique [kg.m⁻².s⁻¹]

h_v : enthalpie de vaporisation de l'eau [J/kg]

Les faces latérales du pavé scellées par un ruban d'aluminium, sont exposées à un flux de rayonnement absorbé par l'aluminium ($q_{r,in,Al}$), un flux de rayonnement émis par lui ($q_{r,out,Al}$), et un flux de convection (q_c).

Le flux total imposé sur chacune de ces faces latérales (en $x = 0$, $x = L_s$, $y = 0$ et $y = L_s$), noté (q_{lat}), s'écrit sous la forme suivante :

$$q_{lat} = q_{r,in,Al} - q_{r,out,Al} - q_c \quad \text{IV.22}$$

Les flux de rayonnement entrant et sortant du ruban d'aluminium ($q_{r,in,Al}$ et $q_{r,out,Al}$) sont donnés par les équations IV.23 et IV.24, respectivement :

$$q_{r,in,Al} = (1 - \alpha_{Al}) R_s \quad \text{IV.23}$$

$$q_{r,out,Al} = \varepsilon_{Al} \sigma (T^4 - T_a^4) \quad \text{IV.24}$$

Avec,

α_{Al} et ε_{Al} représentent l'albédo et l'émissivité du ruban d'aluminium, respectivement.

La face inférieure étant toujours en contact avec la couche d'eau qui couvre le gravillon, le flux de chaleur appliqué sur elle est supposé nul.

3.4.2. Transfert de masse

Pour le transfert de masse, on définit la saturation en eau liquide (S_w) par :

$$S_w = \frac{V_w}{V_{p,o}} \quad \text{IV.25}$$

De plus, la teneur volumique en eau est donnée comme suit :

$$\varepsilon_w = \frac{V_w}{V_{app}} \quad \text{IV.26}$$

Avec,

V_w , $V_{p,o}$, et V_{app} représentent le volume de l'eau liquide, le volume de pores ouverts et le volume apparent, respectivement.

En reprenant l'équation II.4 de la porosité ouverte :

$$\varphi_o = \frac{V_{p,o}}{V_{app}}$$

On peut écrire :

$$S_w = \frac{V_w/V_{app}}{V_{p,o}/V_{app}}$$

Alors,

$$S_w = \frac{\varepsilon_w}{\varphi_o} \quad \text{IV.27}$$

La saturation en eau liquide est donc le rapport entre la teneur volumique en eau liquide et la porosité ouverte.

Il est supposé que le pavé était totalement saturé par l'eau liquide juste avant l'exposition. Par conséquent :

$$S_w = 1, \text{ à } t = 0 \quad \text{IV.28}$$

La variable à calculer dans l'équation de transfert de masse est la teneur volumique en eau liquide (ε_w). Pour une saturation totale, sa valeur initiale est égale à la porosité ouverte :

$$\varepsilon_w = \varphi_o, \text{ à } t = 0 \quad \text{IV.29}$$

Lors de l'exposition, la perte de masse par évaporation est réalisée à travers la surface du pavé. Le flux massique qui quitte cette surface, noté g_{surf} , est donné par :

$$g_{surf} = - m_{surf} \quad \text{IV.30}$$

Puisque les faces latérales sont scellées par le ruban d'aluminium, considéré imperméable à la vapeur d'eau, alors le flux massique sur ces faces est supposé nul.

La base du pavé est en contact permanent avec l'eau contenue dans les bacs, et la base est donc toujours saturée par l'eau liquide ($S_w = 1$), donc :

$$\text{pour } z = 0, \varepsilon_w = \varphi_o \quad \text{IV.31}$$

3.5. Paramètres et Variables

Les paramètres utilisés dans le modèle à l'état humide, représentent principalement les propriétés du pavé et celles de l'eau liquide interstitielle. Ces paramètres sont illustrés par le Tableau IV.5.

Tableau IV.5. Paramètres utilisés dans le modèle à l'état humide

	Symbole	Nom	Valeur	Unité
Propriétés du pavé	L_s	Longueur	10	cm
	H_s	Hauteur	4,5	cm
	V_{app}	Volume apparent	$L_s^2 H_s$	cm ³
	ρ	Masse volumique apparente	Mesurée	kg/m ³
	C_p	Chaleur spécifique	Mesurée	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
	k	Conductivité thermique	Mesurée	W.m ⁻¹ .K ⁻¹
	α	Albédo	Mesurée	-
	ε	Emissivité	$1 - \alpha$	-
	D	Coefficient de diffusion de l'eau dans le pavé	10^{-8}	m ² /s
	φ_o	Porosité ouverte	Mesurée	-
	ε_s	Fraction volumique du solide	$1 - \varphi_o$	-
	ρ_s	Masse volumique du solide	$\frac{\rho}{1 - \varphi_o}$	kg/m ³
$T_{s,i}$	Température initiale du solide	Mesurée	K	
Propriétés de l'eau liquide	ρ_w	Masse volumique	1000	kg/m ³
	$C_{p,w}$	Chaleur spécifique	4180	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
	k_w	Conductivité thermique	0,6	W.m ⁻¹ .K ⁻¹
	M_w	Masse molaire	0,018	kg/mol
	T_0	Température d'ébullition de l'eau	373,15	K
	α_{Al}	Albédo du ruban d'aluminium	0,75	-
	ε_{Al}	Emissivité du ruban d'aluminium	0,05	-
	P_0	Pression atmosphérique	101325	Pa
	R_g	Constante des gaz parfaits	8,314	J.mol ⁻¹ .K ⁻¹

Les données météo pour les trois jours d'exposition à l'état humide (11, 14 et 17 septembre 2020) sont présentées par Figure IV.13, Figure IV.14 et Figure IV.15, respectivement. Ces données ont été enregistrées par la station (UPS) à un intervalle de 30 minutes.

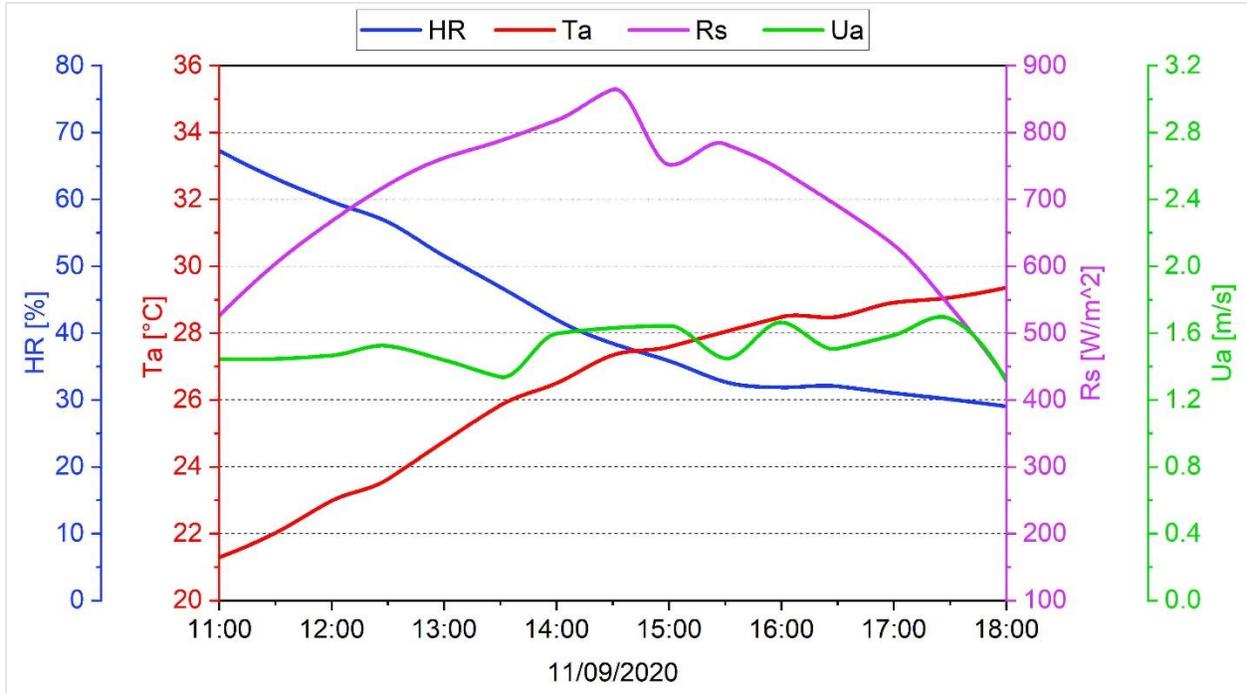


Figure IV.13. Données météo du 11/09/2020

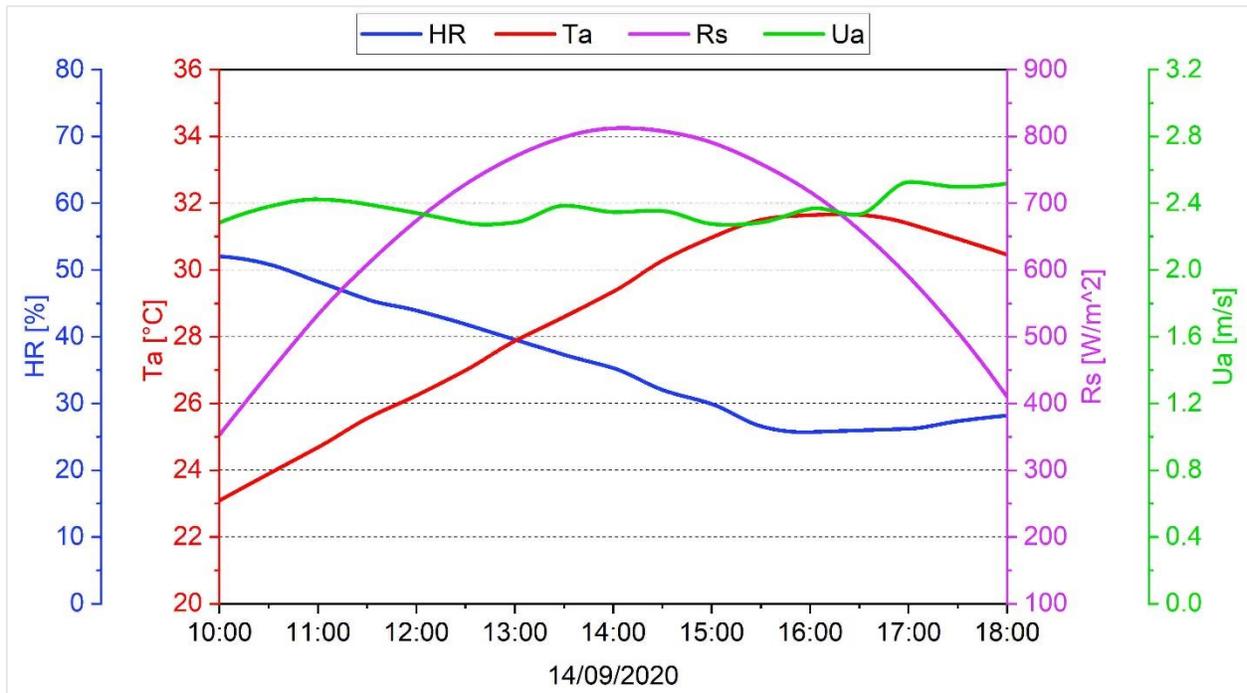


Figure IV.14. Données météo du 14/09/2020

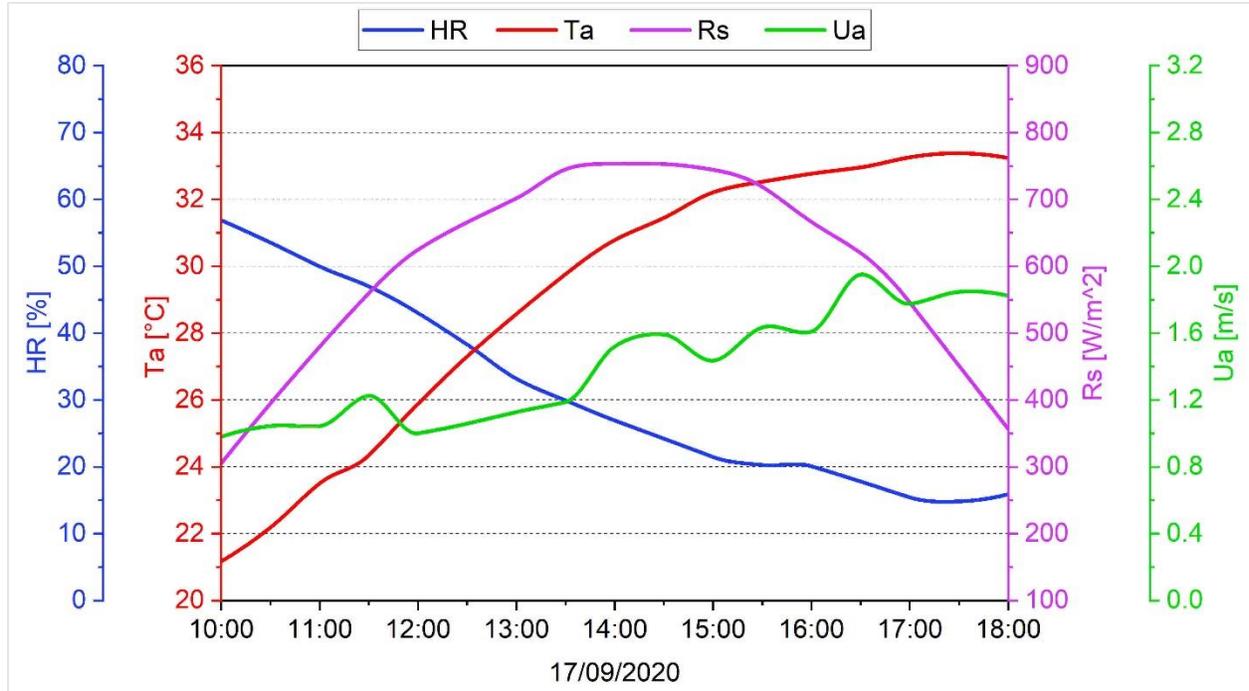


Figure IV.15. Données météo du 17/09/2020

Le coefficient de convection (h_c) est calculé selon l'équation IV.7 et en suivant la même démarche adoptée dans la partie 2.5 « Paramètres et Variables ».

En présence de l'eau dans le pavé à l'état humide, ses propriétés thermiques effectives sont définies par les équations IV.32 et IV.33 [96] :

$$\rho_{eff} C_{p,eff} = \varepsilon_s \rho_s C_p + \varepsilon_w \rho_w C_{p,w} \quad \text{IV.32}$$

Avec,

- $\rho_{eff} C_{p,eff}$: capacité thermique volumique effective [J.m⁻³.K⁻¹]
- ε_s : fraction volumique du solide [-]
- ε_w : teneur volumique en eau [-]
- ρ_s et ρ_w : masses volumique du solide et de l'eau [kg/m³], respectivement
- C_p et $C_{p,w}$: chaleur spécifique du pavé et de l'eau [J.kg⁻¹.K⁻¹], respectivement

Dans l'équation IV.32, l'effet de l'air sur la capacité thermique volumique est négligé, puisque sa masse volumique est négligeable devant les autres constituants.

$$k_{eff} = \varepsilon_s k + \varepsilon_w k_w + \varepsilon_g k_a \quad \text{IV.33}$$

Avec,

k_{eff} : conductivité thermique effective [W.m⁻¹.K⁻¹]

k , k_w et k_a : conductivités thermiques du pavé, de l'eau et de l'air [W.m⁻¹.K⁻¹], respectivement

ε_g : teneur volumique en gaz [-]

La teneur volumique en gaz (ε_g) représente le rapport entre le volume d'air et le volume apparent du pavé. Elle est calculée comme suit :

$$\varepsilon_g = 1 - \varepsilon_s - \varepsilon_w \quad \text{IV.34}$$

Le taux d'évaporation surfacique (m_{surf}) est donné par :

$$m_{surf} = \frac{K_m M_w}{R_g} \left(r \frac{P_{sat,p}}{T} - HR \frac{P_{sat,a}}{T_a} \right) \quad \text{IV.35}$$

Avec,

K_m : coefficient de transfert de masse [m/s]

M_w : masse molaire de l'eau [kg/mol]

R_g : constante des gaz parfaits [J.mol⁻¹.K⁻¹]

$P_{sat,p}$ et $P_{sat,a}$: pression de vapeur saturante dans le pavé et dans l'air [Pa], respectivement

r : rendement d'évaporation [-]

HR : humidité relative [-]

T et T_a : températures du pavé et de l'air [K], respectivement

Selon l'analogie de Chilton-Colburn [80], le coefficient de transfert de masse (K_m), représente le rapport entre le coefficient de convection (h_c) et la capacité thermique volumique du film :

$$K_m = \frac{h_c}{\rho_f C_{p,f}} \quad \text{IV.36}$$

Avec,

h_c : coefficient de convection [W.m⁻¹.K⁻¹]

ρ_f : masse volumique du film [kg/m³]

$C_{p,f}$: chaleur spécifique du film [J.kg⁻¹.K⁻¹]

Les pressions de vapeur saturante de l'eau dans le pavé ($P_{sat,p}$) et dans l'air ($P_{sat,a}$), sont données par les équations de Rankine [96], comme suit :

$$P_{sat,p} = P_0 \exp \left(\frac{h_v M_w}{R_g} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right) \quad \text{IV.37}$$

$$P_{sat,a} = P_0 \exp \left(\frac{h_v M_w}{R_g} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_a} \right) \right) \quad \text{IV.38}$$

Avec,

P_0 : pression atmosphérique [Pa]

T_0 : température d'ébullition de l'eau, $T_0 = 373.15$ [K]

h_v : enthalpie de vaporisation de l'eau [J/kg]

L'enthalpie de vaporisation de l'eau (h_v) varie avec la température du pavé selon l'équation suivante [96] :

$$h_v = 1.9184 \times 10^6 \left(\frac{T}{T - 33.91} \right)^2 \quad \text{IV.39}$$

Où h_v est exprimée en [J/kg] et T en [K].

Dans ce travail, le rendement d'évaporation (r) du pavé, représente la capacité de la vapeur d'eau à quitter ce pavé, lorsque la surface de ce dernier est exposée au rayonnement solaire. On admet qu'au début de l'exposition l'eau libre qui se trouve à la surface du pavé initialement saturé engendre un rendement égal à 1. Par conséquent, le rendement d'évaporation est donné par :

$$r = \begin{cases} 1 & \text{si } t = 0 \\ \bar{r}_{1 \text{ sun}} \cdot \frac{R_{s,max}}{1 \text{ sun}} & \text{si } t > 0 \end{cases} \quad \text{IV.40}$$

Avec,

$1 \text{ sun} = 1 \text{ kW/m}^2 = 1000 \text{ W/m}^2$

$R_{s,max}$: rayonnement solaire maximal pendant le jour d'exposition à l'extérieur [W/m^2]

$\bar{r}_{1 \text{ sun}}$: rendement d'évaporation moyen sous l'exposition à un rayonnement solaire de 1 sun

$\bar{r}_{1 \text{ sun}}$ est calculé à travers l'essai d'exposition au simulateur solaire, comme suit :

$$\bar{r}_{1 \text{ sun}} = \frac{\sum_1^n r_{1 \text{ sun}}(t)}{n} \quad \text{IV.41}$$

Avec,

n : nombre de pesées pendant la durée d'exposition à un rayonnement de solaire 1 sun

$r_{1 \text{ sun}}(t)$: rendement d'évaporation du pavé à l'instant (t) sous un rayonnement solaire de 1 sun

$r_{1\ sun}(t)$ représente le rapport entre le taux d'évaporation du pavé à l'instant (t), noté ($E_p(t)$) et celui de l'eau nue à cet instant ($E_w(t)$). Il s'écrit sous la forme suivante :

$$r_{1\ sun}(t) = \frac{E_p(t)}{E_w(t)} \quad \text{IV.42}$$

Pour bien illustrer ces étapes de calcul, la Figure IV.16 illustre la variation de la masse d'eau évaporée en fonction du temps pour l'eau nue, le pavé 7 et le pavé 11. La Figure IV.17 (extraite du chapitre III (Partie 2.1.4) présente l'évolution du taux d'évaporation en fonction du temps, de ces trois éléments cités. Finalement, les rendements d'évaporation du pavé 7 et du pavé 11 sont tracés dans le graphique de la Figure IV.18.

Les valeurs trouvées de $\bar{r}_{1\ sun}$ pour les deux pavés, pendant une durée d'exposition de 7 heures et 8 heures, sont résumées par le Tableau IV.6. La durée de 7 heures correspond au premier jour d'exposition (11/09/2020), alors que la durée de 8 heures désigne le deuxième et le troisième jour d'exposition (14/09/2020 et 17/09/2020).

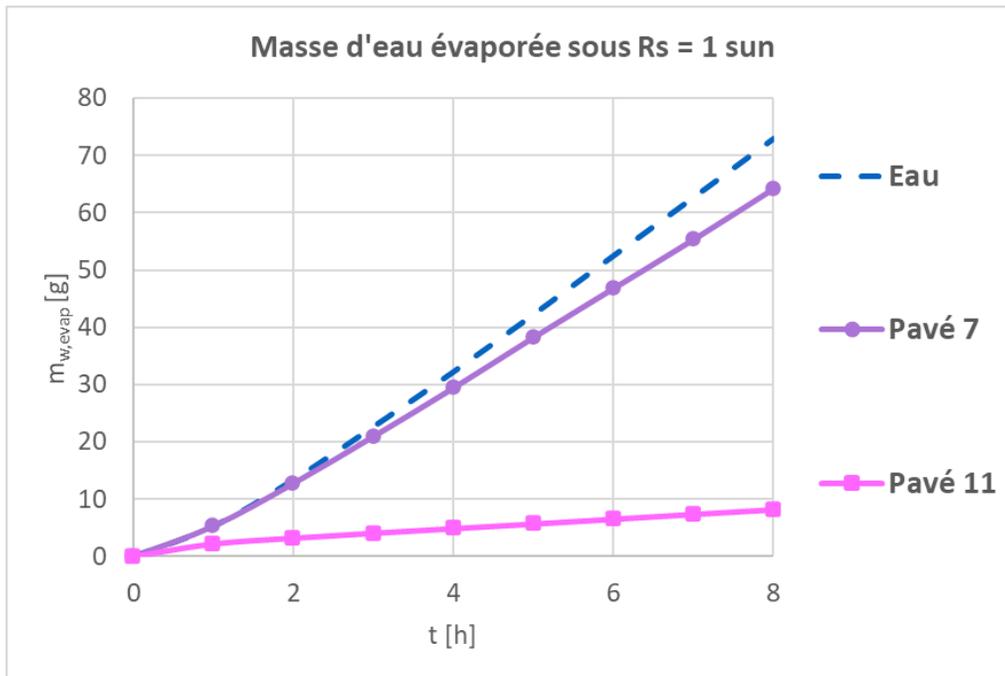


Figure IV.16. Masses d'eau évaporée sous un rayonnement de 1 sun

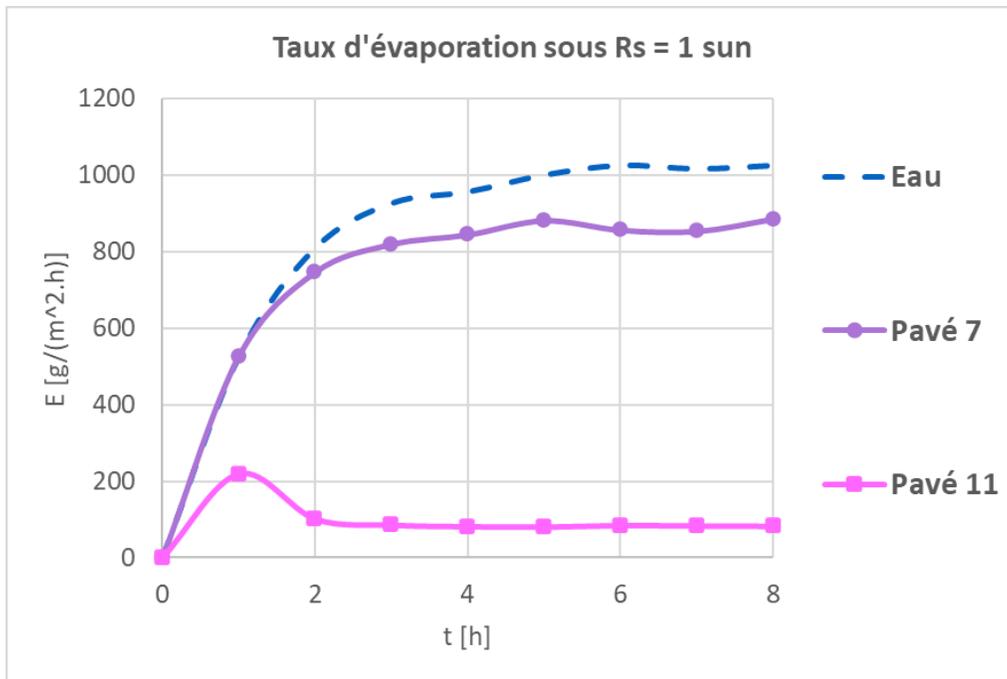


Figure IV.17. Taux d'évaporation sous un rayonnement de 1 sun

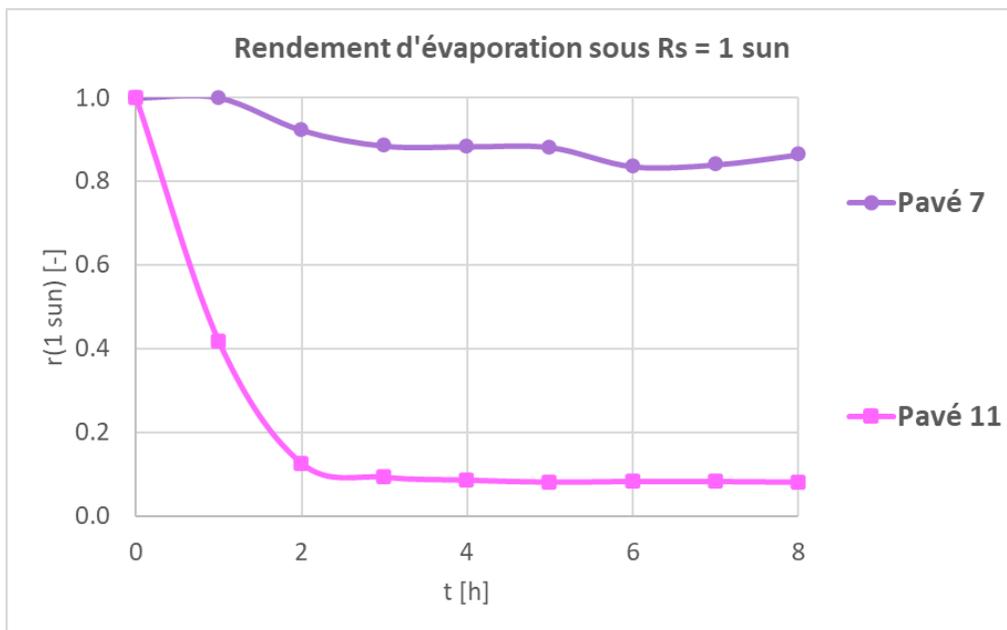


Figure IV.18. Rendements d'évaporation sous un rayonnement de 1 sun

Le Tableau IV.7 récapitule les variables employées dans le modèle à l'état humide. Il est à noter que les propriétés du film sont celles de l'air à une température T_f . Les propriétés de l'air sont extraites des courbes d'interpolation de la Figure IV.6.

Tableau IV.6. Rendements d'évaporation moyens sous un rayonnement solaire de 1 sun

	Durée d'exposition	Pavé 7	Pavé 11
$\bar{r}_{1\ sun}$	7 heures	0.906	0.245
	8 heures	0.901	0.227

Tableau IV.7. Variables employées dans le modèle à l'état humide

Symbole	Nom	Expression/Valeur	Unité
HR	Humidité relative	Données météo	-
T_a	Température de l'air	Données météo	K
R_s	Rayonnement solaire	Données météo	W/m ²
U_a	Vitesse de l'air	Données météo	m/s
h_c	Coefficient de convection	$\frac{Nu k_f}{L_c}$	W.m ⁻² .K ⁻¹
T_f	Température du film	$(T_s + T_a)/2$	K
Nu	Nombre de Nusselt	$0,64 Re^{0.5} Pr^{(1/3)}$. si $Re < 5 \times 10^5$ $0,037 Re^{0.8} Pr^{(1/3)}$. si $Re \geq 5 \times 10^5$	-
Re	Nombre de Reynolds	$\frac{\rho_f U_a L_c}{\mu_f}$	-
Pr	Nombre de Prandtl	$\frac{\mu_f C_{p,f}}{k_f}$	-
$\rho_{eff} C_{p,eff}$	Capacité thermique volumique effective du pavé	$\varepsilon_w \rho_w C_{p,w} + \varepsilon_s \rho C_p$	J.m ⁻³ .K ⁻¹
k_{eff}	Conductivité thermique effective du pavé	$\varepsilon_w k_w + \varepsilon_g k_a + \varepsilon_s k$	W.m ⁻¹ .K ⁻¹
ε_g	Teneur volumique en gaz	$1 - \varepsilon_s - \varepsilon_w$	-
$E(t)$	Taux d'évaporation sous $R_s = 1 \text{ sun}$	$\frac{ \Delta m }{A \Delta t}$	g.m ⁻² .h ⁻¹
m_{surf}	Taux d'évaporation surfacique	$\frac{K_m M_w}{R_g} \left(r \frac{P_{sat,p}}{T} - HR \frac{P_{sat,a}}{T_a} \right)$	kg.m ⁻² .s ⁻¹
K_m	Coefficient de transfert de masse	$\frac{h_c}{\rho_f C_{p,f}}$	m/s
$P_{sat,p}$	Pression de vapeur saturante de l'eau dans le pavé	$P_0 \exp \left(\frac{h_v M_w}{R_g} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right)$	Pa
$P_{sat,a}$	Pression de vapeur saturante de l'eau dans l'air	$P_0 \exp \left(\frac{h_v M_w}{R_g} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_a} \right) \right)$	Pa
h_v	Enthalpie de vaporisation de l'eau	$1,9184 \times 10^6 \left(\frac{T}{T - 33,91} \right)^2$	J/kg
r	Rendement d'évaporation	$1 \text{ si } t = 0$ $\bar{r}_{1 \text{ sun}} \cdot \frac{R_{s,max}}{1 \text{ sun}} \text{ si } t > 0$	-

La durée de l'étude est fixée à 7 heures pour le 11/09/2021, à 8 heures pour le 14/09/2021 et le 17/09/2021, avec un pas de temps d'une demi-heure. Ce réglage est consistant avec l'expérience d'exposition à l'extérieur, dans laquelle la température de surface a été mesurée chaque 30 minutes pendant la période d'exposition. Le maillage grossier triangulaire formé par 2091 éléments est adopté (Figure IV.1). Il a été remarqué que le raffinement du maillage n'influe pas sensiblement sur les résultats. L'ordinateur utilisé pour la simulation est de type Intel Core™ i7 – 10510U avec 8 GB de RAM. La simulation nécessite 217 pas de calcul pour la durée de 7 heures, et 279 pas pour la durée de 8 heures. Le pas de temps est autodéterminé par le logiciel avec une tolérance relative d'ordre 10^{-4} .

La démarche suivie pour la construction et la validation du modèle à l'état humide est illustrée par la Figure IV.19.

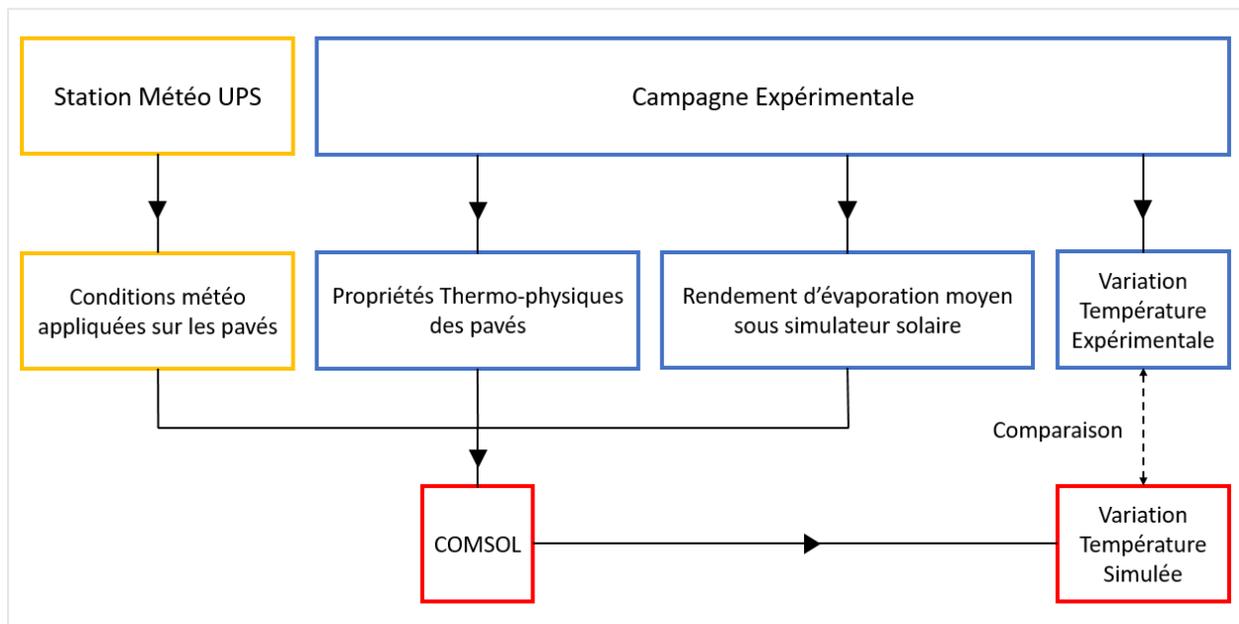


Figure IV.19. Démarche de construction et de validation du modèle à l'état humide

3.6. Validation du modèle à l'état humide

Dans le but de valider le modèle à l'état humide en conditions extérieures, une comparaison a été effectuée entre les profils de température de surface, expérimentale et numérique, pour les deux pavés « extrêmes ». Ces pavés sont le pavé 7 (le plus rafraîchissant, $T_{s,moy} = 30,3^{\circ}\text{C}$), et le pavé 11 (le moins rafraîchissant, $T_{s,moy} = 38,9^{\circ}\text{C}$). Il est à noter que ces deux pavés sont également extrêmes en termes de température de surface dans l'essai d'exposition au simulateur solaire.

Pour que le modèle soit valide, il faut que les profils de température de surface soient consistants pour les deux pavés sélectionnés et ce pendant les trois jours d'exposition.

Les résultats des températures de surface, expérimentales et numériques, pour ces pavés pendant les trois jours d'exposition à l'état humide (11, 14 et 17 septembre 2020) sont illustrés sur Figure IV.20, Figure IV.21 et Figure IV.22, respectivement. La ligne pointillée représente la variation de la température expérimentale et la ligne continue désigne l'évolution de la température simulée.

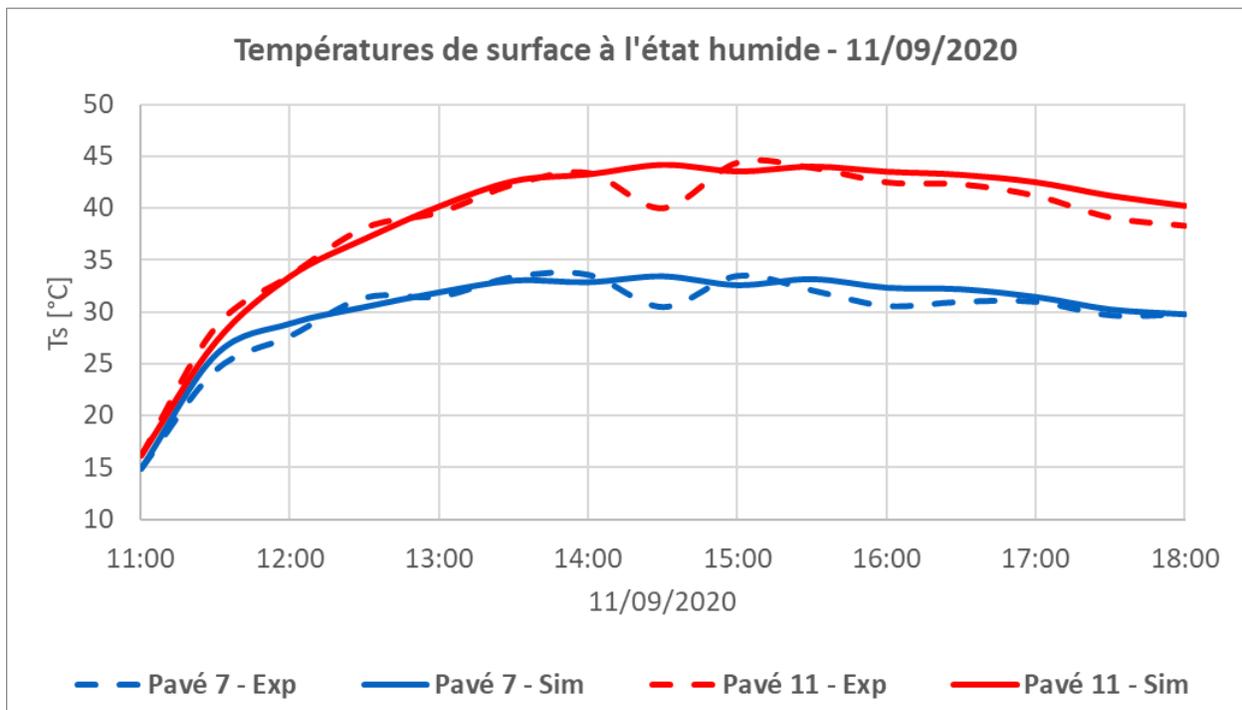


Figure IV.20. Températures de surface des pavés 7 et 11 à l'état humide le 11/09/2020

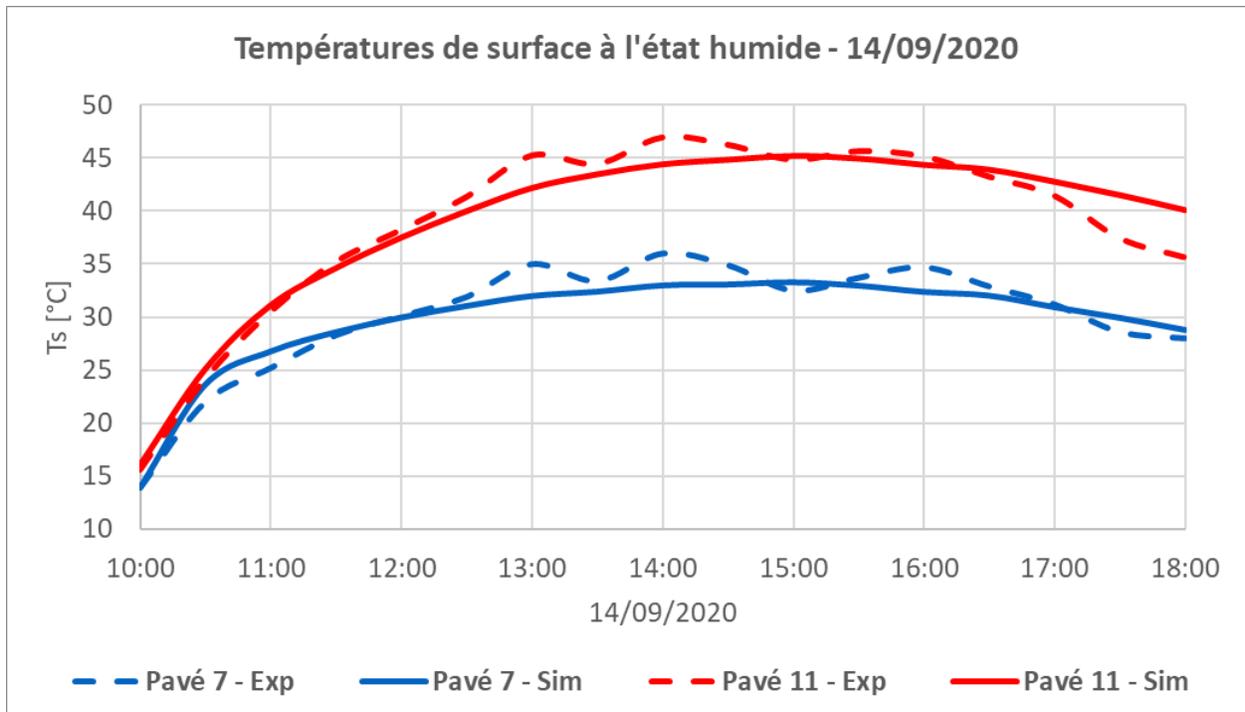


Figure IV.21. Températures de surface des pavés 7 et 11 à l'état humide le 14/09/2020

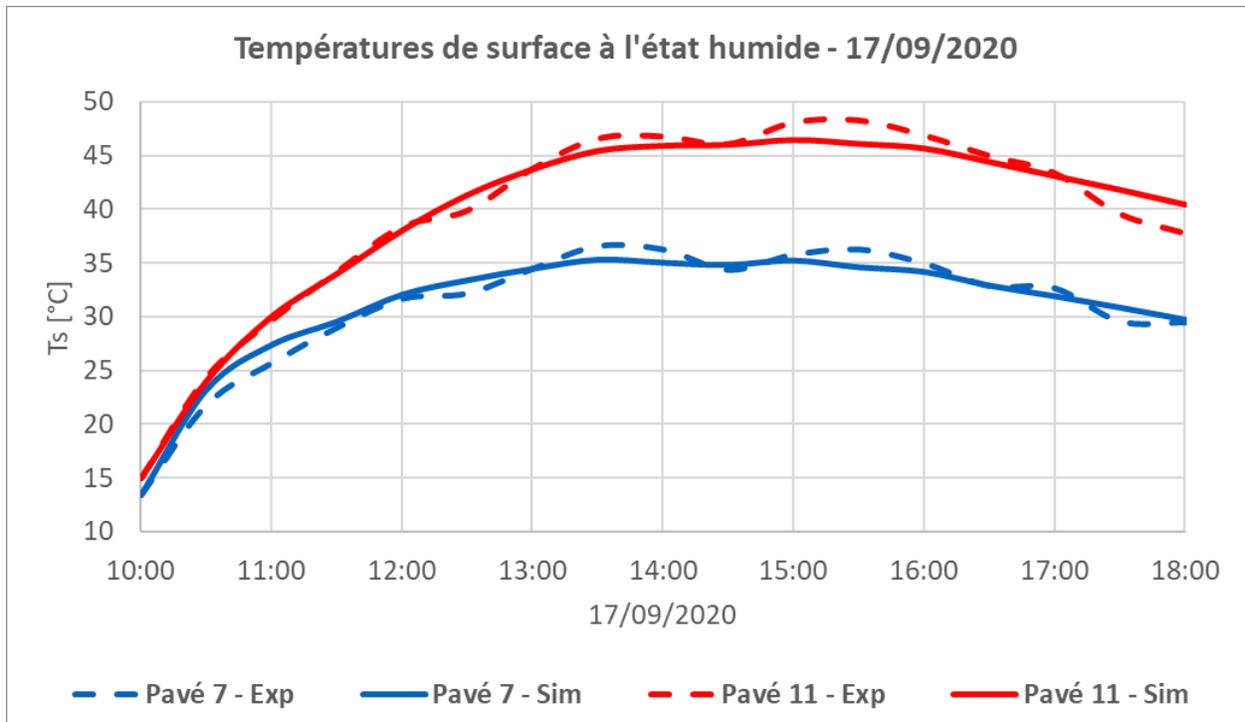


Figure IV.22. Températures de surface des pavés 7 et 11 à l'état humide le 17/09/2020

La comparaison entre les profils de température de surface, expérimentaux et numériques, est réalisée à travers les critères suivants : l'erreur absolue maximale (EA_{max}), l'erreur absolue moyenne (MAE), et le coefficient de détermination (R^2). Ces critères sont présentés dans le Tableau IV.8, pour les deux pavés témoins pendant les trois jours d'exposition.

Tableau IV.8. Indices de comparaison des températures de surface à l'état humide

Date	Indice	Pavé 7	Pavé 11
11/09/2020	EA_{max} [°C]	3,0	4,2
	MAE [°C]	0,9	1,1
	R^2 [-]	0,95	0,97
14/09/2020	EA_{max} [°C]	2,9	4,5
	MAE [°C]	1,2	1,5
	R^2 [-]	0,94	0,95
17/09/2020	EA_{max} [°C]	1,7	2,6
	MAE [°C]	0,8	0,9
	R^2 [-]	0,98	0,98

Selon ce tableau, une forte adéquation est observée entre les températures expérimentales et les températures simulées, avec des coefficients de déterminations (R^2) dépassant 0,94.

La valeur maximale de EA_{max} est de l'ordre de 3,0°C pour le pavé 7 le 11/09/2020 à 14h30. Cette valeur peut être attribuée notamment à un passage de nuages qui a atténué l'intensité du rayonnement solaire direct, et a diminué les températures de surface expérimentales mesurées par la caméra thermique. Cependant, en regardant le profil du rayonnement solaire ce jour-là, il peut être remarqué que ce rayonnement atteint sa valeur maximale (864 W/m²) à 14h30. Par conséquent, l'effet de nuages n'a pas été détecté par la station météo à cet instant. Cet effet est également observé dans les températures du pavé 11.

Pour le pavé 11, EA_{max} atteint sa valeur maximale de l'ordre de 4,5°C à la fin de l'essai d'exposition le 14/09/2020. En regardant, les profils de températures pour les deux autres jours, il peut être remarqué que la température de surface est toujours légèrement surestimée à la fin d'exposition. Ces écarts peuvent provenir principalement d'une surestimation de la capacité thermique volumique effective. En effet, cette propriété joue un rôle prépondérant dans la vitesse de montée de la température au début du chauffage et de sa descente pendant la phase de restitution de la chaleur stockée. Par conséquent, une valeur surestimée de cette variable

diminue la sensibilité de la température de surface aux perturbations thermiques extérieures, autrement dit, elle ralentit les phases de montée et de descente de la température de surface.

Les valeurs maximales de MAE sont atteintes le 14/09/2020. Elles sont de l'ordre de $1,2^{\circ}\text{C}$ pour le pavé 7 et de $1,5^{\circ}\text{C}$ pour le pavé 11. Ces deux valeurs sont en accord avec les $\pm 2^{\circ}\text{C}$ de précision annoncés par la fiche technique de la caméra thermique utilisée.

En s'appuyant sur les valeurs de ces indices, il peut être déduit que le modèle développé peut simuler la température de surface, dans les conditions réelles à l'état humide, avec une bonne précision.

3.7. Résultats de simulation de la masse d'eau évaporée

Dans l'expérience d'exposition à l'extérieur, il n'était pas possible de peser les pavés à chaque échéance, pour les raisons suivantes :

- Risque de perturber les chemins d'eau capillaires qui alimentent la surface, à chaque fois où le pavé est retiré du bac, essuyé, pesé, puis remis dans le bac.
- Grand nombre de pavés exposés simultanément aux mêmes conditions climatiques extérieures, et par suite difficulté d'avoir des pesées simultanées des pavés.

Par conséquent, pour valider le modèle à l'état humide dans les conditions réelles, il était nécessaire de quantifier le taux d'évaporation, en réalisant l'essai d'exposition au simulateur solaire. Suite à cet essai, le modèle développé permet finalement de prédire la masse d'eau évaporée dans les conditions réelles.

Dans le modèle construit, la masse d'eau évaporée ($m_{w,evap}$) est la différence entre la masse d'eau initiale ($m_{w,i}$) et celle d'eau restante dans le pavé (m_w) :

$$m_{w,evap} = m_{w,i} - m_w \quad \text{IV.43}$$

La masse d'eau initiale ($m_{w,i}$) est donnée par :

$$m_{w,i} = \rho_w V_{w,i}$$

A l'état initial, il est supposé que le pavé est complètement saturé par l'eau, le volume d'eau initial ($V_{w,i}$) est donc égal au volume de pores ouverts ($V_{p,o}$) :

$$m_{w,i} = \rho_w V_{p,o} = \rho_w \varphi_o V_{app} \quad \text{IV.44}$$

La masse d'eau restante (m_w) dans le pavé est définie par :

$$m_w = \rho_w V_w = \rho_w \varepsilon_w V_{app} \quad \text{IV.45}$$

En remplaçant $m_{w,i}$ et m_w par leurs expressions dans l'équation IV.43, $m_{w,evap}$ s'écrit :

$$m_{w,evap} = \rho_w \varphi_o V_{app} - \rho_w \varepsilon_w V_{app}$$

$$m_{w,evap} = \rho_w V_{app} (\varphi_o - \varepsilon_w) \quad \text{IV.46}$$

Les variations simulées de la masse d'eau évaporée des pavés extrêmes, pavé 7 et pavé 11, pendant les trois jours d'exposition (11, 14 et 17 septembre 2020) sont présentées dans Figure IV.23, Figure IV.24 et Figure IV.25 respectivement.

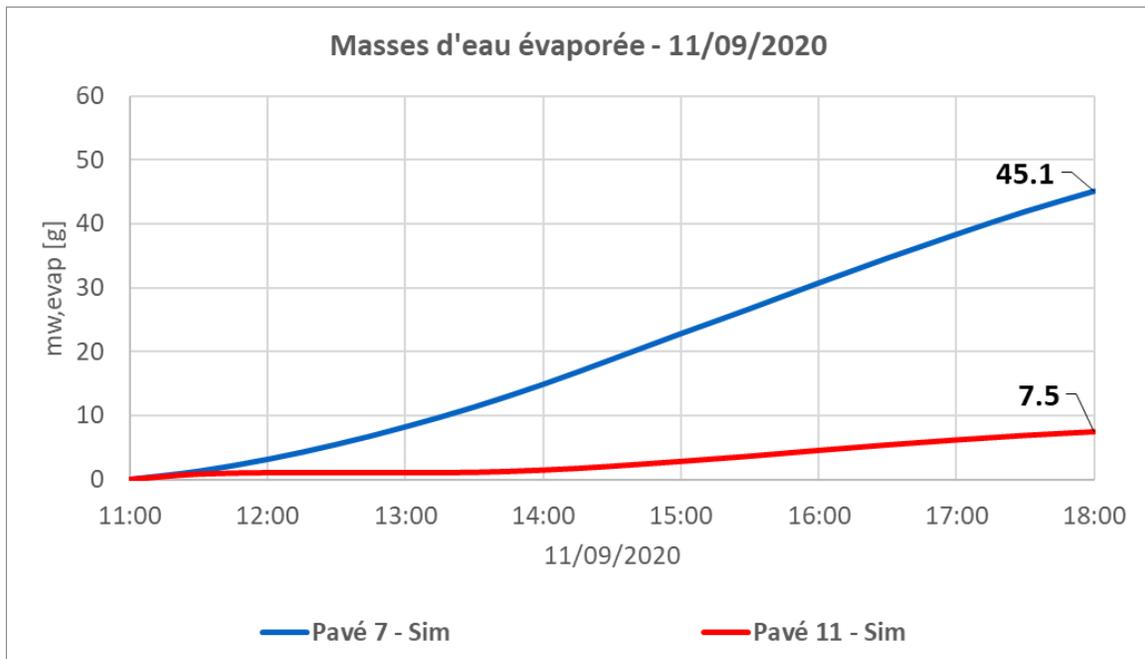


Figure IV.23. Masses d'eau évaporée simulées des pavés 7 et 11 le 11/09/2020

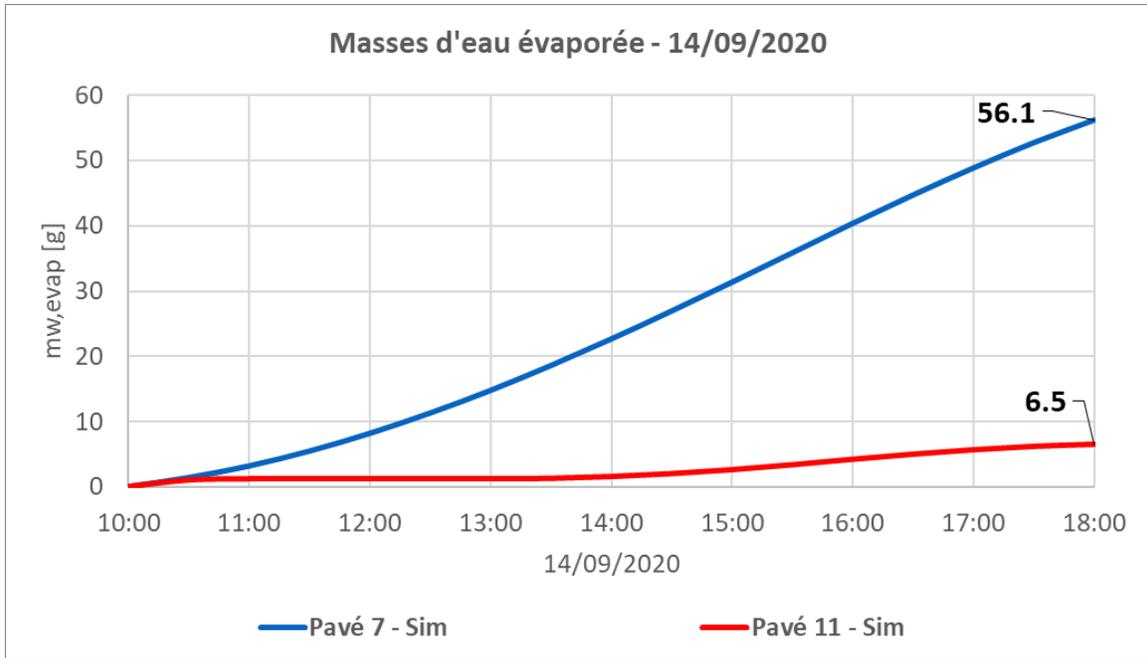


Figure IV.24. Masses d'eau évaporée simulées des pavés 7 et 11 le 14/09/2020

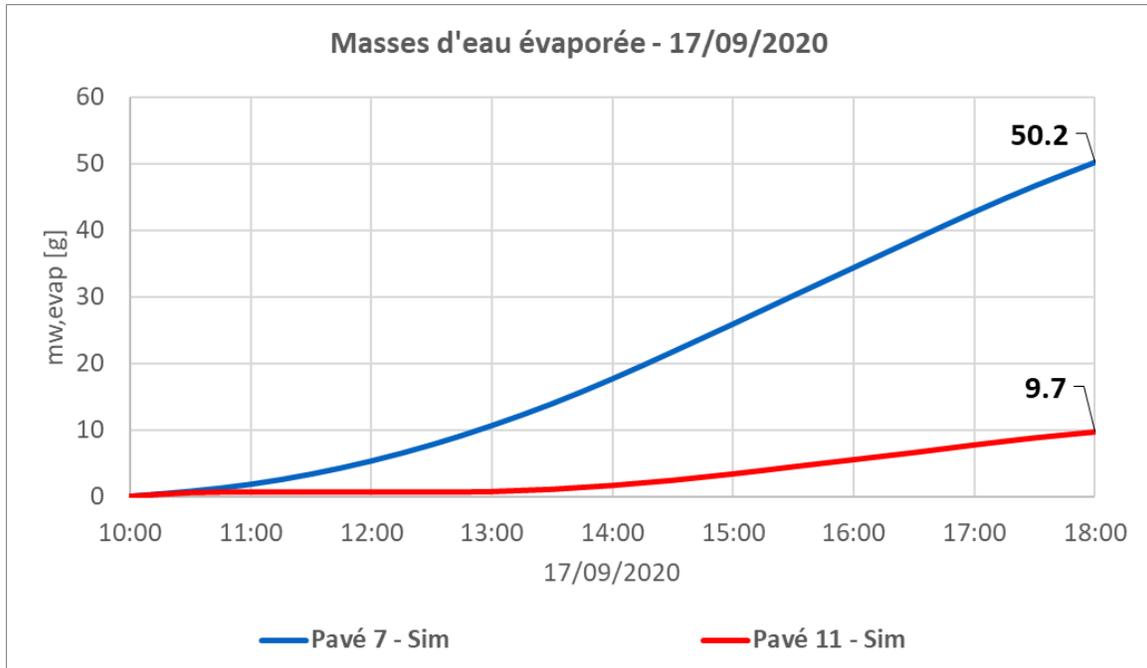


Figure IV.25. Masses d'eau évaporée simulées des pavés 7 et 11 le 17/09/2020

Selon ces figures, il peut être remarqué que le comportement de perte de masse pendant les trois jours d'exposition est presque le même pour chaque pavé.

Le pavé 7 peut évaporer jusqu'à 45,1, 56,1 et 50,2 g d'eau (masses équivalentes à 4510, 5610 et 5020 g/m², respectivement), alors que la capacité d'évaporation du pavé 11 ne dépasse pas, au mieux, 7,5, 6,5 et 9,7 g (masses équivalentes à 750, 650 et 970 g/m², respectivement) pour les journées des 11, 14 et 17/09/2020, respectivement. De plus, pour le pavé 11, un palier proche d'une valeur nulle dans la masse d'eau évaporée est observé avant que cette dernière commence à augmenter à partir de 14h00. Cela est dû principalement aux valeurs d'humidité relatives élevées qui peuvent atteindre 67% au début d'exposition (11/09/2020) avant qu'elles commencent à diminuer. Avec ces valeurs importantes d'humidité relative et la faible valeur du rendement d'évaporation qui maintient la surface du pavé saturée, le gradient d'humidité entre le pavé et l'air ambiant est négligeable, par conséquent l'évaporation est presque nulle.

Ces écarts observés dans la masse d'eau évaporée entre les deux pavés, reflètent bien les grandes différences détectées au niveau des températures de surface mesurées. Ces écarts peuvent atteindre des valeurs de 11,9°C pour le 11/09 et de 12,3°C pour le 14/09 et le 17/09/2020. Par conséquent, il peut être constaté que le taux et ou le rendement d'évaporation contrôle d'une manière substantielle la température de surface des pavés.

La partie suivante sera dédiée à illustrer la répartition de l'eau à la surface et à l'intérieur des pavés afin de faire le lien avec ces résultats de simulation de la masse d'eau évaporée.

3.8. Résultats de la simulation de la saturation en eau

La saturation en eau (S_w) représente la fraction volumique d'eau liquide par rapport au volume de pores ouverts, dans un volume élémentaire représentatif. Elle est calculée selon l'équation IV.27, comme étant le rapport entre la teneur volumique en eau (ε_w) et la porosité ouverte (φ_o). Les distributions de la saturation en eau dans le pavé 7 et le pavé 11, pendant les trois jours d'exposition (11, 14 et 17 septembre 2020), à mi-temps et à la fin d'exposition, sont illustrées par Figure IV.26, Figure IV.27 et Figure IV.28, respectivement.

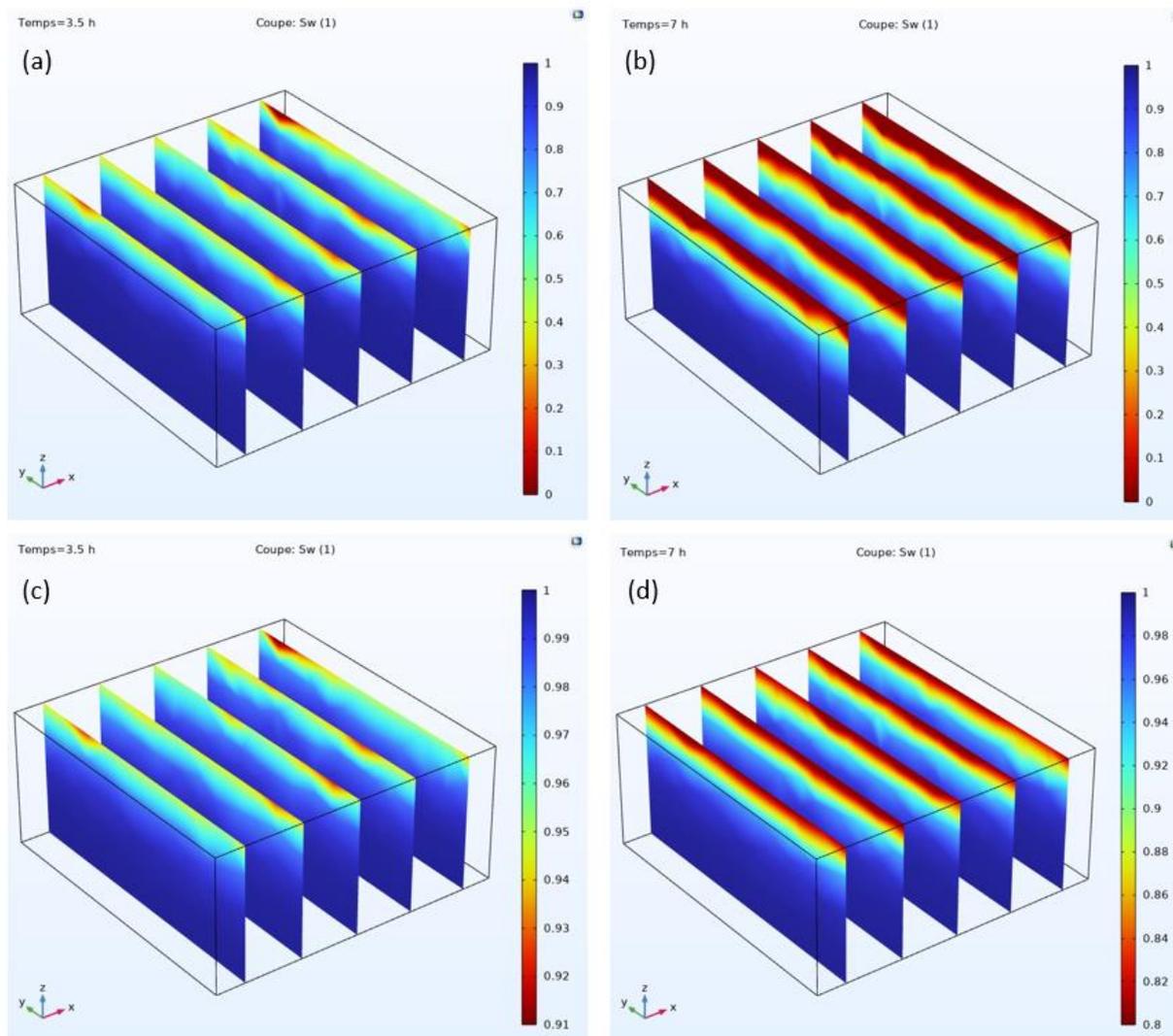


Figure IV.26. Distribution de la saturation dans le pavé 7 (a et b) et le pavé 11 (c et d) à la moitié du temps (à gauche) et à la fin d'exposition (à droite) le 11/09/2020

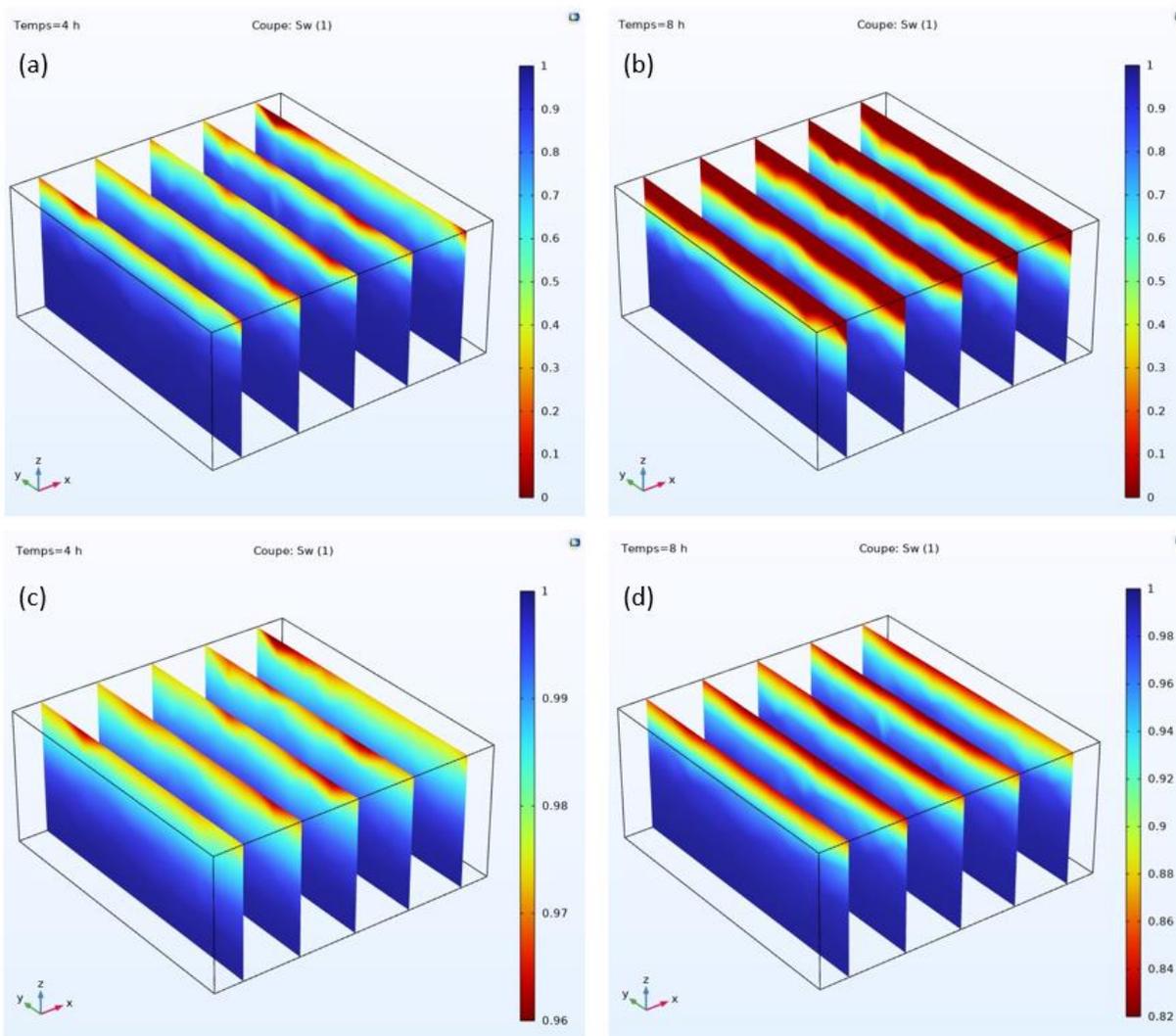


Figure IV.27. Distribution de la saturation dans le pavé 7 (a et b) et le pavé 11 (c et d) à la moitié du temps (à gauche) et à la fin d'exposition (à droite) en 14/09/2020

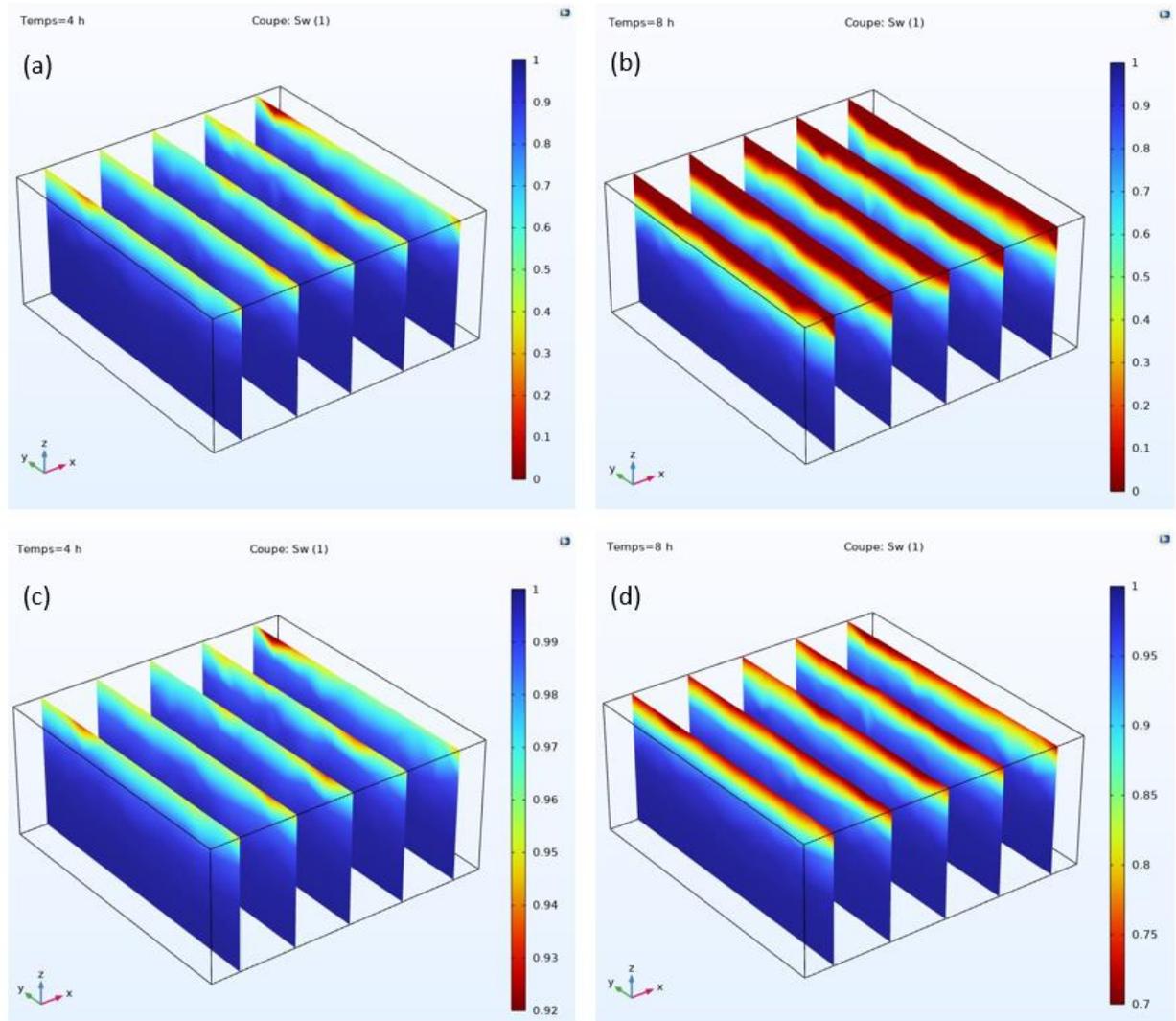


Figure IV.28. Distribution de la saturation dans le pavé 7 (a et b) et le pavé 11 (c et d) à la moitié du temps (à gauche) et à la fin d'exposition (à droite) en 17/09/2020

Ces figures montrent que le séchage commence toujours par la surface et se dirige progressivement vers la base. De plus, il peut être observé que la saturation en eau de la base reste toujours égale à 1, vu qu'elle est en contact permanent avec l'eau.

Vers la moitié du temps d'exposition, une couche partiellement humide apparaît dans les deux pavés. Un séchage complet ($S_w = 0$) de certaines zones de la surface du pavé 7 (Figure IV.26a, Figure IV.27a et Figure IV.28a) peut être observé. A cet instant, le séchage est extrêmement faible à la surface du pavé 11 avec des valeurs de saturation supérieures à 0,91, 0,96 et 0,92 pour les essais du 11/09, 14/09 et 17/09, respectivement (Figure IV.26c, Figure IV.27c et Figure IV.28c).

A la fin de l'exposition, une couche totalement sèche apparaît à la surface du pavé 7 (Figure IV.26b, Figure IV.27b et Figure IV.28b). Au même moment, une couche partiellement humide se forme à la surface du pavé 11, avec des saturations supérieures à 0,80, 0,82 et 0,70 pour les essais du 11/09, 14/09 et 17/09, respectivement (Figure IV.26d, Figure IV.27d et Figure IV.28d). Ces valeurs obtenues sont cohérentes avec celles de la masse d'eau évaporée à la fin de ces trois jours, qui sont de l'ordre de 7,5, 6,5 et 9,7 g respectivement. En effet, une masse d'eau évaporée importante permet d'accélérer la vitesse de séchage, donc d'engendrer des gradients de saturation plus remarquables. De plus, il est à noter que le front de séchage, qui sépare la zone saturée de la zone sèche, apparaît après un séchage complet de la surface, comme dans le cas du pavé 7 (Figure IV.26b, Figure IV.27b et Figure IV.28b).

Les résultats de la masse d'eau évaporée et de la saturation soulignent le fort couplage qui existe entre l'évaporation et la température de surface. Pour confirmer cette hypothèse, la partie suivante sera consacrée à l'étude de la sensibilité du modèle aux propriétés thermo-physiques du pavé modélisé.

3.9. Sensibilité du modèle aux propriétés du pavé

Dans le but d'étudier la sensibilité du modèle développé aux propriétés thermo-physiques introduites, une analyse paramétrique est réalisée. Pour que cette analyse soit représentative, un pavé fictif, ayant des propriétés de valeurs centrées, est modélisé pendant le dernier jour d'exposition (17/09/2020). Ses valeurs sont situées au milieu des intervalles qui séparent les valeurs maximales et minimales des propriétés déterminées dans le chapitre III. La température initiale et le taux d'évaporation du pavé fictif sont également centrés par rapport aux valeurs des pavés extrêmes (pavés 7 et 11).

Les valeurs du pavé fictif à étudier sont données dans le Tableau IV.9. L'analyse paramétrique est menée en faisant varier ces valeurs de $\pm 25\%$. Avec ces variations, les valeurs représentatives restent toujours dans les intervalles de mesure limités par les résultats extrêmes du chapitre III. Par conséquent, les pavés issus de cette étude auront des propriétés qu'on a envisagées dans ce travail.

Tableau IV.9. Propriétés physiques du pavé fictif

α [-]	k [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	φ_o [-]	ρ [kg/m ³]	C_p [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	$\bar{r}_{1\ sun}$ [-]	T_i [°C]
0.392	0.535	0.348	1640	1205	0.564	14.2

3.9.1. Effet de l'albédo

Dans les corrélations trouvées dans le chapitre III, il a été observé que l'albédo représente la propriété qui influence le plus la température de surface à l'état sec et qui influe également sur la température à l'état humide pour les pavés non drainants. Dans ce modèle, la valeur initiale d'albédo est prise égale à 0,348 soit 34,8%.

La Figure IV.29 montre l'effet de l'albédo sur la température de surface du pavé.

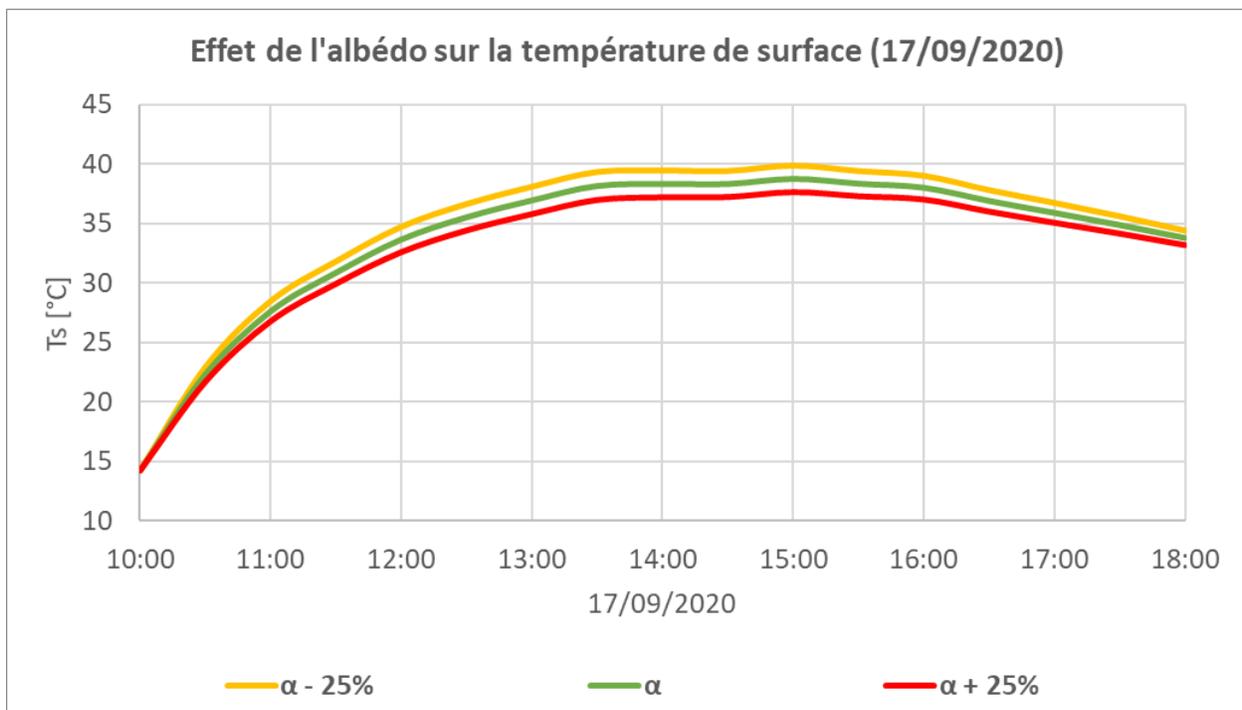


Figure IV.29. Effet de la variation d'albédo sur la température de surface (pavé fictif testé sur la base des conditions climatiques du 17/09/2020)

Il peut être observé qu'une augmentation de la valeur d'albédo de 25% de sa valeur initiale génère une diminution de l'ordre de 3,2% (ou 1,2°C) de la température de surface. Cette augmentation de la valeur d'albédo entraîne également une diminution de l'ordre de 9,4% de la masse d'eau évaporée à la fin de l'essai d'exposition (Figure IV.30). En effet, une élévation de la valeur d'albédo permet de réduire le flux de rayonnement absorbé par le pavé, par conséquent de diminuer sa température. Par conséquent, l'eau interstitielle se trouve à une température plus basse ce qui peut atténuer le processus d'évaporation.

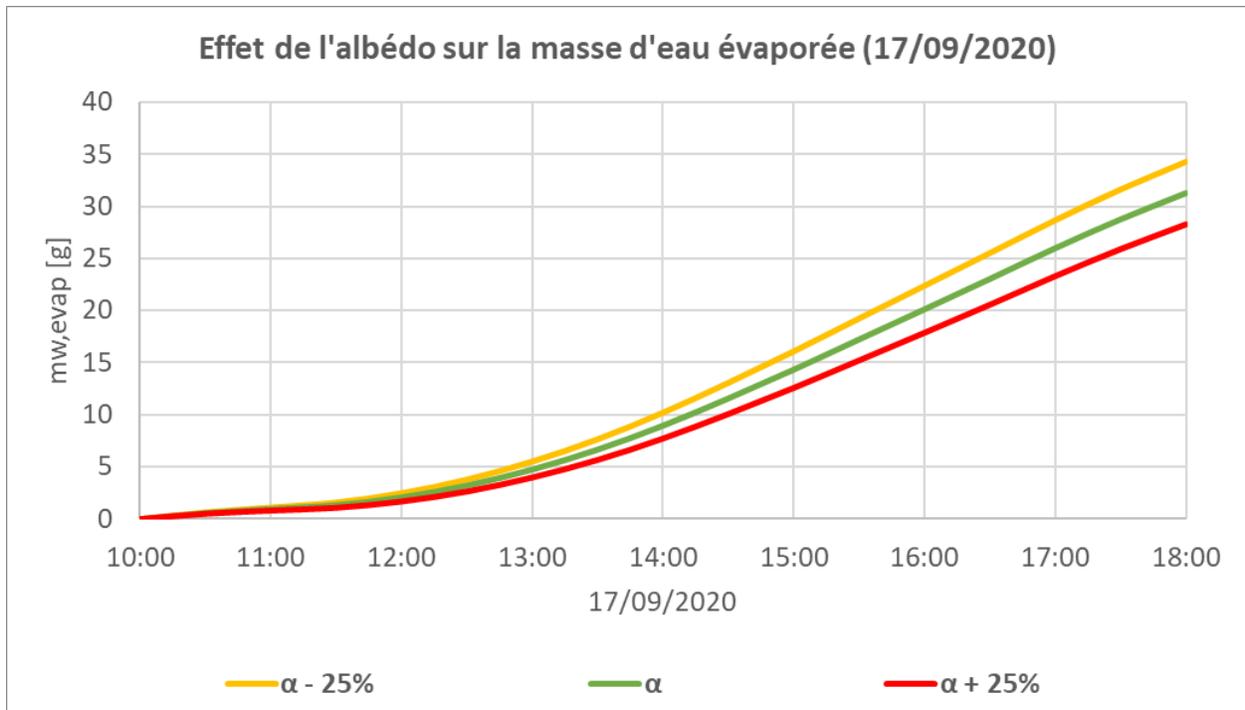


Figure IV.30. Effet de la variation d'albédo sur la masse d'eau évaporée (pavé fictif testé sur la base des conditions climatiques du 17/09/2020)

3.9.2. Effet de la conductivité thermique et de la porosité ouverte

Cette étude paramétrique n'a pas mis en évidence d'effet de la variation de la conductivité thermique ou de la porosité ouverte sur la température de surface ou sur l'évaporation. En effet, en augmentant la conductivité thermique de 25% par rapport à sa valeur initiale, l'écart est toujours inférieur à 0,8% entre les profils de la température de surface et il est de l'ordre de 0,5% pour ceux de la masse d'eau évaporée à la fin d'exposition. Cette tendance est également observée pour la porosité ouverte avec des écarts qui ne dépassent pas 1,4% pour les deux cas.

Pour rappel, l'existence d'une corrélation reliant la température de surface à la conductivité thermique ou la porosité ouverte à l'état humide n'a pas non plus été trouvée chapitre III.

3.9.3. Effet de la capacité thermique volumique

La capacité thermique volumique représente le produit entre la masse volumique apparente et la chaleur spécifique. Elle correspond également au rapport entre la racine carrée de l'effusivité thermique et la conductivité thermique. Le chapitre III a montré un effet de l'effusivité thermique dans la corrélation trouvée portant sur la température de surface des pavés non drainants à l'état humide.

Par suite, une étude paramétrique de la capacité thermique est effectuée en partant de sa valeur initiale qui vaut $1976 \text{ kJ.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$. Cette valeur correspond au produit entre la masse volumique apparente (1640 kg/m^3) et la chaleur spécifique ($1205 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$). La Figure IV.31 illustre l'influence de la capacité thermique sur la température de surface.

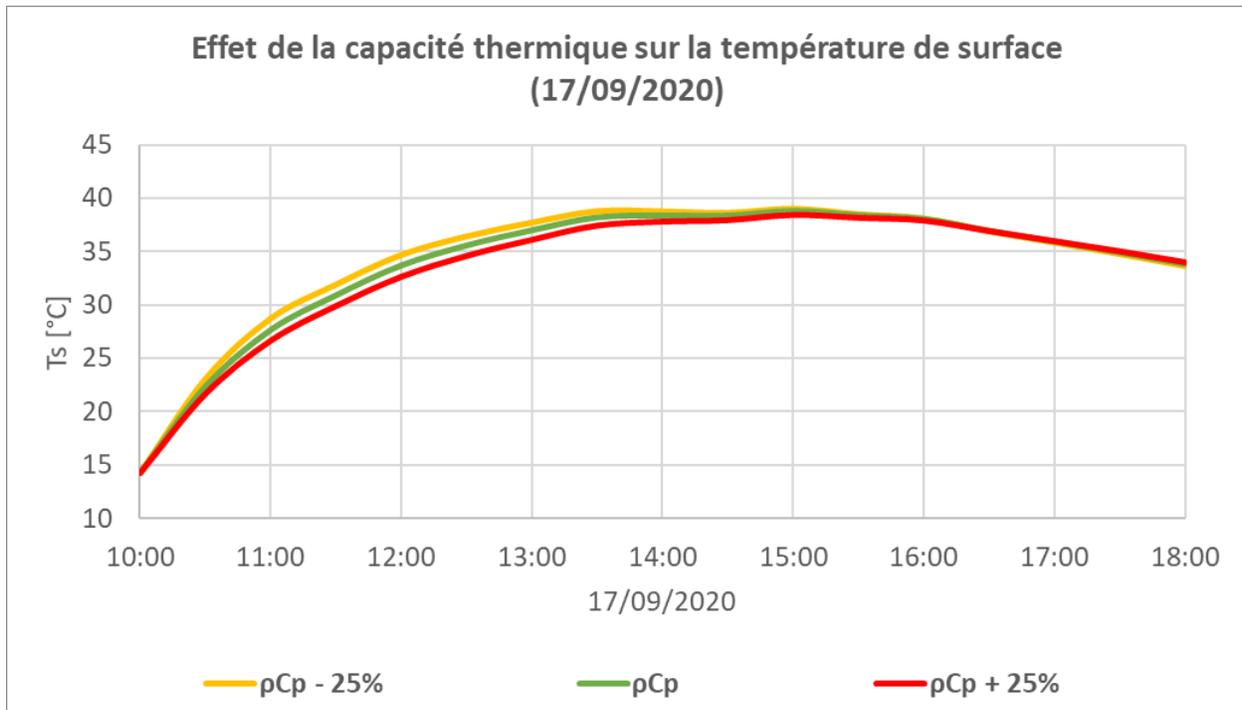


Figure IV.31. Effet de la variation de la capacité thermique sur la température de surface (pavé fictif testé sur la base des conditions climatiques du 17/09/2020)

Il peut être remarqué que la capacité thermique influe uniquement dans la phase de montée en température du pavé avant d'atteindre la température de pic. Cependant, cette influence est très faible, avec une diminution inférieure à 3,7% ($1,0^\circ\text{C}$) pour une augmentation de 25% de la valeur initiale de la capacité thermique.

De même, la Figure IV.32 montre une faible diminution de l'ordre de 4,5% de la masse d'eau évaporée en fin d'exposition, suite à l'augmentation de la capacité thermique de 25%.

Ces résultats sont consistants avec ce qui peut être observé. En effet, une capacité thermique élevée peut ralentir la montée de la température du pavé pendant la phase d'exposition au soleil. Dans cette situation, l'eau liquide qui se trouve dans le pavé se chauffe plus lentement et se retrouve à une température moins élevée, ce qui réduit son évaporation.

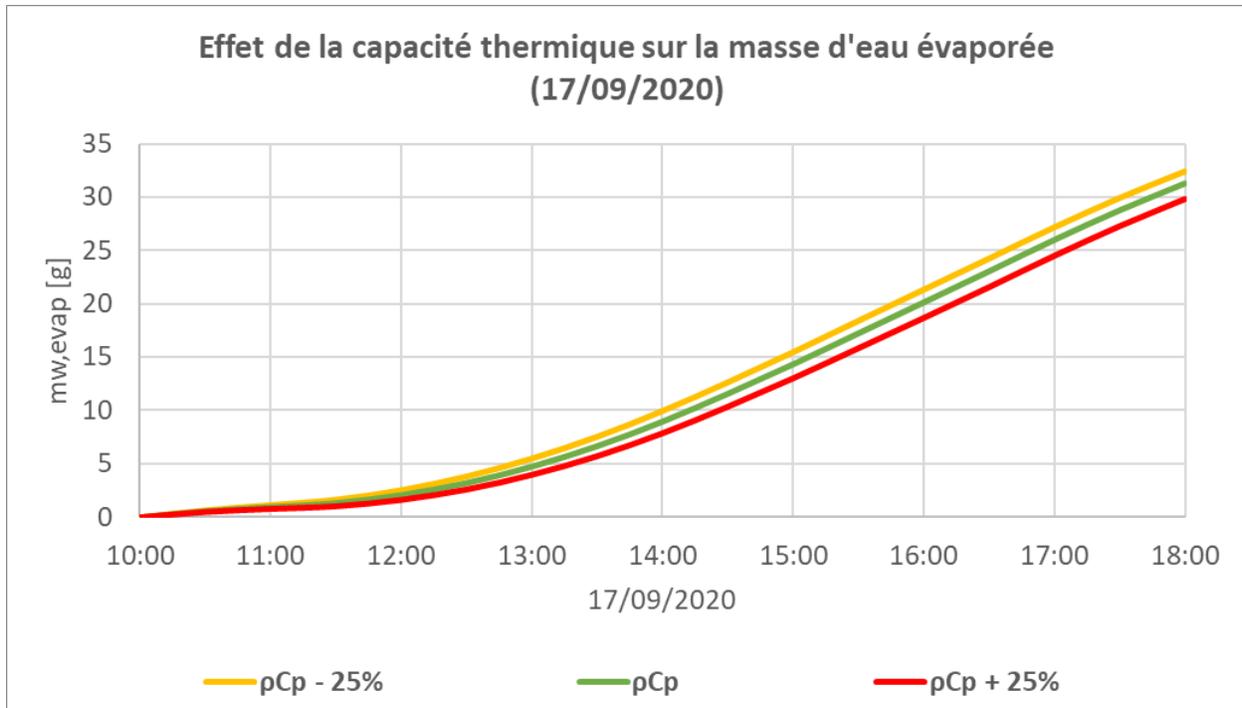


Figure IV.32. Effet de la variation de la capacité thermique sur la masse d'eau évaporée (pavé fictif testé sur la base des conditions climatiques du 17/09/2020)

3.9.4. Effet du taux d'évaporation

Les résultats de la masse d'eau évaporée dans la partie 3.7 ont révélé des écarts entre le pavé 7 et le pavé 11, de l'ordre de 37,6, 49,6 et 40,5 g à la fin d'exposition le 11/09, 14/09 et 17/09/2020 respectivement. Ces écarts ont engendré des augmentations de la température de surface du pavé 11 par rapport au pavé 7, avec des valeurs maximales de 11,9°C au cours des essais du 11/09/2020 et de 12,3°C pour les essais du 14/09 et du 17/09/2020. Dans ce cadre, il a été considéré que le taux d'évaporation est le facteur principal qui contrôle la température de surface.

Par conséquent, et pour confirmer cette affirmation, une étude paramétrique est menée sur le rendement d'évaporation moyen (\bar{r}_{1sun}) en partant d'une valeur initiale égale à 0,564. La variation sur ce rendement entraîne la même variation sur le taux d'évaporation (E) puisque \bar{r}_{1sun} est la moyenne arithmétique du rapport entre le taux d'évaporation du pavé et celui de l'eau. L'impact du taux d'évaporation sur la température de surface est présenté sur la Figure IV.33.

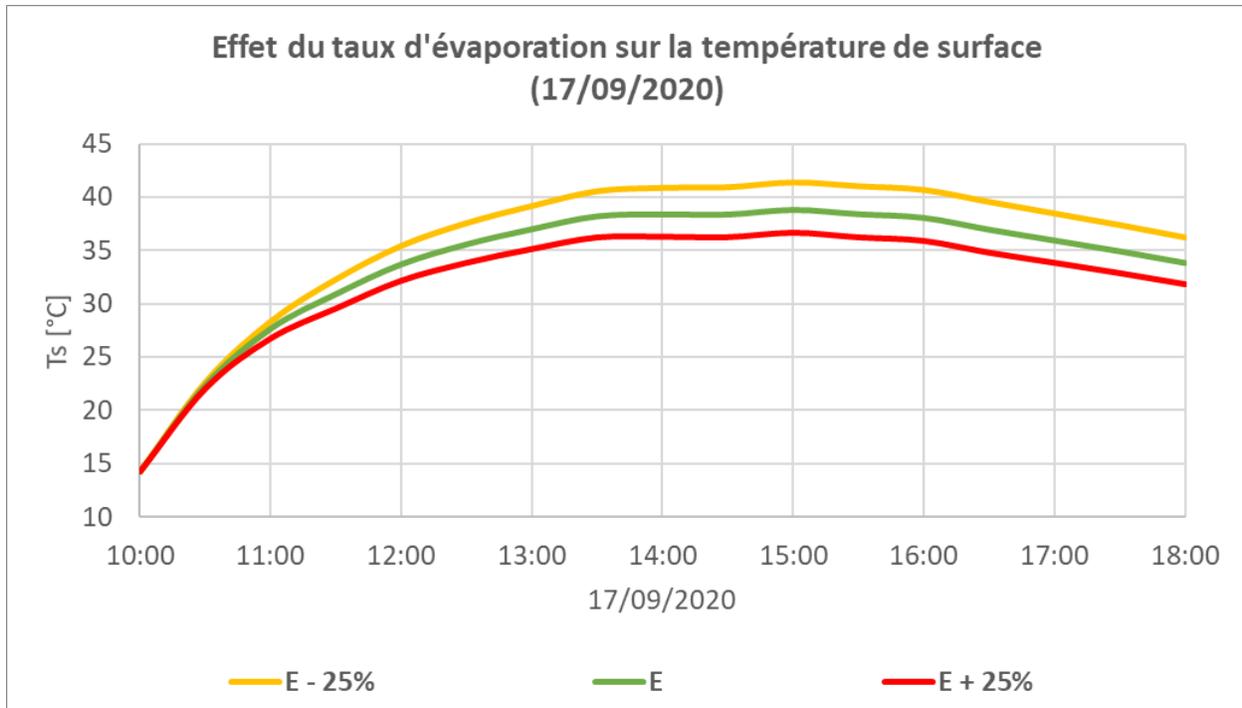


Figure IV.33. Effet de la variation du taux d'évaporation sur la température de surface (pavé fictif testé sur la base des conditions climatiques du 17/09/2020)

Comme prévu, la diminution du taux d'évaporation de 25% par rapport à sa valeur initiale produit une augmentation maximale de l'ordre de 7,0% (2,6°C) de la température de surface. De plus, si le taux d'évaporation monte de 25% de sa valeur initiale, la température de surface peut descendre de 5,8% (2.1°C).

Ces résultats de température sont négativement corrélés à ceux de la masse d'eau évaporée illustrés par la Figure IV.34.

Cette figure montre que si le taux d'évaporation diminue de 25% de sa valeur initiale, il entraîne une diminution de l'ordre de 26,5% de la quantité évaporée à la fin d'exposition. De plus, si ce taux augmente de 25% de sa valeur initiale, il contribue à une élévation de l'ordre de 22,2% de la masse d'eau évaporée finale. En effet, un taux d'évaporation élevé permet de favoriser le flux de chaleur latente (q_E) qui tend à diminuer la température de surface de manière significative tout au long de l'expérience.

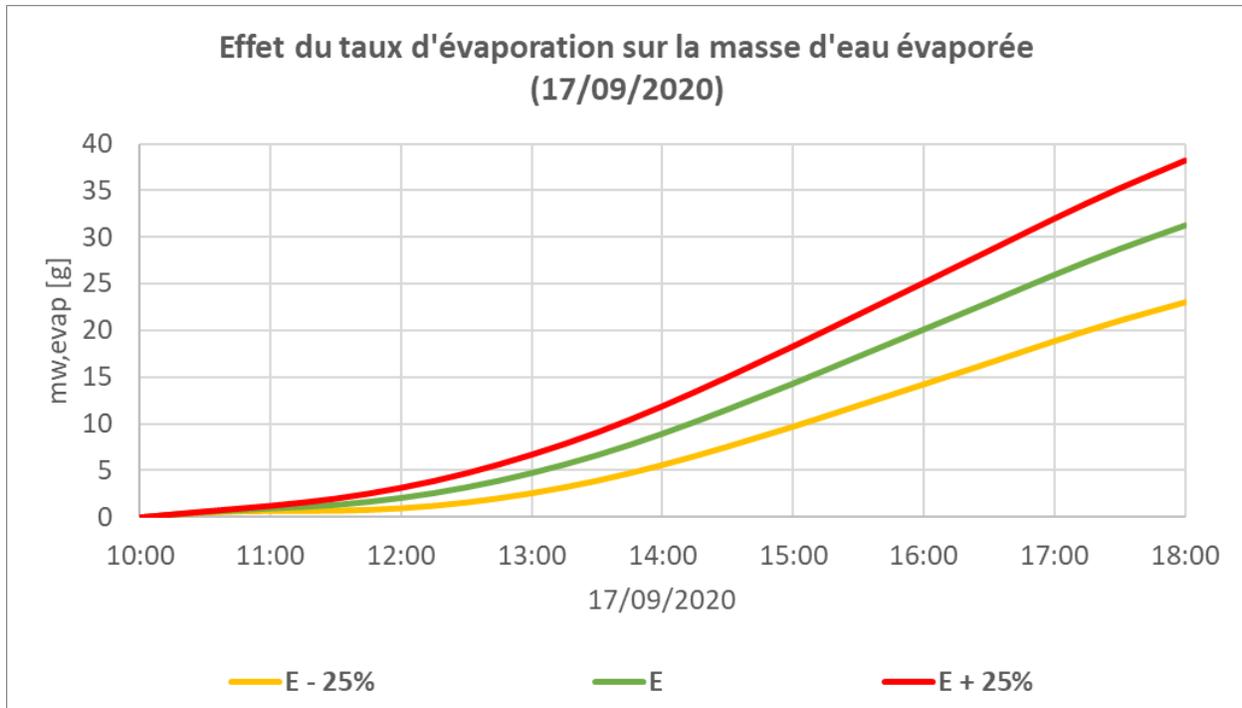


Figure IV.34. Effet de la variation du taux d'évaporation sur la masse d'eau évaporée (pavé fictif testé sur la base des conditions climatiques du 17/09/2020)

Finalement, cette étude paramétrique a montré que, parmi les propriétés étudiées, le taux d'évaporation est le premier facteur qui influe sur la température de surface à l'état humide, suivi par l'albédo, puis la capacité thermique volumique.

4. Conclusion

Dans ce chapitre, et dans un premier temps, un modèle à l'état sec a été construit sur COMSOL®, en utilisant les données météo mesurées par une station (UPS) proche du lieu d'expérimentation, et certaines propriétés thermo-physiques des pavés, issues de la campagne expérimentale (chapitre III).

Ensuite, ce modèle a été validé en comparant les profils de température de surface, pendant les trois jours d'exposition, pour deux pavés extrêmes en termes de rafraîchissement. Cette comparaison a été basée sur trois indices statistiques : l'écart relatif maximal (EA_{max}), l'erreur absolue moyenne (MAE) et le coefficient de détermination (R^2).

Ces indices ont montré un bon accord entre les valeurs expérimentales et simulées, indiquant ainsi que les paramètres d'entrée du modèle sont réalistes, avec des valeurs maximales de

EA_{max} et MAE d'ordre $5,0^{\circ}\text{C}$ et $2,3^{\circ}\text{C}$, respectivement, et une valeur minimale de R^2 égale à $0,97$.

Dans un deuxième temps, en se basant sur les données météo, les propriétés thermo-physiques des pavés et leurs rendements d'évaporation moyens, un modèle à l'état humide a été développé. Les données météo pendant les trois jours d'exposition ont été mesurées par la même station (UPS) proche du lieu d'expérimentation, alors que les propriétés thermo-physiques et les rendements d'évaporation des pavés ont été obtenus de la partie expérimentale (chapitre III). La validation de ce modèle a été réalisée en suivant la même méthodologie que pour l'état sec.

Les critères statistiques ont révélé une bonne adéquation entre les courbes mesurées et simulées de température de surface, pour les deux pavés extrêmes, avec des valeurs de EA_{max} et MAE qui ne dépassent pas $4,5^{\circ}\text{C}$ et $1,5^{\circ}\text{C}$, respectivement, et des valeurs de R^2 supérieures à $0,94$.

Ensuite, des résultats de simulation de la masse d'eau évaporée et de la distribution de la saturation en eau ont été présentés. Ils ont illustré les écarts entre les pavés extrêmes au niveau de ces deux caractéristiques et ont confirmé le fort couplage qui existe entre le transfert de chaleur et le transfert de masse dans le pavé.

A la fin de ce chapitre, une analyse paramétrique a été menée pour étudier la sensibilité du modèle aux propriétés thermo-physiques employées dans la partie numérique. Cette analyse a montré que le taux d'évaporation est le facteur le plus influent sur la température de surface à l'état humide, suivi par l'albédo et la capacité thermique volumique. La conductivité thermique et la porosité ouverte n'ont pas montré d'effet notable sur la température de surface.

Conclusions générales

Ce travail de thèse représente une contribution originale dans le domaine de la qualification de pavés rafraîchissants, basée sur l'étude de leurs capacités de rafraîchissement à travers leurs propriétés thermo-physiques.

Dans le chapitre I, les différentes approches adoptées pour atténuer le phénomène d'ICU à travers la technique des pavés rafraîchissants ont été identifiées. Ces approches portent sur la réduction de la température de surface du pavé, par augmentation de son albédo, de sa conductivité thermique et de son flux d'évaporation. Ensuite, les facteurs favorisant l'évaporation ont été présentés. Ils comprennent les facteurs climatiques, l'irrigation et certaines propriétés physiques du pavé comme sa porosité, sa perméabilité, sa capacité de rétention d'eau, ses capacités capillaires et la texture et la taille des particules avec lesquelles ce pavé est formulé. A la fin de ce chapitre, l'effet d'incorporation de certains sous-produits dans les pavés en béton ou à base de ciment sur leurs propriétés physiques favorisant l'évaporation et sur leur durabilité a été également mis en exergue. La durabilité des pavés étudiée inclut l'évolution de l'albédo, les résistances (en compression, à l'abrasion et aux cycles de gel-dégel) et le colmatage des pores.

Dans le chapitre II, et dans un premier temps, les deux séries des pavés étudiés ont été présentées. La série (BS) est formée par 8 pavés en béton, à base de sable recyclé, et contenant un certain pourcentage des matériaux hydrophiles comme les fibres de chanvre, les granulats de chènevotte de chanvre, le verre expansé « poraver », et l'argile expansée, alors que la série (BI) comporte 13 pavés en béton isolant structurel. Dans un second temps, leurs propriétés thermo-physiques ont été décrites ainsi que la méthode adoptée ou le protocole employé pour les mesurer. Le choix de ces propriétés a été principalement basé sur la littérature. Ces caractéristiques ont été divisées en propriétés physiques comme la porosité ouverte, la masse volumique, les capacités capillaires, la conductivité hydraulique et le taux d'évaporation, et en propriétés thermiques comme l'albédo, la conductivité thermique et l'effusivité thermique. L'essai de conductivité hydraulique a été réalisé selon deux méthodes distinctes en fonction de la perméabilité des pavés : à charge constante pour les pavés drainants (4 pavés) et à charge variable pour les pavés non drainants (17 pavés). L'essai d'effusivité thermique et celui de la porosité ouverte et de la masse volumique, ont permis conjointement de déduire les valeurs de la chaleur spécifique et la diffusivité thermique. Le chapitre II se termine par une mesure de la température de surface des pavés à travers un essai d'exposition au rayonnement solaire extérieur. L'exposition des pavés a été effectuée dans un état humide puis dans un état sec, pendant trois journées estivales pour chaque état. L'état humide correspond à une saturation

préalable des pavés accompagnées par une alimentation continue d'eau au niveau de leurs bases, alors que l'état sec représente des pavés initialement secs non alimentés par l'eau.

Les résultats des mesures des propriétés thermo-physiques et des températures de surface ont été détaillés dans le chapitre III. Une grande dispersion des résultats des pavés la série (BI) a été observée, et elle est principalement attribuée aux différents types de matériaux qui constituent ces pavés.

Pour les pavés à l'état sec, une forte corrélation linéaire négative de $R^2 = 0,83$ a été observée entre la température de surface maximale et l'albédo. Ce résultat est en cohérence avec la littérature. En effet, plus l'albédo du pavé est élevé, moins d'énergie solaire est absorbée par sa surface.

En revanche, il a été remarqué que la conductivité thermique n'a pas d'influence sensible sur la température de surface des pavés secs. De plus, en comparant ces résultats avec ceux de la littérature, il s'avère que les valeurs de la température de surface maximale dans ce travail, seront influencées négativement par la conductivité thermique à partir de valeurs supérieures à $2,1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Par suite, dans ce travail, nous avons observé que la température de surface à l'état sec est uniquement contrôlée par l'albédo, la valeur maximale mesurée de la conductivité thermique valant $0,765 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

A l'état humide, les corrélations trouvées ont été divisées en deux séries selon le type des pavés : drainants ou non drainants.

Pour les pavés drainants, une forte corrélation polynomiale du second degré, de $R^2 = 0,97$, a été trouvée entre la température de surface moyenne ($T_{s,moy}$) et le terme $K\Theta_{cap}$ qui représente le produit entre la conductivité hydraulique (K) et la fraction volumique des pores capillaires (Θ_{cap}). Ce terme reflète la quantité d'eau transportée par les pores capillaires et connectée à la surface. Cette quantité est toutefois contrôlée par l'équilibre entre les forces capillaires et les forces gravitationnelles. Cet équilibre se manifeste par des valeurs de température de surface qui tendent vers une valeur minimale proche de la température de l'air moyenne. Ce minimum correspond à une taille optimale de pores capillaires pour laquelle les forces capillaires dépassent celles de gravité.

Pour les pavés non drainants, une bonne corrélation linéaire négative, de $R^2 = 0,80$, a été constatée entre la température de surface moyenne ($T_{s,moy}$) et le terme $\alpha E_{th} \Theta_{cap}$. Ce terme est le produit entre l'albédo (α), l'effusivité thermique (E_{th}), et la fraction volumique des pores capillaires (Θ_{cap}). Il traduit la quantité d'eau capillaire chauffée par la chaleur stockée dans le pavé, sans que ce dernier se chauffe significativement en sa surface, et par suite la dominance du processus d'évaporation par diffusion. Cependant, ce processus est sujet à être atténué par

la résistance du pavé à la diffusion de la vapeur d'eau. Par suite, une bonne connaissance de la perméabilité à la vapeur d'eau dans le pavé, pourrait améliorer la corrélation trouvée.

A la fin du chapitre III, une forte corrélation linéaire négative, de $R^2 = 0,92$, a été trouvée entre la température de surface moyenne et le taux d'évaporation moyen, mesurées lors d'essai d'exposition au simulateur solaire.

Le chapitre IV a présenté, dans un premier temps, un modèle de transfert de chaleur permettant de prédire le comportement thermique des pavés à l'état sec. Dans un second temps, un autre modèle de transfert couplé de transferts de chaleur et de masse, visant à prédire le comportement hygrothermique des pavés, a été développé.

Les deux modèles construits ont été basés sur les données météo enregistrées par une station météo proche du lieu d'exposition et certaines propriétés thermo-physiques issues de la campagne expérimentale.

La validation de ces modèles a été réalisée en comparant les courbes de variation de la température de surface, expérimentales et numériques, pendant les journées d'exposition, pour les deux pavés extrêmes dans chaque état (sec ou humide). La validation du modèle à l'état sec a permis de vérifier la compatibilité des paramètres d'entrée, notamment les données météo et certaines propriétés du pavé.

Les analyses comparatives ont montré que le modèle développé est capable de prédire, avec une bonne précision, la variation de la température de surface du pavé au cours du temps. Les écarts trouvés entre les variations expérimentales et numériques, sont attribués principalement à l'effet des nuages qui atténue l'intensité du rayonnement solaire, à la vitesse de l'air qui varie d'un endroit à un autre, et à la capacité thermique volumique effective du pavé qui influence la dynamique de chauffage et de restitution de chaleur dans le pavé.

Une étude paramétrique portant sur la température de surface et la masse d'eau évaporée, dans le modèle à l'état humide, a été menée. Il a été constaté, à travers cette étude, que le taux d'évaporation est le premier facteur qui contrôle la température de surface du pavé, suivi par l'albédo, et enfin la capacité thermique volumique.

Enfin, les études expérimentales dans ce travail ont répondu à la problématique portant sur la définition du couplage des propriétés thermo-physiques du pavé qui contrôlent sa température de surface. De plus, les études numériques ont démontré que le taux d'évaporation mesuré sous le simulateur solaire est le premier facteur qui régit le rafraîchissement surfacique. Par conséquent, la mesure du taux d'évaporation dans les conditions réelles, permettra de vérifier comment varie ce taux avec les autres propriétés thermo-physiques mesurées, et d'améliorer davantage les corrélations trouvées dans la partie expérimentale.

Perspectives de recherche

Cette dernière partie présente les perspectives de cette thèse qui peuvent améliorer les résultats trouvés et enrichir les travaux réalisés. Elle est divisée en deux parties : expérimentale et numérique.

Partie numérique

L'étude paramétrique du modèle numérique a démontré que le taux d'évaporation est le facteur principal affectant la température de surface du pavé. Par conséquent, la substitution du rendement d'évaporation calculé sous le simulateur solaire par celui évalué dans les conditions extérieures, pourrait améliorer les résultats numériques. Enfin, le modèle numérique n'est pas exempt d'améliorations, qui pourront être obtenues en utilisant une station météo située à proximité des pavés et en ajustant leurs propriétés effectives dans les variables du modèle développé.

Une étude numérique reliant les résultats à l'échelle du pavé avec l'échelle de l'environnement immédiat (place, îlot etc.) est aussi à envisager en couplant différents outils numériques.

Partie expérimentale

L'étude de l'influence de la conductivité thermique sur la température de surface du pavé, exigera la formulation et le coulage des pavés caractérisés par une haute conductivité thermique supérieure à la valeur maximale mesurée dans ce travail. Quelques essais réalisés en cours de thèse sur une formulation incluant des fibres de carbone ne se sont pas révélés concluants et n'ont pas été présentés. Un nouveau travail d'optimisation doit encore être réalisé.

Pour confirmer et élargir le domaine de validité de la corrélation polynomiale trouvée pour les pavés drainants à l'état humide, il sera intéressant de formuler et couler d'autres pavés drainants pour augmenter le nombre des pavés testés.

Pour les pavés non drainants à l'état humide, il s'avère important de mesurer leur perméabilité à la vapeur d'eau pour améliorer la corrélation linéaire trouvée qui reflète le processus d'évaporation par diffusion.

Il sera également très important d'étudier des pavés ayant des conductivités hydrauliques comprises dans la gamme des valeurs qui séparent les pavés drainants des pavés non drainants, afin de créer une sorte de continuité entre les deux familles de pavés.

Les résultats de l'essai d'exposition au simulateur solaire ont montré une forte corrélation linéaire négative entre la température de surface moyenne et le taux d'évaporation moyen. Cependant, la différence des spectres entre le simulateur solaire et le soleil, a engendré des

températures de surface expérimentales qui ne suivent pas la même tendance. Pour cela, il sera indispensable de mesurer le rendement d'évaporation de chaque pavé dans les conditions estivales extérieures en surveillant son taux d'évaporation et celui de l'eau nue qui sera prise comme référence. Le protocole d'essai sera le même que celui d'exposition au simulateur solaire, mais en testant le pavé et l'eau en même temps. Cet essai permettra de chercher les corrélations qui peuvent exister entre les propriétés thermo-physiques des pavés et leurs taux d'évaporation relatifs dans les conditions réelles.

Enfin dans le cadre d'une étude ultérieure, l'intégration d'essais à l'échelle du quartier (place de l'ordre de la centaine m²) sera nécessaire. Une collaboration avec Toulouse Métropole et Véolia est en cours de finalisation, afin d'exploiter les résultats de mesure d'un prototype de 120 m² situé dans le quartier de Montaudran à Toulouse. Une mesure des effets actuels des pavés rafraîchissants en place (issus du commerce) doit être réalisée. Une substitution d'une partie de ces pavés par des pavés optimisés issus des travaux de recherche permettrait aussi de valider in situ les résultats obtenus à l'échelle du laboratoire.

Références

- [1] Météofrance. Planète : le changement climatique observé 2020 ; <https://météofrance.com/changement-climatique/observer/le-changement-climatique-observe-dans-le-monde> n.d.
- [2] Akbari H, Kolokotsa D. Three decades of urban heat islands and mitigation technologies research. *Energy and Buildings* 2016;133:834–42. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.067>.
- [3] Montávez JP, Rodríguez A, Jiménez JI. A study of the Urban Heat Island of Granada. *International Journal of Climatology* 2000;20:899–911. [https://doi.org/10.1002/1097-0088\(20000630\)20:8<899::AID-JOC433>3.0.CO;2-I](https://doi.org/10.1002/1097-0088(20000630)20:8<899::AID-JOC433>3.0.CO;2-I).
- [4] Oke TR. Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings* 1988;11:103–13. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(88\)90026-6](https://doi.org/10.1016/0378-7788(88)90026-6).
- [5] Santamouris M. Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions. *Science of the Total Environment* 2015;512–513:582–98. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.060>.
- [6] Evola G, Gagliano A, Fichera A, Marletta L, Martinico F, Nocera F, et al. UHI effects and strategies to improve outdoor thermal comfort in dense and old neighbourhoods. *Energy Procedia* 2017;134:692–701. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.589>.
- [7] Guattari C, Evangelisti L, Balaras CA. On the assessment of urban heat island phenomenon and its effects on building energy performance: A case study of Rome (Italy). *Energy and Buildings* 2018;158:605–15. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.050>.
- [8] Dubois C. Adapter les quartiers et les bâtiments au réchauffement climatique - Une feuille de route pour accompagner les architectes et les designers urbains québécois 2014:255.
- [9] Wong NH, Yu C. Study of green areas and urban heat island in a tropical city. *Habitat International* 2005;29:547–58. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2004.04.008>.
- [10] Yilmaz H, Toy S, Irmak MA, Yilmaz S, Bulut Y. Determination of temperature differences between asphalt concrete , soil and grass surfaces of the City of Erzurum , Turkey 2008;21:135–46.
- [11] Xue F, Li X, Ma J, Zhang Z. Modeling the influence of fountain on urban microclimate. *Building Simulation* 2015;8:285–95. <https://doi.org/10.1007/s12273-014-0210-7>.
- [12] Johansson E. Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco. *Building and Environment* 2006;41:1326–38. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.022>.

- [13] Doulos L, Santamouris M, Livada I. Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials. *Solar Energy* 2004;77:231–49. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.04.005>.
- [14] Yu Y, Liu J, Shao W. The estimation and effect of anthropogenic heat flux in Beijing. *Energy Procedia* 2018;152:302–6. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.09.129>.
- [15] Imran HM, Akib S, Karim MR. Permeable pavement and stormwater management systems: A review. *Environmental Technology (United Kingdom)* 2013;34:2649–56. <https://doi.org/10.1080/09593330.2013.782573>.
- [16] Hu M, Zhang X, Siu YL, Li Y, Tanaka K, Yang H, et al. Flood mitigation by permeable pavements in Chinese sponge city construction. *Water (Switzerland)* 2018;10:1–12. <https://doi.org/10.3390/w10020172>.
- [17] Li H. Evaluation of Cool Pavement Strategies for Heat Island Mitigation Evaluation of Cool Pavement Strategies for Heat Island Mitigation 2012:389.
- [18] Qin Y, Hiller JE. Water availability near the surface dominates the evaporation of pervious concrete. *Construction and Building Materials* 2016;111:77–84. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.063>.
- [19] Kinouchi T, Yoshinaka T, Fukae N KM. Development of cool pavement with dark colored high albedo coating. Fifth Conference on Urban Environment, Vancouver, Canada 2004:1–4.
- [20] Karasawa A, Toriiminami K, Ezumi N, Kamaya K. Evaluation of Performance of Water-Retentive Concrete Block Pavements. 8th International Conference on Concrete Block Paving, San Francisco, California USA 2006:233–42.
- [21] Synnefa A, Santamouris M, Apostolakis K. On the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment. *Solar Energy* 2007;81:488–97. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.08.005>.
- [22] Li H, Harvey JT, Holland TJ, Kayhanian M. The use of reflective and permeable pavements as a potential practice for heat island mitigation and stormwater management. *Environmental Research Letters* 2013;8:1–17. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/4/049501>.
- [23] Pisello AL, Pignatta G, Castaldo VL, Cotana F. Experimental analysis of natural gravel covering as cool roofing and cool pavement. *Sustainability (Switzerland)* 2014;6:4706–22. <https://doi.org/10.3390/su6084706>.
- [24] Chen J, Wang H, Zhu H. Analytical approach for evaluating temperature field of thermal modified asphalt pavement and urban heat island effect. *Applied Thermal Engineering* 2017;113:739–48. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.080>.
- [25] Wang H, Wu S, Chen M, Zhang Y. Numerical simulation on the thermal response of heat-conducting asphalt pavements. *Physica Scripta* 2010;T139/01404:1–4. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/2010/T139/014041>.

- [26] ShengYue W, QiYang Z, YingNa D, PeiDong S. Unidirectional Heat-Transfer Asphalt Pavement for Mitigating the Urban Heat Island Effect. *Journal of Materials in Civil Engineering* 2014;26:812–21. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000872](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000872).
- [27] Shi X, Rew Y, Ivers E, Shon CS, Stenger EM, Park P. Effects of thermally modified asphalt concrete on pavement temperature. *International Journal of Pavement Engineering* 2019;20:669–81. <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1326234>.
- [28] Chen J, Chu R, Wang H, Zhang L, Chen X, Du Y. Alleviating urban heat island effect using high-conductivity permeable concrete pavement. *Journal of Cleaner Production* 2019;237:1–28. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117722>.
- [29] Li H, Harvey J, Ge Z. Experimental investigation on evaporation rate for enhancing evaporative cooling effect of permeable pavement materials. *Construction and Building Materials* 2014;65:367–75. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.004>.
- [30] Zhang L, Pan Z, Zhang Y, Meng Q. Impact of climatic factors on evaporative cooling of porous building materials. *Energy and Buildings* 2018;173:601–12. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.038>.
- [31] Yamagata H, Nasu M, Yoshizawa M, Miyamoto A, Minamiyama M. Heat island mitigation using water retentive pavement sprinkled with reclaimed wastewater. *Water Science and Technology* 2008;57:763–71. <https://doi.org/10.2166/wst.2008.187>.
- [32] Parison S, Hendel M, Grados A, Jurski K, Royon L. A lab experiment for optimizing the cooling efficiency and the watering rate of pavement-watering. *Urban Climate* 2020;31:1–15. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100543>.
- [33] Sriravindrarah R, Mohammad KJ, Singh A. Permeability and drying of pervious concrete pavers. ISEC 2013 - 7th International Structural Engineering and Construction Conference: New Developments in Structural Engineering and Construction, Honolulu 2013:1703–7. <https://doi.org/10.3850/978-981-07-5354-2-Su-19-413>.
- [34] Bao T, Liu Z (Leo), Zhang X, He Y. A drainable water-retaining paver block for runoff reduction and evaporation cooling. *Journal of Cleaner Production* 2019;228:418–24. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.142>.
- [35] Wang J, Meng Q, Tan K, Zhang L, Zhang Y. Experimental investigation on the influence of evaporative cooling of permeable pavements on outdoor thermal environment. *Building and Environment* 2018;140:184–93. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.033>.
- [36] Liu Y, Li T, Peng H. A new structure of permeable pavement for mitigating urban heat island. *Science of the Total Environment* 2018;634:1119–25. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.041>.
- [37] Hellwig D.H.R. Evaporation of water from sand: 4. The influence of the depth of the water-table and the particle size distribution of the sand. *Journal of Hydrology* 1973;18:317–27.

- [38] Wanphen S, Nagano K. Experimental study of the performance of porous materials to moderate the roof surface temperature by its evaporative cooling effect. *Building and Environment* 2009;44:338–51. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.03.012>.
- [39] Shokri Kuehni SMS, Bou-Zeid E, Webb C, Shokri N. Roof cooling by direct evaporation from a porous layer. *Energy and Buildings* 2016;127:521–8. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.019>.
- [40] Sudprasert S, Sankaewthong S. Utilization of rice husks in a water-permeable material for passive evaporative cooling. *Case Studies in Construction Materials* 2018;8:51–60. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.12.005>.
- [41] Winarno S. Comparative Strength and Cost of Rice Husk Concrete Block. *MATEC Web of Conferences* 2019;280:1–10. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928004002>.
- [42] Jaskulski R, Kubissa W. Lightweight concrete with copper slag waste as sand substitution. *MATEC Web of Conferences* 2018;163:1–8. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816303006>.
- [43] Lori AR, Hassani A, Sedghi R. Investigating the mechanical and hydraulic characteristics of pervious concrete containing copper slag as coarse aggregate. *Construction and Building Materials* 2019;197:130–42. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.230>.
- [44] Paino J, Perera S, Alashwal A, Rodrigo MNN. Impact of fly-ash on carbon emissions in different concrete grades. *World Construction Symposium* 2019:368–77. <https://doi.org/10.31705/WCS.2019.37>.
- [45] Usha K N, Smitha B K. Suitability of Fly Ash in Replacement of Cement in Pervious Concrete. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)* 2016;5:115–8. <https://doi.org/10.17577/ijertv5is080117>.
- [46] Mishra A, Jena B. Effect of fly ash on properties of pervious concrete. *International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences* 2018;6:1–9.
- [47] Rizvi R, Tighe SL, Henderson V, Norris J. Incorporating recycled concrete aggregate in pervious concrete pavements. Paper Prepared for Presentation at the “Pavement Evaluation, Performance and Management” Session of the 2009 Annual Conference of the Transportation Association of Canada Vancouver, British Columbia 2009:1–18.
- [48] Hossain T, Salam A, Kader MA. Pervious concrete using brick chips as coarse aggregate: An experimental study. *Journal of Civil Engineering* 2012;40:125–37.
- [49] Hasan M, Kibria G, Salam A. Study on Brick Aggregate Made Pervious Concrete at Zero Fine Level. *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering* 2016;3:1–6.
- [50] Ulloa-Mayorga VA, Uribe-Garcés MA, Paz-Gómez DP, Alvarado YA, Torres B, Gasch I. Performance of pervious concrete containing combined recycled aggregates. *Ingeniería e Investigación* 2018;38:34–41. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v38n2.67491>.

- [51] Nguyen DH, Boutouil M, Sebaibi N, Leleyter L, Baraud F. Valorization of seashell by-products in pervious concrete pavers. *Construction and Building Materials* 2013;49:151–60. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.017>.
- [52] Cuadrado-Rica H, Sebaibi N, Boutouil M, Boudart B. Properties of ordinary concretes incorporating crushed queen scallop shells. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 2016;49:1805–16. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0613-7>.
- [53] Sai VJ, Kumar MP. Experimental Analysis of Durability of Pervious Concrete By Using Crushed Seashells. *International Research Journal of Engineering and Technology* 2019;06:2086–91.
- [54] Prado RTA, Ferreira FL. Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. *Energy and Buildings* 2005;37:295–300. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.03.009>.
- [55] Tennis D, Leming L, Akers J. Pervious Concrete Pavements. EB30202, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, and National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, USA 2004:1–28.
- [56] Kevern JT, Schaefer VR, Wang K, Suleiman MT. Pervious concrete mixture proportions for improved freeze-thaw durability. *Journal of ASTM International* 2008;5:1–13. <https://doi.org/10.1520/JAI101320>.
- [57] Wu H, Liu Z, Sun B, Yin J. Experimental investigation on freeze – thaw durability of Portland cement pervious concrete (PCPC). *Construction and Building Materials* 2016;117:63–71. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.130>.
- [58] Netinger Grubeša I, Barišić I, Keser T, Vračević M. Wearing characteristics assessment of pervious concrete pavements. *Road Materials and Pavement Design* 2019;20:727–39. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1421568>.
- [59] Liu H, Luo G, Wei H, Yu H. Strength, permeability, and freeze-thaw durability of pervious concrete with different aggregate sizes, porosities, and water-binder ratios. *Applied Sciences* 2018;8:1–16. <https://doi.org/10.3390/app8081217>.
- [60] Opiso EM, Supremo RP, Perodes JR. Effects of coal fly ash and fine sawdust on the performance of pervious concrete. *Heliyon* 2019;5:1–7. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02783>.
- [61] Leon Raj J, Chockalingam T. Strength and abrasion characteristics of pervious concrete. *Road Materials and Pavement Design* 2020;21:2180–97. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1596828>.
- [62] Wang S, Zhang G, Wang B, Wu M. Mechanical strengths and durability properties of pervious concretes with blended steel slag and natural aggregate. *Journal of Cleaner Production* 2020;271:1–34. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122590>.

- [63] Haselbach LM. Potential for Clay Clogging of Pervious Concrete under Extreme Conditions. *Journal of Hydrologic Engineering* 2010;15:67–9. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0000154](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0000154).
- [64] Sriravindrarah R, Do HM, Nguyen LD, Aoki Y. Effect of clogging on the water permeability of pervious concrete. *Incorporating Sustainable Practice in Mechanics of Structures and Materials - Proceedings of the 21st Australian Conference on the Mechanics of Structures and Materials* 2010:873–6. <https://doi.org/10.1201/b10571-158>.
- [65] Mishra K, Zhuge Y, Karunasena W. Clogging Mechanism of Permeable Concrete : a Review. Paper Presented at Concrete, Understanding Concrete Conference, Gold Coast Australia 2013:1–10.
- [66] ALassaad F. Rapport de stage. Développement et optimisation de pavés rafraîchissants pour l'atténuation des îlots de chaleur urbains 2019.
- [67] AFPC-AFREM, "Détermination de la Masse Volumique Apparente et de la Porosité Accessible à l'Eau. Méthodes Recommandées pour la Mesure des Grandeurs Associées à la Durabilité," *Compte-rendu des Journées Techniques*, Toulouse, 11-12 Décembre 1997. 1997.
- [68] Granier O, Chareyron D, Taberlet N. La Physique animée-CultureSciencesPhysique Tension superficielle (PC*) n.d.
- [69] Carrier O, Bonn D. Contact Angles and the Surface Free Energy of Solids. Elsevier Inc.; 2015. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800722-8.00002-3>.
- [70] Barozzi GS, Angeli D. A note on capillary rise in tubes. *Energy Procedia* 2014;45:548–57. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.059>.
- [71] Benavente D, Lock P, Ángeles García Del Cura M, Ordóñez S. Predicting the capillary imbibition of porous rocks from microstructure. *Transport in Porous Media* 2002;49:59–76. <https://doi.org/10.1023/A:1016047122877>.
- [72] NF EN ISO 15148. Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water absorption coefficient by partial immersion. 2003.
- [73] Yu C, Matray JM, Gonçalves J, Jaeggi D, Gräsle W, Wieczorek K, et al. Comparative study of methods to estimate hydraulic parameters in the hydraulically undisturbed Opalinus Clay (Switzerland). *Swiss Journal of Geosciences* 2017;110:85–104. <https://doi.org/10.1007/s00015-016-0257-9>.
- [74] Sandoval GFB, Galobardes I, Teixeira RS, Toralles BM. Comparison between the falling head and the constant head permeability tests to assess the permeability coefficient of sustainable Pervious Concretes. *Case Studies in Construction Materials* 2017;7:317–28. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.09.001>.

- [75] Gul M, Kotak Y, Muneer T, Ivanova S. Enhancement of albedo for solar energy gain with particular emphasis on overcast skies. *Energies* 2018;11:1–17. <https://doi.org/10.3390/en11112881>.
- [76] Sanjuán MÁ, Morales Á, Zaragoza A. Precast Concrete Pavements of High Albedo to Achieve the Net “Zero-Emissions” Commitments. *Applied Sciences (Switzerland)* 2022;12. <https://doi.org/10.3390/app12041955>.
- [77] NF EN 12667. Performance thermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination de la résistance thermique par la méthode de la plaque chaude gardée et la méthode fluxmétrique - Produits de haute et moyenne résistance thermique. 2001.
- [78] Zhang X, Degiovanni A. Mesure de l’effusivité thermique de matériaux solides et homogènes par une méthode de “sonde” plane. *Journal de Physique III* 1993;3:1243–65. <https://doi.org/10.1051/jp3:1993196>.
- [79] Degiovanni A. Conductivité et diffusivité thermique des solides. *Mesures Physiques* 1994;33. <https://doi.org/10.51257/a-v1-r2850>.
- [80] Cengel YA. *Heat Transference a Practical Approach*. MacGraw-Hill, 2004;4:874.
- [81] Kumar N, Arakeri JH. Evaporation From Layered Porous Medium in the Presence of Infrared Heating. *Water Resources Research* 2018;54:7670–87. <https://doi.org/10.1029/2017WR021954>.
- [82] Ju HY, Law CL, Fang XM, Xiao HW, Liu YH, Gao ZJ. Drying kinetics and evolution of the sample’s core temperature and moisture distribution of yam slices (*Dioscorea alata* L.) during convective hot-air drying. *Drying Technology* 2016;34:1297–306. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1105814>.
- [83] Markowski M. Air drying of vegetables: Evaluation of mass transfer coefficient. *Journal of Food Engineering* 1997;34:55–62. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(97\)00018-6](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(97)00018-6).
- [84] Chen H, Marks BP, Murphy RY. Modeling coupled heat and mass transfer for convection cooking of chicken patties. *Journal of Food Engineering* 1999;42:139–46. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(99\)00111-9](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(99)00111-9).
- [85] Kumar C, Joardder MUH, Farrell TW, Millar GJ, Karim A. A porous media transport model for apple drying. *Biosystems Engineering* 2018;176:12–25. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.06.021>.
- [86] Wetchakama S, Prachayawarakorn S, Soponronnarit S. Numerical simulation of heat and mass transfer inside a single rice kernel during fluidized bed drying 2015.
- [87] Zhang Z, Qin W, Shi B, Gao J, Zhang S, Access O. Modelling of intermittent microwave convective drying : parameter sensitivity 2017:405–19. <https://doi.org/10.1515/phys-2017-0045>.

- [88] Khan MIH, Welsh Z, Gu Y, Karim MA, Bhandari B. Modelling of simultaneous heat and mass transfer considering the spatial distribution of air velocity during intermittent microwave convective drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2020;153. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119668>.
- [89] Teleken JT, Porciúncula BDA, Teleken JG, Carciofi BAM. Drying of foods under intermittent supply of microwave energy: Proposal for a mathematical model. *Acta Scientiarum - Technology* 2021;43:1–12. <https://doi.org/10.4025/ACTASCITECHNOL.V43I1.51037>.
- [90] Van Belleghem M, Steeman M, Janssen H, Janssens A, De Paepe M. Validation of a coupled heat, vapour and liquid moisture transport model for porous materials implemented in CFD. *Building and Environment* 2014;81:340–53. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.06.024>.
- [91] Asadi T. Large Evaporation Rates in Porous Media. *J Biochem Tech* 2019:92–7.
- [92] Sabarez HT. Computational modelling of the transport phenomena occurring during convective drying of prunes. *Journal of Food Engineering* 2012;111:279–88. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.02.021>.
- [93] Asli M. Etude des transferts couplés de chaleur et de masse dans les matériaux bio-sourcés : Approches numérique et expérimentale. 2017.
- [94] Daş M, Aliç E, Kavak Akpınar E. Numerical and experimental analysis of heat and mass transfer in the drying process of the solar drying system. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 2021;24:236–46. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.10.003>.
- [95] Dong Q, Wang C, Xiong C, Li X, Wang H. Investigation on the Cooling and Evaporation Behavior of Semi-Flexible Water Retaining Pavement based on Laboratory Test and Thermal-Mass Coupling Analysis 2019:1–20. <https://doi.org/10.3390/ma12162546>.
- [96] Fillet R, Nicolas V, Fierro V, Celzard A. Modelling heat and mass transfer in solar evaporation systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2021;181:121852. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121852>.
- [97] van Genuchten MT. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal* 1980;44:892–8.

Annexes

Annexe 1. Résumé des études portant sur les approches pour atténuer l'ICU en se basant sur le bilan énergétique dans les pavés rafraîchissants

Ref.	Matériaux étudiés		Conditions spécifiques	Conditions générales (Type d'étude)	Propriétés étudiées				Résultats	
					T _s	α	k	E		
[19]	Pavés en asphalte posés sur une couche de gravier	à surface nue	Haute réflectivité pour le rayonnement proche infrarouge et faible réflectivité pour le visible	Exposition à l'extérieur pendant cinq jours d'été (Expérimentale)	x	x			<ul style="list-style-type: none"> α de la surface augmente avec l'augmentation de sa luminance L'augmentation de la luminance contribue à la diminution de T_{s,max} Les couches de peinture conçues peuvent diminuer T_{s,max} jusqu'à 15°C 	
avec une couche de peinture de fort albédo appliquée à la surface										
[20]	18 pavés en béton à base drainée posés sur le sol	15 retenant l'eau par capillarité	11 imperméables	<ul style="list-style-type: none"> Capacité de Retention ≥ 0,15 g/cm³ Hauteur d'absorption ≥ 70% en 30 min Grand nombre de pores de diamètre entre 0,003 μm et 400 μm 	Exposition à l'extérieur : <ul style="list-style-type: none"> Pendant un jour après irrigation pour tous les pavés A 14:00 d'un jour d'été pour les pavés prioras secs imperméables (Expérimentale) 	x	x		x	<ul style="list-style-type: none"> Luminance ou α de la surface peut diminuer sa température jusqu'à 5,1°C T_s diminue avec l'augmentation du E
4 perméables										
13 priora		12 imperméables								
1 perméable										
	1 pavé en asphalte dense à base drainée posé sur le sol									
[21]	Pavés en béton	Avec des revêtements réfléchissants du rayonnement solaire proche infrarouge appliqués à la surface		Exposition à l'extérieur pendant cinq mois (Expérimentale)	x	x			Les revêtements ayant des valeurs plus élevées de α ont révélé des T _{s,moy} et des T _{s,max} plus basses pendant toute la durée de l'expérience	
Avec des revêtements conventionnels appliqués à la surface										
Notation : T _s = température de surface ; α = albédo ; k = conductivité thermique ; E = flux ou taux d'évaporation										

Ref.	Matériaux étudiés		Conditions spécifiques	Conditions générales (Type de l'étude)	Propriétés étudiées				Résultats
					T _s	α	k	E	
[23]	9 pavés posés sur le sol	3 priora en béton	1 imperméable 2 perméables	Exposition à l'extérieur dans un jour d'été (Expérimentale)	x	x			<ul style="list-style-type: none"> ▪ L'augmentation de α du pavé diminue sa T_s ▪ α d'un pavé imperméable est toujours supérieur à celui d'un pavé perméable
3 en asphalte		1 imperméable 2 perméables							
3 en béton		1 imperméable 2 perméables							
[23]	5 couvertures en gravier placées sur un toit	4 couvertures en gravier naturel de différentes tailles de granulats	1 couverture en gravier mixte de couleur relativement sombre	Exposition à l'extérieur pendant 3 mois pour 4 ou 5 jours par mois (Expérimentale)	x	x			<ul style="list-style-type: none"> ▪ α diminue avec l'augmentation de la taille des granulats, et avec l'emploi du gravier mixte pour la même taille des particules ▪ Les profils de T_s des couvertures diminuent avec l'augmentation de leurs α
[24]		Pavé en asphalte							
[25]	Asphalte formé de 3 couches et posé sur un sol infini	Couche supérieure thermoconductrice	k varie entre 1,3 et 3 W/(m.K)	Pendant 8 h de rayonnement (Numérique)	x		x		T _{s,max} diminue de 8,83% lorsque k des couches thermoconductrices passe de 1,3 à 3,0 W/(m.°C)
		Couche intermédiaire thermoconductrice	k varie entre 1,3 et 3 W/(m.K)						
		Couche inférieure	k = 1,3 W/(m.K)						
[26]	Asphalte formé de 3 couches posé sur le sol et isolé latéralement	Groupe expérimental (GE)	Couche supérieure	Avec 10% (en masse) de poudres d'oxyde d'aluminium (k = 33 W/(m.K))	x		x		<ul style="list-style-type: none"> ▪ GE diminue T_s d'équilibre de 6,2°C (chauffage) et de 1,3°C (restitution) par rapport au GC pendant l'essai à l'intérieur ▪ GE diminue T_{s,max} de 3,4°C (journée) et de 1,2°C (nuit) par rapport au GC pendant l'essai à l'extérieur
			Couche intermédiaire						
		Groupe conventionnel (GC)		Sans poudres conductrices					

Notation : T_s = température de surface ; α = albédo ; k = conductivité thermique ; E = flux ou taux d'évaporation

Ref.	Matériaux étudiés		Conditions spécifiques	Conditions générales (Type de l'étude)	Propriétés étudiées				Résultats	
					T _s	α	k	E		
[27]	Pavés en béton bitumineux	contenant des perles de polypropylène expansé comme substituant	Substitution volumique à 0, 20, 60 et 100% de granulats (2.38 - 4.76 mm)	Exposition aux conditions climatiques estivales jusqu'à atteindre l'équilibre thermique (Numérique)	x		x		<ul style="list-style-type: none"> ▪ k diminue avec l'addition des perles mais augmente avec l'ajout du graphite ▪ La substitution maximale des perles augmente T_{s,max} de 2,5°C, alors que celle du graphite diminue T_{s,max} de 1,5°C 	
		contenant de la poudre de graphite comme substituant	Substitution massique à 0, 10, 15, 20, 25, 30, 35 et 40% de ciment							
[28]	4 pavés en béton posés sur le sol et isolés latéralement	1 imperméable	k = 1,42 W/(m.K)	Pendant 6 h de rayonnement à l'intérieur (Expérimentale et Numérique)	x		x		<ul style="list-style-type: none"> ▪ T_{s,max} du pavé perméable diminue avec l'addition de fibres d'aciers ▪ 1,5% de fibres diminue T_{s,max} du pavé perméable entre 2°C et 3°C 	
		3 perméables	Sans fibres d'acier							k = 0,59 W/(m.K)
			à 1% (en volume) de fibres d'acier							k = 0,72 W/(m.K)
			à 1.5% (en volume) de fibres d'acier							k = 0,84 W/(m.K)
[29]	6 échantillons perméables placés dans des cylindres à bases fermées et formés par des granulats de taille maximale (...)	1 en asphalte (9.5 mm)		Exposition à l'extérieur pendant trois jours après irrigation (Expérimentale)	x		x		<ul style="list-style-type: none"> ▪ T_s diminue à mesure que E augmente ▪ Le sable a le plus grand E (1 mm/h en moyenne) 	
		2 en béton (4.75 mm) et (9.5 mm)								
		2 en gravier (19 mm) et (12.5 mm)								
		1 en sable (9.5 mm)	Diamètre des pores relativement faible							

Notation : T_s = température de surface ; α = albédo ; k = conductivité thermique ; E = flux ou taux d'évaporation

Annexe 2. Résumé des études portant sur les propriétés physiques favorisant l'évaporation à travers les pavés rafraîchissants

Ref.	Matériaux étudiés		Conditions spécifiques	Conditions générales (Type de l'étude)	Propriétés étudiées							Résultats		
					T	E	θ	W_{cap}	A_{cap}	ϕ	K		Z	
[18]	Pavé en béton perméable à base drainée			Exposition à l'extérieur pendant 10 jours après irrigation (Numérique)		x	x							Pendant 12 h après irrigation, θ diminue de 100% à 70% et E décroît de 500 à 30 W/m ²
[29]	6 échantillons perméables placés dans des cylindres à bases fermées et formés par des granulats de taille maximale (...)	1 en asphalte (9,5 mm) 2 en béton (4,75 mm) et (9,5 mm) 2 en gravier (19 mm) et (12,5 mm)	Diamètre des pores relativement faible	Exposition à l'extérieur pendant trois jours après irrigation (Expérimentale)		x				x	x	x		<ul style="list-style-type: none"> ▪ à l'exception du sable, E augmente avec K et avec ϕ ▪ Le sable a le plus grand E (1 mm/h en moyenne) ▪ E diminue significativement avec la descente du niveau d'eau dans le pavé (150 mm d'épaisseur) mesuré de la surface (20 mm pour l'asphalte et le béton, et 60 mm pour les autres)
1 en sable (9,5 mm)														
[33]	3 pavés en béton perméable			Séchage à l'intérieur pendant 48 heures à 20°C après irrigation (Expérimentale)		x				x	x		E augmente avec ϕ , qui est positivement corrélée à K	
[34]	3 pavés en béton	Dense	Contient 5 tubes drainants verticaux : 1 au centre et 4 aux coins K = 1590 mm/h	Exposition à l'extérieur pendant 4 jours après irrigation (Expérimentale)	x		x				x			T du pavé retenant l'eau est significativement inférieure à celle des autres pavés avec une différence maximale de 13°C (journée) et de 3°C (nuit)
Perméable drainant														
Notation : T = température du pavé ; T _s = température de surface ; E = flux ou taux d'évaporation ; θ = teneur en eau ; W_{cap} = teneur en eau capillaire ; A_{cap} = coefficient d'absorption capillaire ; ϕ = porosité ; K = perméabilité ou conductivité hydraulique ; Z = niveau d'eau dans le pavé														

Ref.	Matériaux étudiés		Conditions spécifiques	Conditions générales	Propriétés étudiées							Résultats	
					T	E	θ	W_{cap}	A_{cap}	ϕ	K		Z
[35]	2 pavés perméables posés sur une base de gravier	Céramique	$A_{cap} = 2.04 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5})$ $W_{cap} = 121.07 \text{ kg}/\text{m}^3$	Exposition à l'extérieur pendant 3 jours après irrigation (Expérimentale)	x	x		x	x				<ul style="list-style-type: none"> ▪ L'évaporation dure pour 2 jours pour la céramique et un demi-jour pour le béton ▪ E vaut 41.4% du rayonnement absorbé pour la céramique et 17.6% pour le béton
		Béton	$A_{cap} = 0.01 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5})$ $W_{cap} = 101.36 \text{ kg}/\text{m}^3$										
[36]	2 pavés perméables conventionnels (sans colonnes capillaires)	Couche de surface (béton ou figuline)	W_{cap} de la figuline ($0.14 \text{ g}/\text{cm}^3$) est le double de celle du béton	Exposition à l'extérieur pendant 7 jours après irrigation (Expérimentale)	x	x		x	x				<ul style="list-style-type: none"> ▪ E du pavé à colonnes capillaires est supérieur à celui du pavé conventionnel ▪ E dure 7 jours dans le pavé à colonnes capillaires et 2 jours dans le pavé conventionnel ▪ T_s du pavé à colonnes capillaires est toujours inférieure à celle du pavé conventionnel avec une différence maximale de 6.7°C et 9.4°C pour le béton et la figuline respectivement
		Couche de pose (sable fin)											
		Couche de sous- base											
	2 pavés perméables avec colonnes capillaires	Couche de surface (béton ou figuline)	W_{cap} de la figuline ($0.14 \text{ g}/\text{cm}^3$) est le double de celle du béton										
Couche de pose (sable fin)													
		Couche de sous- base avec colonnes capillaires en figuline	Ascension capillaire de la base vers la surface en 5 heures dans les colonnes										
[37]	Mélanges de sable de rivière de 3 tailles placés dans des réservoirs ouverts	Sable grossier	% de particules fines ($< 0.1 \text{ mm}$) = 0.7 %	Exposition à l'extérieur pendant d'environ 16 mois (Expérimentale)								x	<ul style="list-style-type: none"> ▪ E diminue avec la chute de la nappe phréatique ▪ E diminue avec l'augmentation de la grossièreté du sable (le sable fin a évaporé deux fois plus d'eau que le sable grossier)
		Sable moyen											
		Sable fin	% de particules fines ($< 0.1 \text{ mm}$) = 9 %										
Notation : T = température du pavé ; T_s = température de surface; E = flux ou taux d'évaporation ; θ = teneur en eau ; W_{cap} = teneur en eau capillaire ; A_{cap} = coefficient d'absorption capillaire ; ϕ = porosité ; K = perméabilité ou conductivité hydraulique ; Z = niveau d'eau dans le pavé													

Ref.	Matériaux étudiés		Conditions spécifiques	Conditions générales	Propriétés étudiées							Résultats	
					T	E	θ	W_{cap}	A_{cap}	ϕ	K		Z
[38]	Matériaux retenant l'eau	Sable de silice	non poreux	Dans l'enceinte climatique pendant 2 jours après irrigation (Expérimentale)									La cendre volcanique engendre le plus grand E, d'ordre 0,22 kg/m ² /h, suivie par le schiste siliceux, le sable, et enfin les galets
		Galets											
		Schiste siliceux	Mésoporeux (diamètre des pores entre 2 et 50 nm)										
		Cendre volcanique	Macroporeux (diamètre des pores supérieure à 50 nm)										
[39]	Pavés retenant l'eau en sable de 3 tailles	Sable grossier		Dans une chambre climatisée pendant 15 jours après irrigation (Expérimentale)									E et la durée de la première phase d'évaporation augmentent avec la diminution de la taille du sable
		Sable moyen											
		Sable fin											

Notation : T = température du pavé ; T_s = température de surface ; E = flux ou taux d'évaporation ; θ = teneur en eau ; W_{cap} = teneur en eau capillaire ; A_{cap} = coefficient d'absorption capillaire ; ϕ = porosité ; K = perméabilité ou conductivité hydraulique ; Z = niveau d'eau dans le pavé

Annexe 3. Résumé des études concernant l'effet des sous-produits incorporés dans les pavés rafraîchissants sur les propriétés physiques favorisant l'évaporation

Ref.	Sujet de l'étude expérimentale	Matériaux étudiés		Conditions générales	Propriétés étudiées				Résultats
					A	H _{cap}	φ	K	
[40]	Balles de riz	Eprouvettes perméables formées de : latérite, sable de rivière, ciment, balles de riz de 3 tailles	7,5-9 mm	Plonger les extrémités inférieures des éprouvettes dans l'eau pour 3 jours (1 ^{ère} et 2 ^{ème} expérience) (Essai à l'intérieur)	x				<ul style="list-style-type: none"> ▪ H_{cap} augmente avec l'addition de balles de riz (7,5-9 mm) ou (0,5-2,5 mm) ▪ Les mélanges à balles de riz (7,5-9 mm) sont devenus plus mous
	0,5-2,5 mm								
	< 0,5 mm								
[41]	Balles de riz	Blocs constitués de : ciment, sable très fin, balles de riz		Plonger les blocs pour 8 heures dans l'eau	x				L'absorption d'eau augmente avec l'addition de balles de riz de 14,21% pour un rapport balles-ciment de 0,67, jusqu'à 21,75% pour un rapport égal à 1,78
		Balles de riz de largeur 2-4 mm et de longueur maximale de 10 mm		Rapport massique balles de riz-ciment varie entre 0,67 et 2,00					
[42]	Scories de cuivre	Béton léger contenant des scories de cuivre fines (0-2 mm)		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Substitution complète massique du sable par les scories de cuivre ▪ ρ (mélange substitué) = ρ (mélange de référence) 			x		φ ouverte des mélanges à scories de cuivre fines dépasse celle des mélanges de référence avec une différence entre 1,3% et 9,7%
[43]	Scories de cuivre	Béton perméable contenant des scories de cuivre		Substitution volumique à 20, 40, 50, 60, 80 et 100% de granulats grossiers (4,75-9,5 mm) par les scories de cuivre			x	x	L'augmentation de la quantité de scories de cuivre améliore φ et K, qui augmentent de 11% et 15% respectivement après une substitution complète
[45]	Cendres volantes	Béton perméable contenant des cendres volantes		Substitution massique à 10, 20 et 30% de ciment par les cendres volantes				x	K du béton à 20% de cendres volantes est légèrement supérieure à celle du béton de référence
[46]	Cendres volantes	Béton perméable contenant des cendres volantes		Substitution à 5 et 10% de ciment par les cendres volantes			x	x	<ul style="list-style-type: none"> ▪ La substitution de 10% de ciment par les cendres volantes révèle la plus grande φ ▪ K diminue de 0,211 cm/s pour le béton de référence jusqu'à 0,168 cm/s pour le béton à 10% de cendres volantes
[47]	Granulats recyclés	Béton perméable contenant des granulats en béton recyclé		Substitution à 15, 30, 50 et 100% de granulats grossiers (9,5-12,5 mm) par les granulats en béton recyclé			x	x	φ et K augmentent avec l'augmentation du pourcentage de substitution

Notation : A = absorption d'eau ou augmentation en poids [%] ; H_{cap} = hauteur capillaire ; φ = porosité ; K = perméabilité ou conductivité hydraulique ; ρ = masse volumique apparente

Ref.	Sujet de l'étude expérimentale	Matériaux étudiés	Conditions générales	Propriétés étudiées				Résultats
				A	H _{cap}	φ	K	
[48]	Granulats recyclés	Béton perméable contenant des granulats en briques d'argile recyclées	Substitution totale des granulats grossiers de taille unique (19,5, 12,5 ou 4,75 mm) par les granulats en briques d'argile recyclées			x	x	<ul style="list-style-type: none"> ▪ φ et K sont positivement corrélées à la taille des granulats ▪ φ et K sont toujours supérieures dans le cas d'un mélange substitué par rapport au mélange témoin pour la même taille des particules
[49]	Granulats recyclés	Béton perméable contenant des granulats en briques d'argile recyclées	Substitution totale des granulats grossiers (25, 19 et 12 mm) par les granulats en briques d'argile recyclées			x	x	<ul style="list-style-type: none"> ▪ φ et K sont toujours supérieures dans le cas d'un mélange substitué à taille unique par rapport au mélange témoin à taille graduée ▪ φ et K diminuent en réduisant la taille des particules et avec leur gradation dans le mélange substitué
[50]	Granulats recyclés	Béton perméable contenant une combinaison de granulats recyclés en béton et en brique de céramique	Substitution totale des granulats grossiers (9,5-12,5 mm) par une combinaison de granulats recyclés en béton et en brique de céramique d'une manière complémentaire à 0, 25, 50, 75 et 100%			x	x	<ul style="list-style-type: none"> ▪ φ et K des mélanges substitués sont toujours supérieures à celles du mélange témoin ▪ φ et K augmentent davantage avec une substitution par des granulats en briques recyclées que par des granulats en béton recyclé
[51]	Déchets de coquillage	Béton perméable contenant des sous-produits de coquillage SBP (2-4 mm) et (4-6,3 mm) de type « crepidula »	Substitution massive à 20% et 40% de granulats grossiers (4-6,3 mm) par SBP (2-4 mm) et SBP (4-6,3 mm), et à 40% par SBP (2-6,3 mm)			x	x	φ accessible et K augmentent avec l'augmentation de la quantité incorporée de SBP, et particulièrement les SBP (4-6,3 mm)
[52]	Déchets de coquillage	Béton contenant des coquilles broyées (0-5 mm) de type « queen scallop »	Substitution massive à 20, 40 et 60% du sable (0-4 mm) et du gravier (4-10 et 10-20 mm) par les coquilles broyées (0-5 mm) % de substitution = masse des coquilles/masse totale des granulats			x	x	φ accessible et K augmentent avec la substitution des granulats (φ accessible augmente de 18.0% pour le béton témoin à 21,4% pour le béton à 60% de coquilles broyées)
[53]	Déchets de coquillage	Béton perméable contenant des coquilles broyées (< 4,75 mm) de divers types	Substitution à 20, 40, 60, 80 et 100% du sable de rivière par des coquilles broyées (< 4,5 mm)				x	Un remplacement à partir de 60% augmente K par rapport au béton témoin, pour atteindre une valeur maximale pour un remplacement complet
Notation : A = absorption d'eau ou augmentation en poids [%] ; H _{cap} = hauteur capillaire ; φ = porosité ; K = perméabilité ou conductivité hydraulique ; ρ = masse volumique apparente								

Annexe 4. Résumé des études portant sur la durabilité des pavés rafraîchissants

Ref.	Matériaux étudiés		Conditions générales	Propriétés étudiées					Résultats
				α	Colmatage	R _c	R _a	R _{GD}	
[21]	Pavés en béton	Avec des revêtements réfléchissants du rayonnement solaire proche infrarouge appliqués à la surface	Après 3 mois d'exposition à l'extérieur	x					<ul style="list-style-type: none"> Tous les α mesurés ont diminué par rapport à leurs valeurs initiales Les revêtements qui ont des albédos plus élevés subissent une diminution plus remarquable dans les valeurs de α α après lavage ont été restaurés au-delà de 93% de leurs valeurs initiales
		Avec des revêtements conventionnels appliqués à la surface							
[43]	Béton perméable contenant des scories de cuivre		Substitution volumique à 20, 40, 50, 60, 80 et 100% de granulats grossiers (4,75-9,5 mm) par les scories de cuivre			x			<ul style="list-style-type: none"> L'addition de scories de cuivre augmente R_c L'augmentation maximale de R_c correspond à une substitution de 60% (R_{c,28} augmente de 31% par rapport au mélange témoin, de 17,9 MPa jusqu'à 23,4 MPa)
[45]	Béton perméable contenant des cendres volantes		Substitution massique à 10, 20 et 30% de ciment par les cendres volantes			x			Une substitution de 20% peut maximiser R _{c,7} (18,1 MPa) par rapport aux mélanges témoins (17,1 MPa)
[46]	Béton perméable contenant des cendres volantes		Substitution à 5 et 10% de ciment par les cendres volantes			x			Le remplacement de 10% augmente R _{c,28} , de 5 MPa pour le mélange témoin jusqu'à 6.8 MPa (augmentation de 36%)
[47]	Béton perméable contenant des granulats en béton recyclé		Substitution à 15, 30, 50 et 100% de granulats grossiers (9,5-12,5 mm) par les granulats en béton recyclé			x	x		<ul style="list-style-type: none"> R_{c,48} diminue avec l'augmentation du pourcentage des granulats en béton recyclé substitués Presque la totalité de la masse perdue par l'essai d'abrasion est constituée du mortier qui couvre les granulats en béton recyclé ce qui diminue R_c
[48]	Béton perméable contenant des granulats en briques d'argile recyclées		Substitution totale des granulats grossiers de taille unique (19,5, 12,5 ou 4,75 mm) par les granulats en briques d'argile recyclées			x			<ul style="list-style-type: none"> R_{c,28} augmente en diminuant la taille des granulats dans le mélange Pour la même taille des granulats, R_c d'un mélange à granulats naturels est toujours supérieure à celle d'un mélange à granulats en briques recyclées

Notation : α = albédo ; R_c = résistance à la compression ; R_a = résistance à l'abrasion ; R_{GD} = résistance au gel-dégel ; K = perméabilité ou conductivité hydraulique

Ref.	Matériaux étudiés		Conditions générales	Propriétés étudiées					Résultats
				α	Colmatage	R_c	R_a	R_{GD}	
[49]	Béton perméable contenant des granulats en briques d'argile recyclées		Substitution totale des granulats grossiers (25, 19 et 12 mm) par les granulats en briques d'argile recyclées			x			<ul style="list-style-type: none"> ▪ $R_{c,28}$ diminue quand la taille des granulats augmente ▪ $R_{c,28}$ pour un mélange substitué à taille unique de 12 mm (7,31 MPa) est très proche de celle d'un mélange substitué à taille graduée (7,63 MPa), qui est à son tour inférieure de 20% par rapport à celle du mélange de référence à taille graduée (9,45 MPa)
[50]	Béton perméable contenant une combinaison de granulats recyclés en béton et en brique de céramique		Substitution totale des granulats grossiers (9,5-12,5 mm) par une combinaison de granulats recyclés en béton et en brique de céramique d'une manière complémentaire à 0, 25, 50, 75 et 100%			x			<ul style="list-style-type: none"> ▪ $R_{c,28}$ est toujours inférieure dans les mélanges substitués par rapport au mélange témoin (La valeur maximale de $R_{c,28}$ est 5,8 MPa pour les mélanges substitués, et $R_{c,28}$ est égale à 8,9 pour le mélange témoin) ▪ Un mélange à 100% de granulats en briques recyclées présente une $R_{c,28}$ légèrement supérieure à celle d'un mélange à 100% de granulats en béton recyclé, avec des valeurs de 5,8 MPa et 5,4 MPa respectivement
[54]	Matériaux placés sur les toits des bâtiments		Exposition à l'extérieur	x					L'exposition des matériaux aux conditions extérieures, tend à diminuer α des matériaux clairs ($\alpha > 0.2$) et à augmenter celui des matériaux sombres ($\alpha < 0.2$)
[56]	Mélanges en béton perméable avec ou sans sable et contenant des fibres de polypropylène de deux types	Fibres courtes (12,7-19,1 mm)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Substitution massive à 7% de granulats grossiers (4,75-9.5 mm) par du sable (90% de ses particules < 2,36 mm) ▪ Addition de fibres à 0,0, 0,3 et 0,9 kg/m³ 			x		x	<ul style="list-style-type: none"> ▪ L'addition de sable augmente $R_{c,7}$ moyenne de 14,4 MPa à 17,0 MPa et augmente R_{GD} ▪ L'addition de fibres au mélange sans sable augmente R_c et augmente R_{GD} mais le degré d'augmentation n'est pas aussi élevé que celui fourni par l'utilisation de sable uniquement ▪ L'utilisation de sable et de fibres ensemble augmente significativement R_{GD}, surtout dans les premiers cycles, mais cette résistance devient inférieure à celle du mélange contenant du sable sans fibres, qui a montré la meilleure durabilité au gel-dégel avec une perte de masse de 2% après 300 cycles
		Fibres longues (50 mm)							
Notation : α = albédo ; R_c = résistance à la compression ; R_a = résistance à l'abrasion ; R_{GD} = résistance au gel-dégel ; K = perméabilité ou conductivité hydraulique									

Ref.	Matériaux étudiés		Conditions générales	Propriétés étudiées					Résultats
				α	Colmatage	R _c	R _a	R _{GD}	
[57]	4 échantillons en béton perméable contenant (en masse de ciment)	-				x	x	<ul style="list-style-type: none"> ▪ L'addition de l'agent entraîneur d'air dans le mélange de référence augmente légèrement sa R_c ▪ Les mélanges modifiés par le latex présentent des R_c plus élevées que les autres mélanges ▪ L'addition de fibres aux mélanges modifiés par le latex peut augmenter davantage leurs R_c ▪ Les échantillons de référence ont subi une perte de masse plus importante que les échantillons contenant l'agent entraîneur d'air ▪ Les mélanges contenant du latex et des fibres ont révélé une perte de masse légèrement inférieure à celle des mélanges modifiés par le latex uniquement 	
Agent entraîneur d'air (0,01%)									
Agent entraîneur d'air (0,01%) et Latex (12%)									
Agent entraîneur d'air (0,01%), Latex (12%) et Fibres de polypropylène 3-12 mm (0,2 %)									
[58]	Béton perméable contenant des scories d'acier de deux tailles (4-8 mm) ou (8-16 mm) et à différentes proportions		Substitution complète des granulats de dolomite par les scories d'acier			x	x	<ul style="list-style-type: none"> ▪ L'utilisation de granulats de faible taille (dolomite ou scories d'acier) augmente R_{c,28} ▪ Les mélanges préparés par les granulats de dolomite sont plus susceptibles à l'abrasion que les mélanges équivalents formés par les scories d'acier ▪ La présence de sable dans les mélanges contenant de la dolomite améliore R_a 	
[59]	Mélanges en béton perméable		Méthode des plans d'expérience comportant : <ul style="list-style-type: none"> ▪ 3 tailles de granulats grossiers : 4,75-9,5 mm, 9,5-13,2 mm et 13,2-16 mm ▪ 3 porosité : 15, 20 et 25% ▪ 3 rapports eau-liant : 0,25, 0,30 et 0,35 			x	x	<ul style="list-style-type: none"> ▪ La porosité influe le plus sur R_c, suivie par la taille des granulats puis le rapport eau-liant (pour la même taille des granulats, R_{c,28} diminue d'environ 24% quand la porosité augmente de 15% à 25%, et pour la même porosité, R_{c,28} diminue d'environ 15% quand la taille des granulats augmente de 4,75 mm à 16 mm) ▪ La taille des granulats influe le plus sur la durabilité au gel-dégel, suivie par la porosité puis le rapport eau-liant (pour la même porosité, le nombre de cycle gel-dégel diminue 20 cycles quand la taille des granulats augmente de 4,75 mm à 16 mm, et pour la même taille des granulats, le nombre total de cycle gel-dégel diminue avec l'augmentation de la porosité) 	
Notation : α = albédo ; R _c = résistance à la compression ; R _a = résistance à l'abrasion ; R _{GD} = résistance au gel-dégel ; K = perméabilité ou conductivité hydraulique									

Ref.	Matériaux étudiés		Conditions générales	Propriétés étudiées					Résultats
				α	Colmatage	R _c	R _a	R _{GD}	
[60]	Béton perméable formé par des granulats grossiers (5-9 mm) et contenant des sciures fines de bois (< 2.36 mm)		Addition des sciures à des taux allant 0 à 12%			x			L'addition de 8% de sciures au béton perméable maximise sa R _{c,28} pour atteindre une valeur de 29,13 MPa, qui dépasse celle du mélange témoin (25,13 MPa)
[61]	Mélanges en béton perméable formés par 3 rapports eau-ciment différents (3,2, 4,5 et 5,0) et par des granulats de :	Taille unique (4,75, 10 ou 12,5 mm)				x	x		<ul style="list-style-type: none"> ▪ R_{c,28} diminue avec l'augmentation de la taille des granulats (R_{c,28} diminue, par rapport au mélange à taille de 4,75 mm, de 10-55%, 27-61% et 2-8% pour les mélanges à taille de 10, 12,5 mm et graduée respectivement) ▪ R_c diminue avec l'augmentation du rapport granulats-ciment (les mélanges de rapports 4,5 et 5,0 ont montré une diminution d'environ 9-40% et 34-67% respectivement, par rapport au mélange ayant un rapport de 3,2) ▪ La perte de poids par l'essai de Cantabro après 300 tours, augmente avec la taille des granulats et avec le rapport granulats-ciment (la perte de poids minimale qui vaut 20.2% correspond au mélange de taille 4,75 mm et représentant un rapport granulats-ciment de 3,2. La perte de poids maximale atteint 96,2% pour le mélange de taille 12,5 mm et exprimant un rapport granulats-ciment de 5,0)
		Taille graduée (4,75, 10 et 12,5 mm) de fractions massiques identiques							
[62]	Béton perméable contenant des scories d'acier		Substitution des granulats naturels du basalte (9,5-12,5 mm) par des scories d'acier à 25, 50, 75 et 100%			x	x		<ul style="list-style-type: none"> ▪ L'incorporation de scories d'acier améliore R_{c,28}, surtout à des niveaux de remplacement élevés (R_{c,28} la plus élevée atteint 17,6 MPa pour une substitution complète, alors que la plus faible vaut 13,1 MPa pour le mélange de référence) ▪ Avec des niveaux de remplacement des scories d'acier de 75 et 100%, le degré de résistance, mesuré après 5000 tours, augmente considérablement par rapport aux autres mélanges

Notation : α = albédo ; R_c = résistance à la compression ; R_a = résistance à l'abrasion ; R_{GD} = résistance au gel-dégel ; K = perméabilité ou conductivité hydraulique

Ref.	Matériaux étudiés		Conditions générales	Propriétés étudiées					Résultats
				α	Colmatage	R_c	R_a	R_{GD}	
[63]	Béton perméable traversé par l'eau argileuse		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Séchage dans l'étuve à 50°C pour 24 h après chaque cycle de colmatage ▪ Rinçage après le balayage d'excès d'argile sèche de la surface 		x				<ul style="list-style-type: none"> ▪ L'augmentation de la quantité d'argile dans le volume d'eau qui surmonte l'éprouvette, diminue considérablement le taux d'infiltration effectif ▪ Les cycles de rinçage améliorent considérablement les taux d'infiltration pour toutes les éprouvettes sauf la bentonite (les éprouvettes obstruées par les argiles les moins cohésives ont tendance à se remédier plus facilement)
	Argile de 3 types	Rouge naturelle							
		Kaolin (moins cohésif)							
		Bentonite (plus cohésive)							
[64]	Béton perméable traversé par l'eau argileuse qui contient des quantités connues d'argile de 0, 150, 300 et 450 g		A la fin des essais de perméabilité, les échantillons ont été nettoyés par l'eau pure à haute pression, puis l'essai de perméabilité a été répété avec de l'eau pure pour estimer l'efficacité du nettoyage		x				<ul style="list-style-type: none"> ▪ K diminue avec l'augmentation de la teneur en matériaux argileux (pour l'échantillon non compacté, avec l'inclusion de 150 g de matériaux argileux, K diminue de plus de 85%) ▪ Le nettoyage à haute pression des pores bouchés par des matériaux argileux est capable de restaurer partiellement K ▪ L'efficacité du nettoyage atteint 76% et 93% pour les échantillons compacté et non compacté respectivement (le nettoyage est plus difficile avec les échantillons compactés)
Notation : α = albédo ; R_c = résistance à la compression ; R_a = résistance à l'abrasion ; R_{GD} = résistance au gel-dégel ; K = perméabilité ou conductivité hydraulique									

Annexe 5. Calcul des incertitudes

L'incertitude représente la marge d'erreur associée à une valeur mesurée lors d'une expérience. Elle permet de déterminer l'intervalle dans lequel se trouve la valeur exacte ou la valeur réelle.

Dans le cas où l'expérience est répétée plusieurs fois, on parle d'une incertitude de répétabilité ou aléatoire de type (A), qu'on la note (u_A), donnée par :

$$u_A = \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}} \quad \text{A.1}$$

Avec,

$$\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad \text{A.2}$$

x_i : valeur mesurée

\bar{x} : valeur moyenne

n : nombre de mesures

Pour une mesure unique, l'incertitude est systématique ou liée à l'appareil ou l'outil de mesure. Elle est de type (B), notée (u_B), et donnée sous les deux formes suivantes :

- Pour une lecture sur une échelle graduée :

$$u_B = \frac{1 \text{ graduation}}{2\sqrt{3}} \quad \text{A.3}$$

- Pour un appareil de tolérance (précision) donnée par le producteur :

$$u_B = \frac{\text{tolérance}}{\sqrt{3}} \quad \text{A.4}$$

Par conséquent, pour un essai répété plusieurs fois, la valeur réelle d'une mesure est déterminée par la contribution de deux types d'incertitudes (u_A et u_B). Cette contribution s'appelle incertitude composée, notée (u), avec :

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad \text{A.5}$$

Pour attribuer un niveau de confiance à l'intervalle de mesure d'une variable (\bar{x}), il faut multiplier l'incertitude composée (u) par un facteur d'élargissement (f). Ce produit donne l'incertitude composée élargie (U), avec :

$$U = f u \quad \text{A.6}$$

- Pour $f = 2$, l'intervalle $[\bar{x} - U, \bar{x} + U]$ représente un niveau de confiance de 95%.
- Pour $f = 3$, on parle d'un niveau de confiance de 99%.

La valeur mesurée réelle peut s'écrire sous la forme suivante :

$$X = \bar{x} \pm U \quad \text{A.7}$$

Avec,

X : valeur réelle

\bar{x} : valeur moyenne

U : incertitude composée élargie

Dans ce travail, on s'intéresse aux incertitudes composées élargies, calculées avec un niveau de confiance de 95% ($f = 2$).

En prenant l'exemple d'une variable (x) à calculer et qui dépend de trois variables implicites (a, b et c) engendrant des incertitudes, avec $x = x(a, b, c)$. L'incertitude sur chaque mesure de (x), notée ($u(x_i)$) est donnée par l'expression générale suivante :

$$u(x_i) = \left| \frac{\partial x}{\partial a} (a_i, b_i, c_i) \right| u(a) + \left| \frac{\partial x}{\partial b} (a_i, b_i, c_i) \right| u(b) + \left| \frac{\partial x}{\partial c} (a_i, b_i, c_i) \right| u(c) \quad \text{A.8}$$

Avec,

a_i, b_i et c_i : valeurs qui correspondent à la valeur x_i

$u(a), u(b)$ et $u(c)$: incertitudes sur les mesures de a, b et c , respectivement

Il est à noter que l'expression générale du calcul de l'incertitude reste toujours valide pour un nombre différent de variables implicites.

L'incertitude sur la variable (x) est donc :

$$u(x) = \max (u(x_i)) \quad \text{A.9}$$

La balance de type Sartorius AG (précision ± 0.01 g) a été utilisée pour effectuer les pesées, afin de déterminer les propriétés suivantes :

- Porosité ouverte (φ_o),
- Masse volumique apparente (ρ),
- Teneur en eau capillaire (W_{cap}),
- Coefficient d'absorption capillaire (A_{cap}),
- Conductivité hydraulique à charge constante (K).

Un chronomètre d'une seconde de précision, a été employé pour mesurer le coefficient d'absorption capillaire (A_{cap}) et la conductivité hydraulique (K).

Pour le coefficient d'absorption capillaire, il a été vu qu'une durée de 30 secondes était suffisante pour retirer le pavé du bac, essuyer sa face inférieure et le peser.

La durée totale l'essai de conductivité hydraulique à charge constante, était inférieure à 60 secondes. Dans cet essai, le récipient qui permet de récupérer l'eau sortante du pavé, a été rapidement déplacé loin de l'entonnoir lorsque le chronomètre sonne pour la première fois.

Par ailleurs, l'essai de conductivité hydraulique à charge variable a duré pour 24 heures. Dans ce cadre, une précision de 3 minutes a été considérée suffisante pour effectuer la mesure de la hauteur du niveau d'eau dans le tube chaque jour.

Une règle graduée au mm, a été servie pour mesurer la charge hydraulique finale dans l'essai de conductivité hydraulique à charge variable.

La tolérance du spectroradiomètre CS-1000 utilisé pour mesurer l'albédo (α) est d'ordre 4% de la valeur d'émissivité mesurée.

La précision du lambda-mètre servi pour mesurer de la conductivité thermique (k) vaut 1.5%.

Les mesures de la température de surface (T_s) ont été réalisées avec une caméra thermique de type « Testo 872 » ayant une précision de 2°C ou 2% de la valeur détectée. Dans ce cadre, et pour s'assurer que la valeur mesurée se trouve dans l'intervalle de confiance, il faudra prendre la valeur maximale entre les deux incertitudes systématiques engendrées par chaque cas.

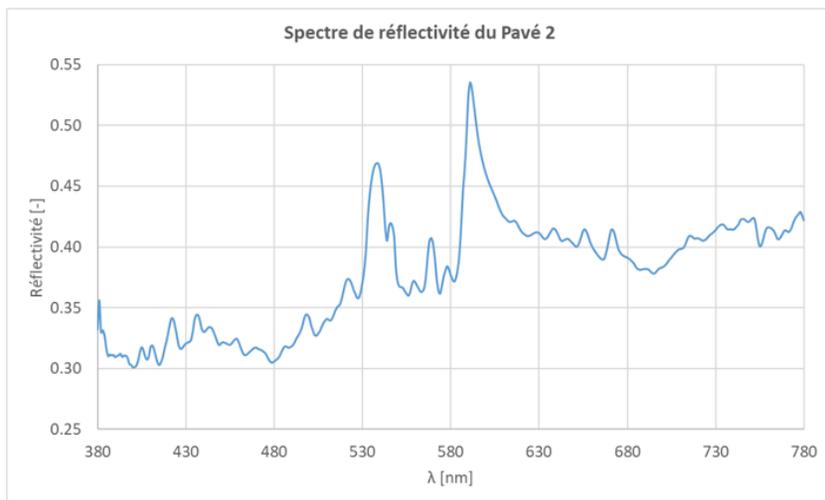
Le Tableau 1 illustre la contribution des incertitudes systématiques sur les propriétés physiques évaluées.

Les incertitudes de la conductivité thermique (k) et la masse volumique (ρ) interviennent dans le calcul des incertitudes de la chaleur spécifique (C_p). De plus, ces trois propriétés (k , ρ et C_p) contribuent directement dans le calcul de la marge d'erreur de la diffusivité thermique (D_{th}). Le calcul des incertitudes de C_p et D_{th} est effectué en utilisant l'équation A.8.

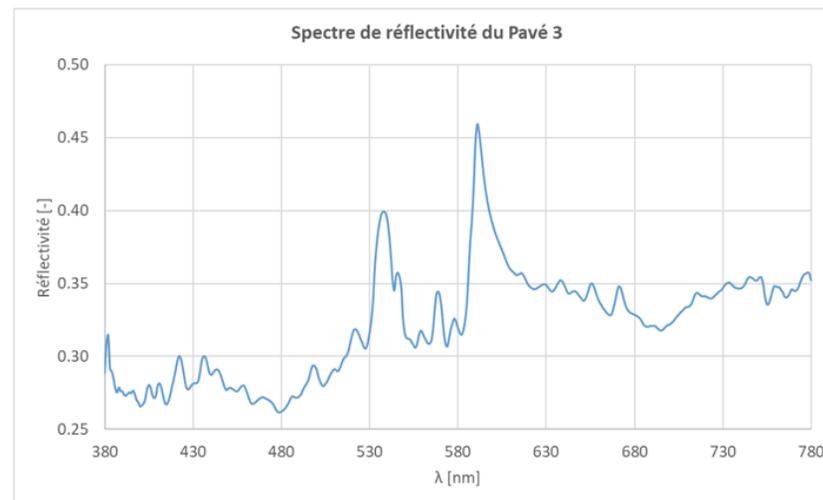
Tableau 1. Contribution des incertitudes systématiques sur les propriétés physiques

Propriété mesurée		Variable mesurée engendrant une incertitude systématique		Incertitude systématique sur la variable	
Nom	Symbole	Nom	Symbole	Valeur	Unité
Porosité ouverte	φ_o	Masse sèche	m_s	$0.01/\sqrt{3}$	g
		Masse saturée dans l'air	$m_{sat,a}$		
		Masse saturée dans l'eau	$m_{sat,w}$		
Masse volumique apparente	ρ	Masse sèche	m_s	$0.01/\sqrt{3}$	g
		Masse saturée dans l'air	$m_{sat,a}$		
		Masse saturée dans l'eau	$m_{sat,w}$		
Teneur en eau capillaire	W_{cap}	Masse d'eau absorbée finale par capillarité	$m_{w,f}$	$0.01/\sqrt{3}$	g
Coefficient d'absorption capillaire	A_{cap}	Masse d'eau absorbée dans la 1 ^{ère} phase d'absorption	-	$0.01/\sqrt{3}$	g
		Durée de la 1 ^{ère} phase d'absorption	t	30	s
Conductivité hydraulique à charge constante	K	Masse d'eau récupérée	m_{rec}	$0.01/\sqrt{3}$	g
		Durée de l'essai	t	1	s
Conductivité hydraulique à charge variable	K	Charge hydraulique finale	h_2	$1/(2\sqrt{3})$	mm
		Durée de l'essai	t	3	minutes
Albédo	α	émissivité du pavé	-	$4\%/\sqrt{3}$ de la valeur mesurée	-
Conductivité thermique	k	conductivité thermique	k	$1.5\%/\sqrt{3}$ de la valeur mesurée	$W.m^{-1}.K^{-1}$
Température de surface	T_s	Température de surface	T_s	$\max(2\%/\sqrt{3}$ de la valeur mesurée, $2/\sqrt{3}$)	°C

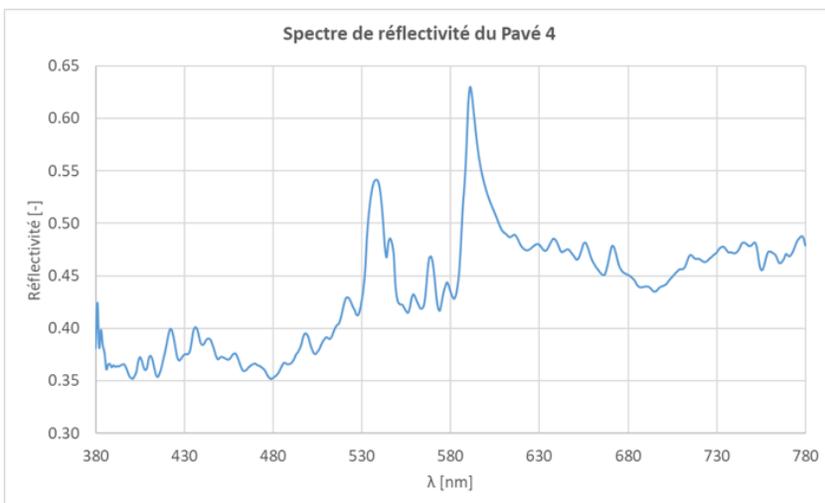
Annexe 6. Spectres de réflectivité des pavés



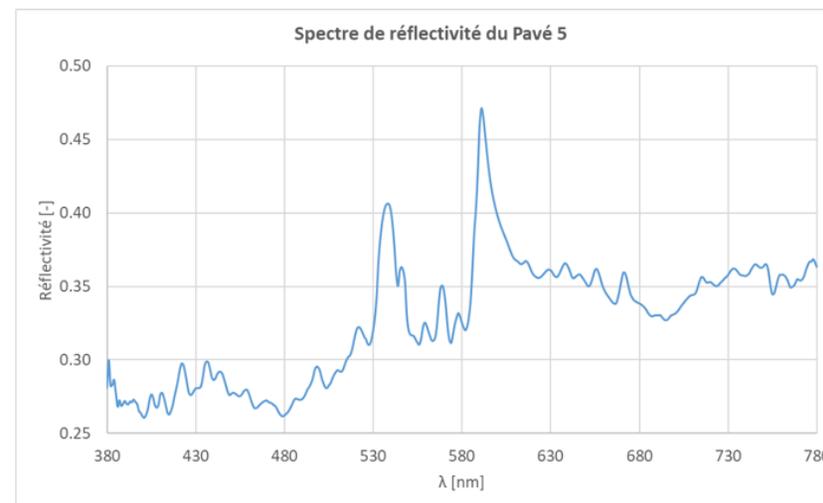
Pavé 2



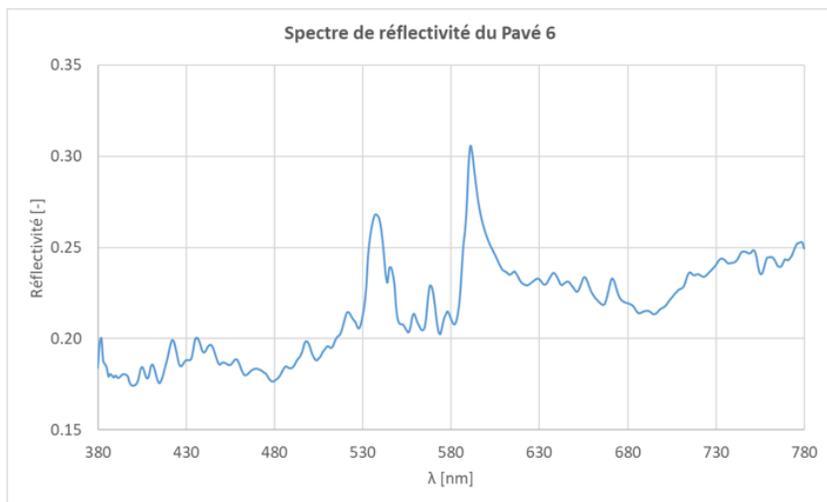
Pavé 3



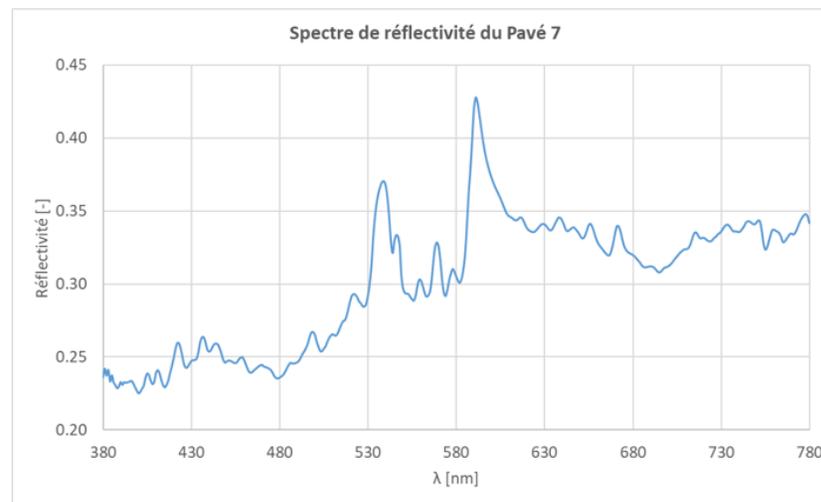
Pavé 4



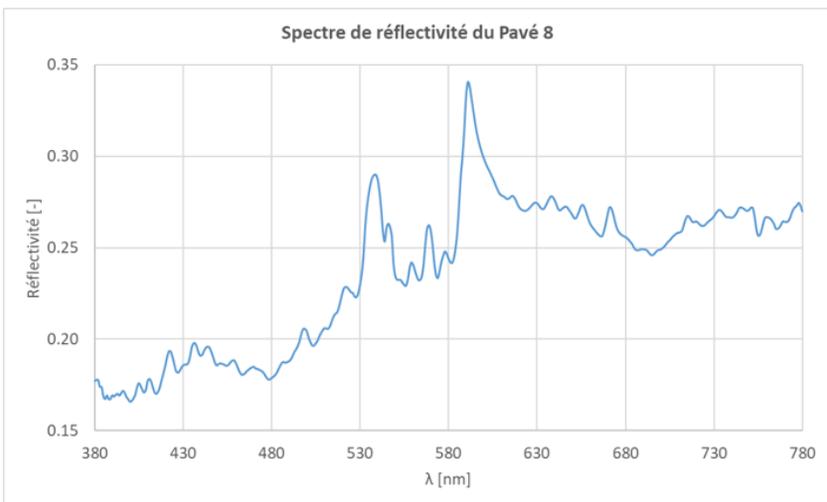
Pavé 5



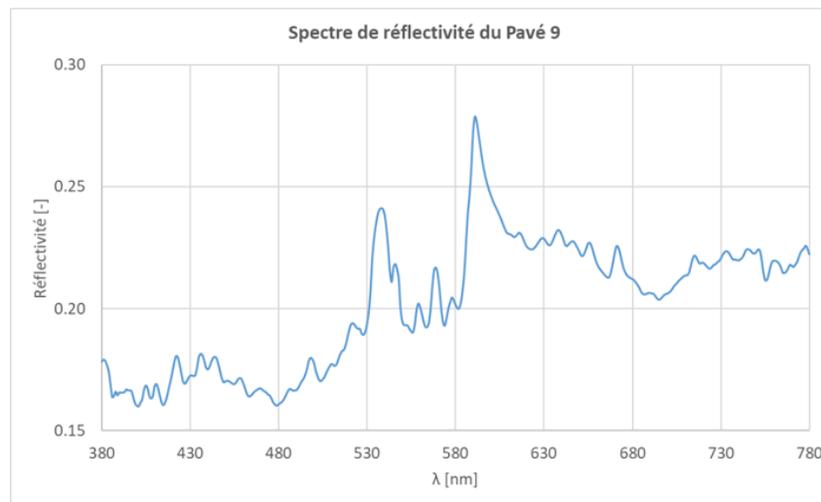
Pavé 6



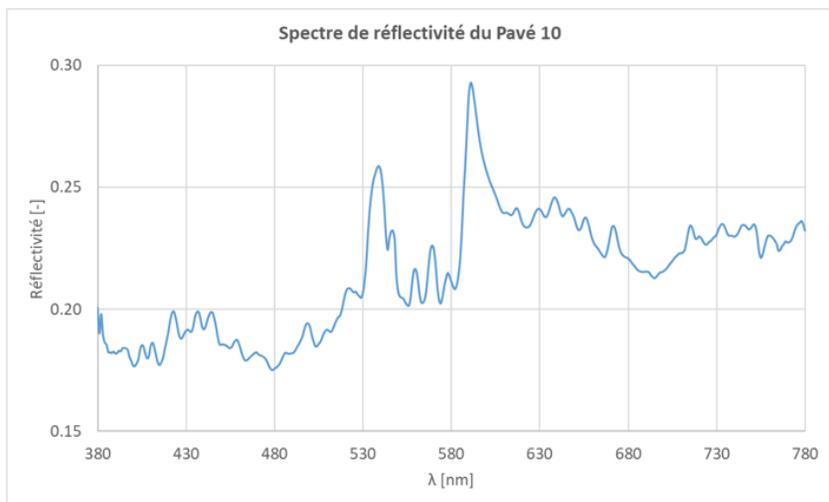
Pavé 7



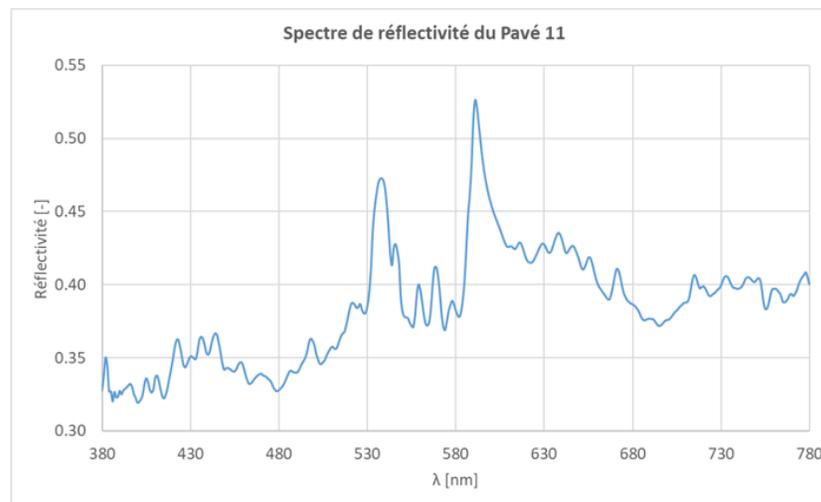
Pavé 8



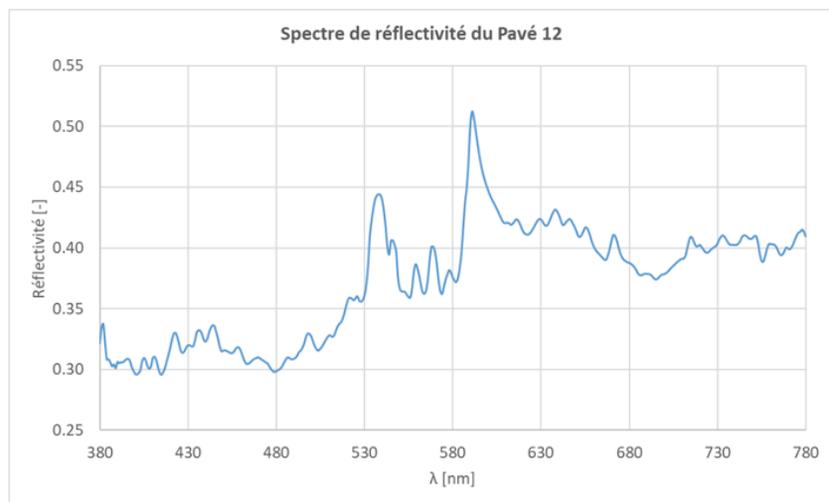
Pavé 9



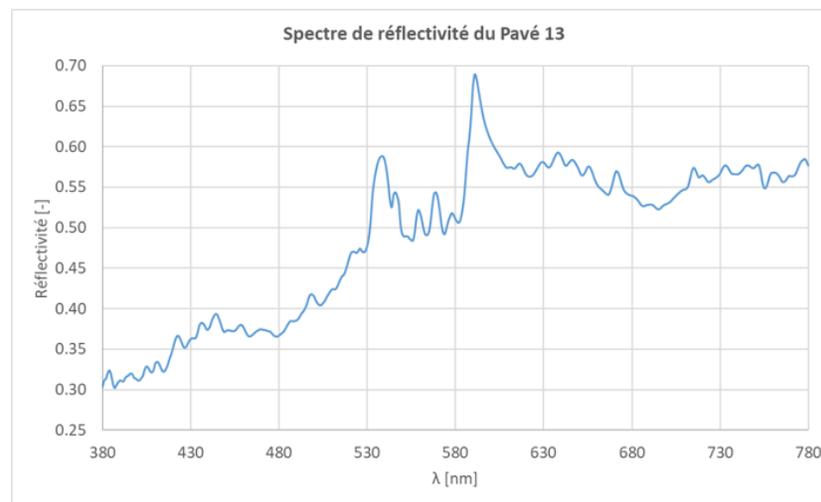
Pavé 10



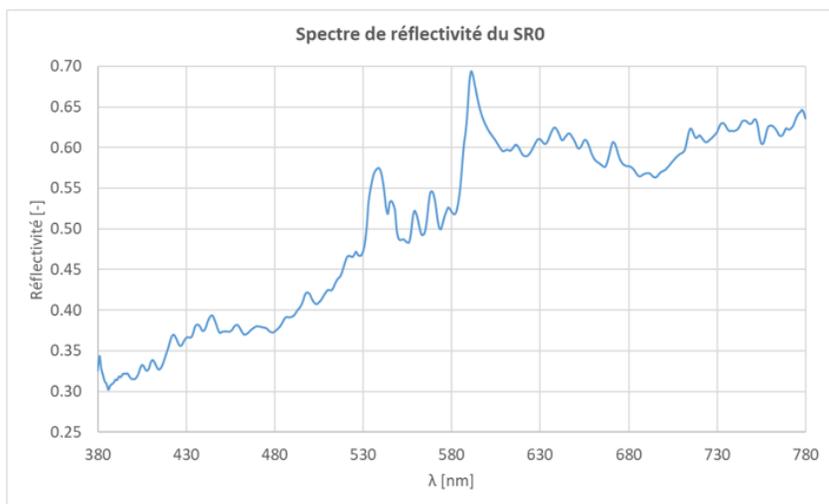
Pavé 11



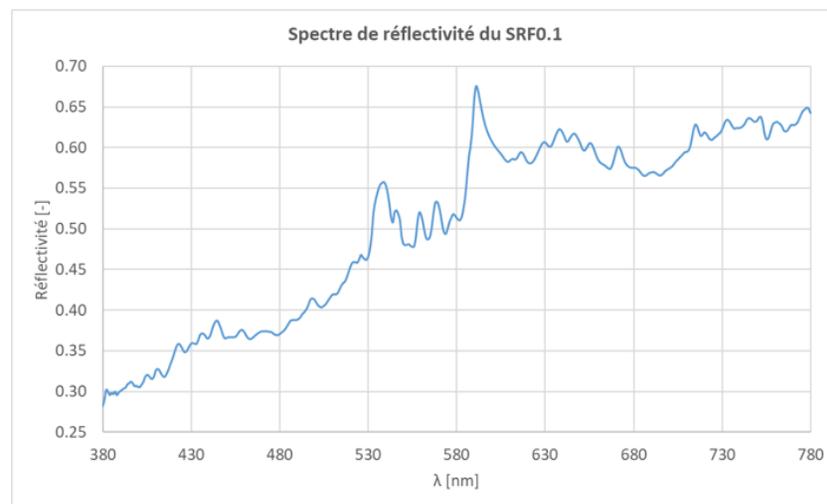
Pavé 12



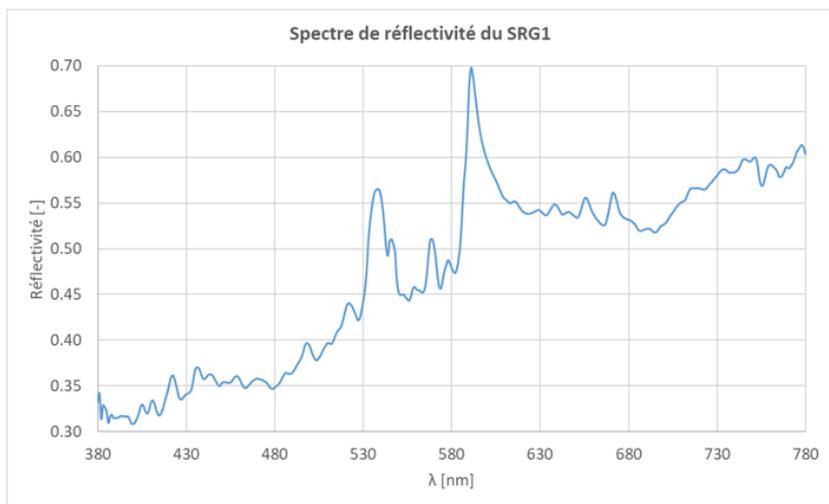
Pavé 13



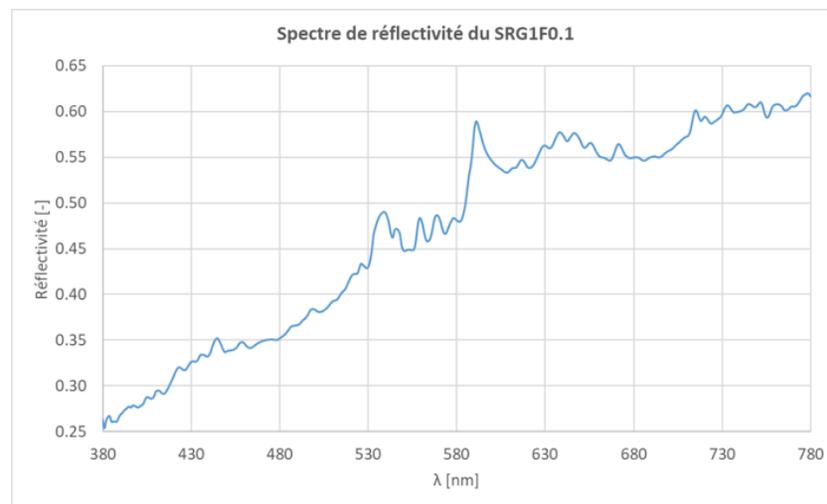
SRO



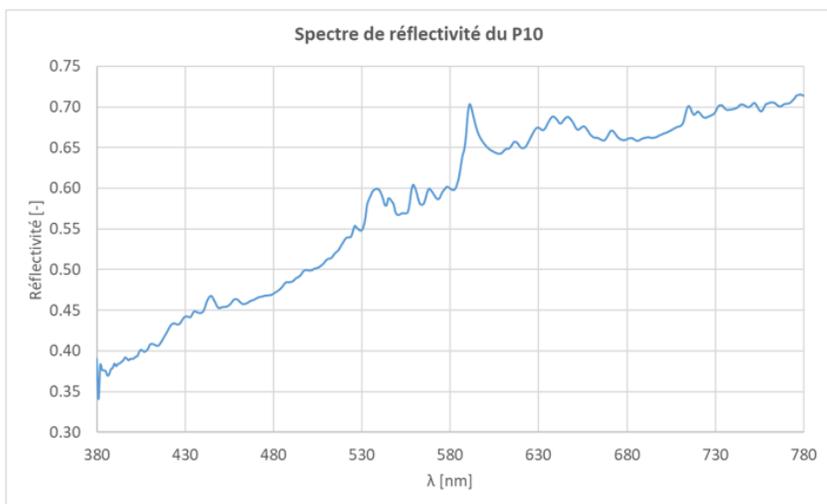
SRF0.1



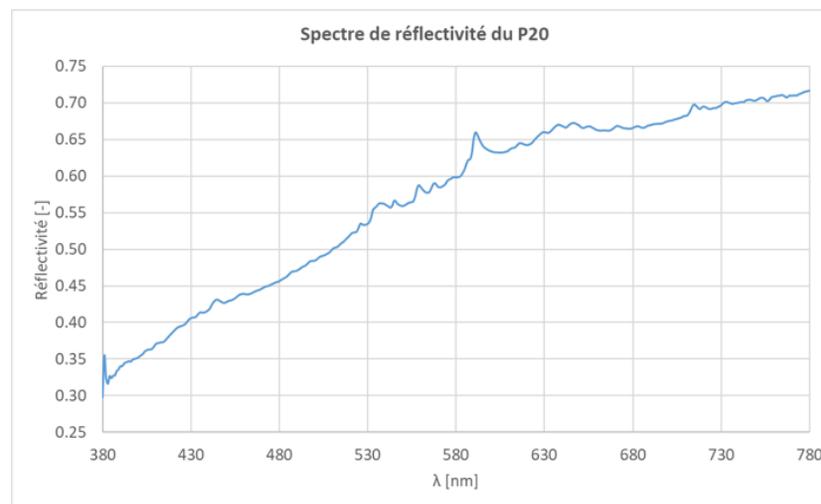
SRG1



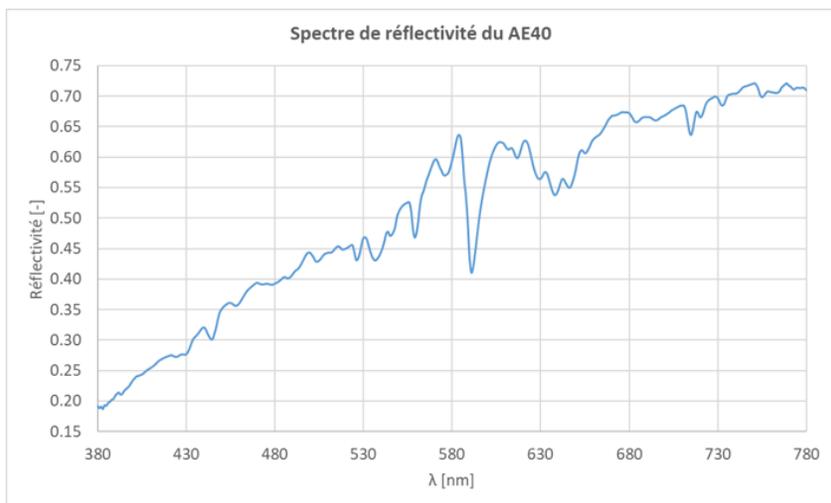
SRG1F0.1



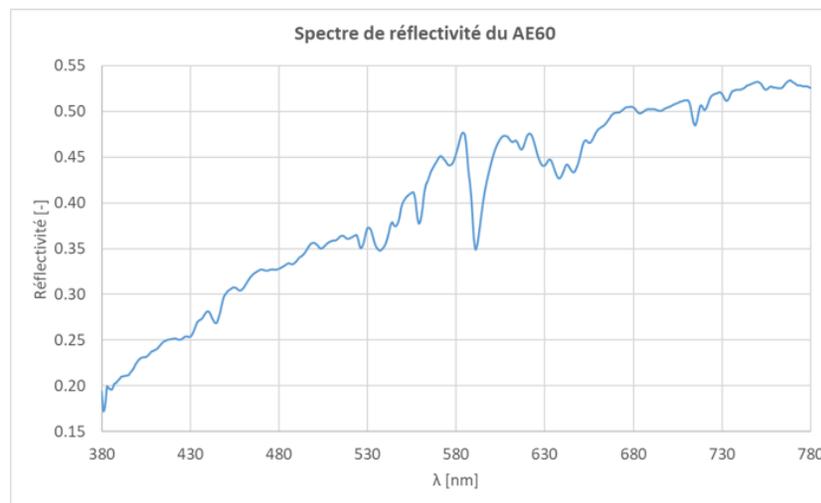
P10



P20



AE40



AE60

