



**HAL**  
open science

# Étude des interactions entre le comportement thermique de revêtements de sol et le climat urbain à micro-échelle par des expérimentations in situ, modélisation et simulation

Pierre Bénilde Randriamanampisoa

► **To cite this version:**

Pierre Bénilde Randriamanampisoa. Étude des interactions entre le comportement thermique de revêtements de sol et le climat urbain à micro-échelle par des expérimentations in situ, modélisation et simulation. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université d'Antananarivo. Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA) (Ambohitsaina), 2023. Français. NNT: . tel-04318720

**HAL Id: tel-04318720**

<https://univ-cotedazur.hal.science/tel-04318720v1>

Submitted on 1 Dec 2023

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

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



UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO



ÉCOLE DOCTORALE : INGÉNIERIE ET GÉOSCIENCES

SPÉCIALITÉ : Géosciences, Technologie des Poudres  
divisés et Écobâtiments

\*\*\*\*\*

THÈSE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE  
**DOCTORAT**

Présentée par :

**RANDRIAMANAMPISOA Pierre Bénilde**

**ÉTUDE DES INTERACTIONS ENTRE LE  
COMPORTEMENT THERMIQUE DE REVÊTEMENTS  
DE SOL ET LE CLIMAT URBAIN À MICRO-  
ÉCHELLE PAR DES EXPÉRIMENTATIONS IN SITU,  
MODÉLISATION ET SIMULATION**

Directeur de thèse : RANAIVO RABEHAJA née RAHELIARILALAO Bienvenue,  
Professeur Titulaire.



UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO



ÉCOLE DOCTORALE : INGÉNIERIE ET GÉOSCIENCES  
SPÉCIALITÉ : Géosciences, Technologie des Poudres  
divisés et Écobâtiments

\*\*\*\*\*

THÈSE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE  
**DOCTORAT**

Présentée par :

**RANDRIAMANAMPISOA Pierre Bénilde**

le 11 août 2023

**ÉTUDE DES INTERACTIONS ENTRE LE  
COMPORTEMENT THERMIQUE DE REVÊTEMENTS  
DE SOL ET LE CLIMAT URBAIN À MICRO-  
ÉCHELLE PAR DES EXPÉRIMENTATIONS IN SITU,  
MODÉLISATION ET SIMULATION**

Membres de jury

**Président** : RASOLOMANANA Eddy Harilala, Professeur Titulaire

**Directeur de thèse** : RANAIVO RABEHAJA née RAHELIARILALAO Bienvenue,  
Professeur Titulaire

**Rapporteur interne** : RAJAONARISON Eddie Franck, Professeur

**Rapporteur externe** : RANDRIANA Nambinina Richard Fortuné, Professeur Titulaire

**Examineurs** : RAMBININTSOA Tahina, Professeur

: RAVALISON Andrianaivomalala, Professeur

# REMERCIEMENTS

Cette thèse n'aurait pu avoir lieu sans l'amour et la grâce de DIEU. Je tiens donc à Lui remercier pour sa bonté envers moi en me donnant la force, le courage, la santé et tout ce qu'il m'a donné afin de mener à terme cette thèse.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur RASOLOMANANA Eddy Harilala, Professeur Titulaire, Directeur de l'école doctorale Ingénierie et Géoscience (INGE) d'avoir bien voulu m'accueillir au sein de ladite école et finalement de m'avoir autorisé à soutenir publiquement ma thèse. Je tiens également à le remercier d'honorer ma soutenance par sa présence et surtout d'avoir accepté de présider le jury.

J'adresse mes vifs remerciements à mon directeur de thèse, Madame RANAIVO RABEHAJA née RAHELIARILALAO Bienvenue, Professeur Titulaire, des efforts qu'elle a déployés tout au long de cette thèse. Les échanges ont été fructueux, les conseils sont si précieux, mais n'ont pas manqué les coups de pression instantanés, les innombrables recommandations parachutées dans les dernières minutes, qui m'ont été si durs au début, n'ont fait que renforcer mon endurance morale et mentale.

Mes sincères remerciements sont aussi adressés aux rapporteurs : Monsieur RAJAONARISON Eddie Franck, Professeur et Monsieur RANDRIANA Nambinina Richard Fortuné, Professeur Titulaire, qui ont accepté de rapporter objectivement cette thèse.

Aux examinateurs, à la personne de : RAMBININTSOA Tahina, Professeur, et de Monsieur RAVALISON Andrianaivomalala, Professeur, qui ont bien voulu évaluer mes travaux de recherche.

Un remerciement spécial est dédié à Monsieur Yves Jannot, Chercheur à l'Université de Lorraine et au Laboratoire Énergies & Mécanique Théorique et Appliquée (LEMETA), qui m'a aidé pendant la réalisation de dispositif pour la mesure de propriétés thermiques de matériaux.

Enfin, je ne saurais comment exprimer ma profonde gratitude à mes parents et ma fiancée qui m'ont soutenu moralement, toute ma famille, mes amis et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de cette thèse.

# DÉCLARATION SUR L'HONNEUR

Je soussigné, **RANDRIAMANAMPISOA Pierre Bénilde**, déclare solennellement ce qui suit à propos de ma thèse de doctorat intitulée " **Étude des interactions entre le comportement thermique de revêtements de sol et le climat urbain à micro-échelle par des expérimentations in situ, modélisation et simulation** "

- Je certifie que le travail présenté dans cette thèse est le fruit de mes propres recherches et de mes propres efforts. Toutes les sources d'information et de données utilisées ont été correctement citées et référencées.
- Je déclare que je n'ai pas utilisé de travaux ou d'idées d'autres personnes sans attribution appropriée. Toutes les références, citations et sources utilisées ont été clairement indiquées dans cette thèse.
- Je reconnais avoir suivi les règles éthiques et les normes académiques les plus élevées tout au long de la réalisation de cette thèse. J'ai respecté les principes de l'intégrité intellectuelle et de la recherche honnête.
- Je comprends les conséquences de la fraude académique et de la violation des règles de conduite éthique dans le milieu universitaire. Je suis prêt à assumer la responsabilité de mes actions et à faire face à toute sanction appropriée en cas de violation de l'honneur et de l'intégrité académique.
- En signant cette déclaration d'honneur, je m'engage à défendre et à maintenir les valeurs de l'honnêteté intellectuelle et de l'intégrité dans la recherche et l'écriture académiques.

Je comprends que cette déclaration d'honneur fait partie intégrante de ma thèse de doctorat et qu'elle sera conservée dans les archives de l'institution universitaire.

Fait à Antananarivo, le 09/09/2023

RANDRIAMANAMPISOA Pierre Bénilde

# SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

LISTE DES ABRÉVIATIONS

LISTE DES NOTATIONS

LETTRES GRECQUES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GÉNÉRALE

PARTIE 1 : RAPPELS THÉORIQUES ET ÉTAT DES LIEUX

CHAPITRE I : LES TROIS MODES DE TRANSFERT DE CHALEUR

CHAPITRE II : PROPRIÉTÉS RADIATIVES ET CONDUCTIVES DES  
REVÊTEMENTS DE SOL EXTÉRIEURS

CHAPITRE III : CLIMATOLOGIE URBAINE

CHAPITRE IV : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE DES MÉTHODES UTILISÉES  
POUR L'ÉTUDE DE L'ICU INFLUENCÉ PAR LES REVÊTEMENTS DE SOL

PARTIE 2 : EXPÉRIMENTATION ET SIMULATION NUMÉRIQUE

CHAPITRE V : MATÉRIELS ET MÉTHODE DE DÉTERMINATION DES  
PROPRIÉTÉS THERMIQUES ET RADIATIVES DE PAVAGES

CHAPITRES VI : EXPÉRIMENTATION IN SITU

CHAPITRES VII : RÉSULTATS DE L'EXPÉRIMENTATION

CHAPITRES VIII : OUTIL DE SIMULATION

CHAPITRE IX : APPLICATION DE L'OUTIL AU CAS DES MILIEUX URBAINS DE  
MADAGASCAR

CONCLUSION GÉNÉRALE

LISTE DES PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXE

# LISTE DES ABRÉVIATIONS

ASHRAE: American society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers

ASTM: American Society for Testing and Materials

ICU : Ilot de Chaleur Urbain

ISO : International Standard Organisation

MDDEP : Ministère du développement durable et des parcs (Québec)

ML: Machine Learning

NASA: National Aeronautics and Space Administration

ONU : Organisation des Nations Unies

PB : Pavés de Béton

PDP : Pavés de Déchets Plastiques

PET : Physiological Equivalent Temperature (Température physiologique équivalente)

PQC : Pavement Quality Concrete

PT : Pavés de Travertin

PTC : Pavés en Terre Cuite

PMV : Predict Mean Vote (vote moyen prévisible)

PPD : Predicted Percentage Dissatisfied (pourcentage prévisible d'insatisfait)

RSE : Revêtements de Sol Extérieur

SSR : Somme des carrés du modèle

SST : Somme totale des carrés des écarts

SSE : Somme résiduelle des carrés

USEPA : United States Environmental Protection Agency

UTCI: Universal Thermal Climate Index

WRF : Weather Research and Forecasting

# LISTE DES NOTATIONS

Notations	Signification	Unité
a	Diffusivité thermique	m <sup>2</sup> /s
a <sub>s</sub>	Diffusivité thermique de l'éprouvette	m <sup>2</sup> /s
a <sub>w</sub>	Diffusivité thermique du fil résistif	m <sup>2</sup> /s
b	Effusivité thermique	J.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> .s <sup>-1/2</sup>
C	Vitesse de la lumière	m/s
C <sub>p</sub>	Chaleur massique	J/kg K
C <sub>ps</sub>	Chaleur massique de l'éprouvette	J/kg K
C <sub>pt</sub>	Chaleur massique du thermocouple	J/kg K
C <sub>pw</sub>	Chaleur massique du fil résistif	J/kg K
D	Rayonnement diffus	W/ m <sup>2</sup>
e	Épaisseur	m
E <sub>m,lent</sub>	Chaleur latente	J
E <sub>msens</sub>	Chaleur sensible	J
E <sub>λ,T</sub>	Emittance monochromatique du corps noir	W/ m <sup>2</sup>
ET	Taux d'évaporation	g/m <sup>2</sup> /h
f	Facteur d'amortissement	%
G <sub>th</sub>	Conductance thermique	W/K
h	Constante de Planck	J s
	Hauteur du soleil	°C
H	Enthalpie	J/kg
HL	Heure Légale	h
h <sub>c</sub>	Coefficient de convection	W/m <sup>2</sup> /K
HR	Humidité relative	%
I	Rayonnement solaire direct	W/m <sup>2</sup>
	Intensité du courant	A
I <sub>0</sub>	Fonctions de Bessel	-
I <sub>1</sub>	Fonctions de Bessel	-
K <sub>0</sub>	Fonctions de Bessel	-
K <sub>1</sub>	Fonctions de Bessel	-
k	Constante de Boltzmann	J/K



L	Longueur	m
m	Masse	kg
M	Métabolisme du corps	W/m <sup>2</sup>
N	Nébulosité	octas
p	Variable de la place	-
P	Population	-
q	Humidité spécifique	%
Q	Quantité de chaleur	J
Q <sub>F</sub>	Flux d'origine anthropique	W/m <sup>2</sup>
Q <sub>H</sub>	Flux de chaleur sensible	W/m <sup>2</sup>
Q <sub>L</sub>	flux de chaleur latente	W/m <sup>2</sup>
Q <sub>R</sub>	Rayonnement net	W/m <sup>2</sup>
r	Rayon	m
r <sub>w</sub>	Rayon du fil résistif	m
R <sup>2</sup>	Coefficient de performance	%
R <sub>C</sub>	Résistance de contact	K/W
R <sub>th</sub>	Résistance thermique	K/W
R <sub>A</sub>	Rayonnement atmosphérique	W/m <sup>2</sup>
R <sub>G</sub>	Rayonnement solaire global	W/m <sup>2</sup>
R <sub>T</sub>	Rayonnement terrestre	W/m <sup>2</sup>
S	Surface	m <sup>2</sup>
	Stockage de l'énergie dans le corps humain	W/m <sup>2</sup>
t	Temps	s
T	Température	K
T <sub>ex</sub>	Température expérimentale	K
T <sub>mod</sub>	Température modélisée	K
U	Tension du courant	V
V	Volume	m <sup>3</sup>
V <sub>V</sub>	Vitesse du vent	m/s
x	Abscisse	m
X	Variable indépendante	-
M <sub>λ,T</sub>	Emittance monochromatique	W/ m <sup>2</sup>
y	Variable réponse	-

# LETTRES GRECQUES

Notations	Signification	Unité
$\alpha$	Facteur d'absorption	-
$\beta$	Coefficient inconnu	-
$\delta$	Profondeur de pénétration	m
$\delta Q_S$	Variation de quantité de chaleur stockée	W/m <sup>2</sup>
$\delta Q_A$	Flux de chaleur advectif	W/m <sup>2</sup>
$\varepsilon$	Facteur d'émission	-
	Erreur	-
$\varphi$	Densité du flux	W/m <sup>2</sup>
$\varphi_s$	Flux de la source interne	W/m
$\varphi_w$	Puissance dissipée par le fil résistif	W/m <sup>2</sup>
$\Phi$	Flux thermique	w
$\lambda$	Conductivité thermique	W/m K
	Longueur d'onde	m
$\lambda_s$	Conductivité thermique de l'éprouvette	W/m K
$\lambda_w$	Conductivité thermique du fil résistif	W/m K
$\theta$	Transformée de Laplace de la température	K
$\theta_d$	Transformée de Laplace de la température à une distance d du fil résistif	K
$\rho$	Masse volumique	kg/ m <sup>3</sup>
	Albédo, Facteur de réflexion	-
$\rho_s$	Masse volumique de l'éprouvette	kg/ m <sup>3</sup>
$\rho_w$	Masse volumique du fil résistif	kg/ m <sup>3</sup>
$\sigma$	Constante de Stefan	W m <sup>-2</sup> K <sup>-4</sup>
$\tau$	Facteur de transmission	-
$\omega$	Pulsation	rad/s

# LISTE DES FIGURES

Figure 1: Conduction dans une paroi .....	6
Figure 2: Conduction dans un cylindre creux .....	7
Figure 3: Mur d'épaisseur $e$ .....	9
Figure 4: Cylindre creux .....	10
Figure 5: Schéma de deux solides avec résistance contact et schéma électrique équivalent ...	11
Figure 6: Association en série de matrices quadripolaires .....	11
Figure 7: Association en parallèle de matrices quadripolaires.....	12
Figure 8: Association en cascade de matrices quadripolaires .....	12
Figure 9: Milieu semi-infini .....	13
Figure 10: Réception du rayonnement par un corps.....	18
Figure 11: a) Réflexion spéculaire et b) réflexion diffuse .....	23
Figure 12: Albédomètre .....	23
Figure 13: Pyranomètre .....	24
Figure 14: Radiomètre solaire .....	24
Figure 15: Albédo de quelques couleurs .....	26
Figure 16: Emissiomètre .....	27
Figure 17: Pyromètre infrarouge .....	27
Figure 18: Caméra thermique.....	28
Figure 19: Les différentes techniques de stockage de l'énergie thermique .....	35
Figure 20: Relation Température/Enthalpie .....	36
Figure 21: Représentation schématique de la couche limite urbaine (CLU) à méso-échelle (a), à l'échelle locale (b) et à micro-échelle (c) .....	39
Figure 22: Bilan énergétique pour une zone urbaine .....	40
Figure 23: Balance thermique à la surface de revêtement de sol .....	44
Figure 24: Carte représentant les $T_{min}$ en Décembre de la zone urbaine d'Antananarivo.....	46
Figure 25: Bilan thermique à la surface des arbres .....	48
Figure 26: Divers albédos de l'environnement urbain.....	49
Figure 27: Morphologie de la ville.....	50
Figure 28: Relation entre l'intensité maximale de l'ICU et la population pour l'Europe et l'Amérique du Nord .....	51
Figure 29: Classification des valeurs de PMV selon neuf échelles de confort .....	54
Figure 30: Variation du PPD en fonction du PMV .....	54

Figure 31: Niveau de stress thermique selon les valeurs de l'UTCI.....	56
Figure 32: Échantillons testés par Hailu et al. (2020) .....	59
Figure 33: Vue générale des matériaux testés par Rositsa et al.(2018).....	60
Figure 34: Schéma des expériences pour la détermination des caractéristiques thermiques des matériaux .....	62
Figure 35: Les revêtements de sol testés par Tina (2013).....	63
Figure 36: Albédomètre CMA 6 .....	64
Figure 37: Matériaux testés par Giuseppe et al. (2018)a) laboratoire b) in situ.....	65
Figure 38: Vue de près de la couche de revêtement au-dessus du mélange d'asphalte.....	65
Figure 39: Les 93 matériaux testés par Doulos et al. (2004).....	66
Figure 40: Différences de températures de surface d'une série de matériaux.....	67
Figure 41: système de test de l'asphalte en laboratoire.....	68
Figure 42: Modèle 3D créé à l'aide d'ENVI-met.....	69
Figure 43: Éprouvettes d'asphalte pigmentés .....	71
Figure 44: Mesure de conditions climatiques avec un dispositif mobile .....	73
Figure 45: Étapes de l'expérimentation et la simulation .....	75
Figure 46: Éprouvettes destinées à la mesure de conductivité thermique.....	77
Figure 47: Schéma de la coupe de la méthode du fil chaud a) vue de face b) vue de haut .....	78
Figure 48: Schéma des transferts autour du fil chaud .....	78
Figure 49: Schéma récapitulatif de l'estimation de paramètres .....	82
Figure 50: Fil résistif Nickel-Chrome 80/20 .....	84
Figure 51: Alimentation stabilisée .....	85
Figure 52: Voltmètre-Ampèremètre.....	86
Figure 53: Thermocouple DH-1-24.....	86
Figure 54: Système d'acquisition de données a) carte Arduino b) module MAX 6675 c) module micro-SD .....	87
Figure 55: Vue schématique du dispositif.....	88
Figure 56: Photo prise pendant l'expérimentation sur la mesure de la conductivité thermique .....	89
Figure 57: Organigramme pour l'estimation de $\lambda_s$ , $\rho C_p$ s et $R_c$ à partir des données expérimentales.....	90
Figure 58: Thermogramme expérimental.....	91
Figure 59: Interface destinée à insérer les conditions expérimentales .....	92
Figure 60: Figure 33: Conductivité thermique estimée par la norme .....	92

Figure 61: Thermogrammes expérimental, modélisé et résidu .....	93
Figure 62: Sensibilités réduites de la température par rapport à la conductivité thermique, la capacité thermique estimées et la résistance de contact. ....	94
Figure 63: Interface pour afficher les valeurs estimées.....	95
Figure 64: Image JPEG de pavés de déchets plastiques et le papier blanc .....	96
Figure 65: Fenêtre de logiciel Mesurim 2 .....	97
Figure 66: Image satellite du site .....	98
Figure 67: Température journalière moyenne mensuelle.....	99
Figure 68: Précipitation moyenne mensuelle .....	100
<i>Figure 69: Humidité relative journalière moyenne mensuelle .....</i>	<i>100</i>
Figure 70: Irradiation solaire journalière moyenne mensuelle.....	101
Figure 71: Vitesse moyenne mensuelle du vent d'Antananarivo.....	101
Figure 72: Structure de pavage.....	104
Figure 73: Diagramme de mise en œuvre de pavage .....	105
Figure 74: Disposition de pavages .....	106
Figure 75: Capteur de température ambiante et d'humidité DHT11 .....	108
Figure 76: Sondes de température DS18B20. ....	109
Figure 77: (a) Module micro-SD ; (b) Module RTC ; (c) Carte Arduino MEGA. ....	110
Figure 78: Mini Station Météo SM-018 .....	110
Figure 79: Installation de la SM 018 sur la plate-forme.....	111
Figure 80: Calibration du capteur DS18B20.....	112
Figure 81: Installation du capteur DS18B20.....	113
Figure 82: Installation du DHT11 .....	114
Figure 83: Variation journalière de l'albédo de chaque pavage.....	118
Figure 84: Variation journalière des températures de surface de pavés le 13 août 2022 .....	120
Figure 85: Variation journalière des températures de surface de pavages le 18 décembre 2022. ....	120
Figure 86: Variation de températures de surface et températures de l'air à 1 m au-dessus de chaque pavage durant la première série d'expérimentation .....	121
Figure 87: Variation de températures de surface et températures de l'air à 1 m au-dessus de chaque pavage durant la deuxième série d'expérimentation. ....	123
Figure 88: Influence du rayonnement solaire et la vitesse du vent sur la température de l'air à 1 m au-dessus de PDP en hiver .....	124

Figure 89: Influence du rayonnement solaire et la vitesse du vent sur la température de l'air à 1 m au-dessus de PTC en hiver .....	125
Figure 90: Influence du rayonnement solaire et la vitesse du vent sur la température de l'air à 1 m au-dessus de PT en hiver.....	125
Figure 91: Influence du rayonnement solaire et la vitesse du vent sur la température de l'air à 1 m au-dessus de PB en hiver.....	126
Figure 92: Influence du rayonnement solaire et la vitesse du vent sur la température de l'air à 1 m au-dessus de PDP en été.....	127
Figure 93: Influence du rayonnement solaire et la vitesse du vent sur la température de l'air à 1 m au-dessus de PTC en été.....	128
Figure 94: Influence du rayonnement solaire et la vitesse du vent sur la température de l'air à 1 m au-dessus de PT en été .....	128
Figure 95: Influence du rayonnement solaire et la vitesse du vent sur la température de l'air à 1 m au-dessus de PB en été .....	129
Figure 96: Influence du rayonnement solaire et de l'humidité relative sur la température de l'air à 1 m au-dessus de PDP .....	130
Figure 97: Influence du rayonnement solaire et l'humidité relative sur la température de l'air à 1 m au-dessus de PTC .....	130
Figure 98: Influence du rayonnement solaire et l'humidité relative sur la température de l'air à 1 m au-dessus de PT.....	131
Figure 99: Influence du rayonnement solaire et l'humidité relative sur la température de l'air à 1 m au-dessus de PB.....	131
Figure 100: Influence du rayonnement solaire et de l'humidité relative sur la température de l'air à 1 m au-dessus de PDP .....	132
Figure 101: Influence du rayonnement solaire et l'humidité relative sur la température de l'air à 1 m au-dessus de PTC .....	133
Figure 102: Influence du rayonnement solaire et l'humidité relative sur la température de l'air à 1 m au-dessus de PT .....	133
Figure 103: Influence du rayonnement solaire et l'humidité relative sur la température de l'air à 1 m au-dessus de PB.....	134
Figure 104: Domaines d'application Machine Learning.....	140
Figure 105: Différentes étapes de la modélisation .....	141
Figure 106: Feuille Excel de Dataset .....	142
Figure 107: Étape de traitement de données .....	142

Figure 108: Courbe de modélisation .....	143
Figure 109: Organigramme de différentes étapes de la modélisation .....	144
Figure 110: Différentes étapes de l'utilisation de l'outil.....	148
Figure 111: Interface de l'outil I-PATHCLIM .....	149
Figure 112: Interface pour l'insertion de données géographiques.....	150
Figure 113: Fenêtre du navigateur avec le site « POWER Data Access Viewer » .....	150
Figure 114: Interface pour l'insertion de données climatiques.....	151
Figure 115: Interface pour l'insertion de la date et l'heure locale.....	151
Figure 116: Interface pour le choix de revêtements de sol.....	152
Figure 117: Fenêtre pour insérer les propriétés thermiques de pavés en pierre naturelle .....	152
Figure 118: Fenêtre pour insérer les propriétés thermiques de pavés autobloquants.....	153
Figure 119: Fenêtre pour insérer les propriétés thermiques de pavés en terre cuite .....	153
Figure 120: Fenêtre pour insérer les propriétés thermiques de pavés de béton .....	154
Figure 121: Fenêtre pour insérer les propriétés thermiques de l'asphalte .....	154
Figure 122: Fenêtre pour insérer les propriétés thermiques de béton de ciment.....	155
Figure 123: Tableau d'affichage des résultats.....	155
Figure 124: Évolution de températures de l'air prédites dans un espace public dans la ville d'Antananarivo le 15 juin 2023 .....	159
Figure 125: Évolution de températures de l'air prédites dans un espace public de la ville d'Antananarivo pendant la journée de 15 décembre 2023 .....	159
Figure 126: Évolution de températures de l'air prédites dans un espace public de la ville d'Antsirabe pendant la journée de 15 juin 2023 .....	160
Figure 127: Évolution de températures de l'air prédites dans un espace public de la ville d'Antsirabe pendant la journée de 15 décembre 2023 .....	161
Figure 128: Évolution de températures de l'air prédites dans un espace public de la ville de Fianarantsoa pendant la journée de 15 juin 2023 .....	162
Figure 129: Évolution de températures de l'air prédites dans un espace public de la ville de Fianarantsoa pendant la journée de 15 décembre 2023.....	162
Figure 130: Évolution de températures de l'air prédites dans un espace public de la ville de Toliara pendant la journée de 15 juin 2023 .....	163
Figure 131: Évolution de températures de l'air prédites dans un espace public de la ville de Toliara pendant la journée de 15 décembre 2023.....	164
Figure 132: Évolution de températures de l'air prédites dans un espace public de la ville de Toamasina pendant la journée de 15 juin 2023 .....	165

Figure 133: Évolution de températures de l'air prédites dans un espace public de la ville de Toamasina le 15 décembre 2023 .....	165
Figure 134: Évolution de températures de l'air prédites dans un espace public de la ville de Mahajanga pendant la journée de 15 juin 2023.....	166
Figure 135: Evolution de températures de l'air prédites dans un espace public de la ville de Mahajanga pendant la journée de 15 décembre 2023 .....	167
Figure 136: Evolution de températures de l'air prédites dans un espace public de la ville d'Antsiranana pendant la journée de 15 juin 2023 .....	168
Figure 137: Évolution de températures de l'air prédites dans un espace public de la ville d'Antsiranana pendant la journée de 15 décembre 2023 .....	168
Figure 138: Variation de températures de surface de PDP pour différentes valeurs d'albédo	176
Figure 139 : Températures de surface de PTC pour différentes valeurs d'albédo pour une journée d'été.....	176
Figure 140 : Variation de températures de surface de PT pour différentes valeurs d'albédo.	177
Figure 141: Variation de températures de surface de PB pour différentes valeurs d'albédo .	177
Figure 142: Évolution de températures de l'air à 1 m au-dessus de la surface de PDP pour différentes valeurs d'albédo.....	178
Figure 143: Évolution de températures de l'air à 1 m au-dessus de la surface de PTC pour différentes valeurs d'albédo.....	178
Figure 144: Évolution de températures de l'air à 1 m au-dessus de la surface de PT pour différentes valeurs d'albédo.....	179
Figure 145: Températures de l'air à 1 m au-dessus de la surface de PB pour différentes valeurs d'albédo.....	179
Figure 146: Variation de températures de surface de PTC pour différentes valeurs de diffusivité thermique pendant une journée d'été .....	182
Figure 147: : Variation de températures de surface de PB pour différentes valeurs de diffusivité thermique pendant une journée d'été .....	182
Figure 148: Bilan thermique sur un système élémentaire .....	XVI
Figure 149: Propriétés radiatives de matériaux .....	XX
Figure 150: PET prédites pour la ville d'Antananarivo le 15 juin 2023 .....	XXXII
Figure 151: PET prédites pour la ville d'Antananarivo le 15 décembre 2023.....	XXXII
Figure 152: PET prédites pour la ville d'Antsirabe le 15 juin 2023 .....	XXXIII
Figure 153: PET prédites pour la ville d'Antsirabe le 15 décembre 2023 .....	XXXIII
Figure 154: PET prédites pour la ville de Fianarantsoa le 15 juin 2023 .....	XXXIV



Figure 155: PET prédites pour la ville de Fianarantsoa le 15 décembre 2023.....	XXXIV
Figure 156: PET prédites pour la ville de Toliara le 15 juin 2023.....	XXXV
Figure 157: PET prédites pour la ville de Toliara le 15 décembre 2023.....	XXXV
Figure 158: PET prédites pour la ville de Toamasina le 15 juin 2023.....	XXXVI
Figure 159: PET prédites pour la ville de Toamasina le 15 décembre 2023.....	XXXVI
Figure 160: PET prédites pour la ville de Mahajanga le 15 juin 2023.....	XXXVII
Figure 161: PET prédites pour la ville de Mahajanga le 15 décembre 2023 .....	XXXVII
Figure 162: PET prédites pour la ville d'Antsiranana le 15 juin 2023 .....	XXXVIII
Figure 163: PET prédites pour la ville d'Antsiranana le 15 décembre 2023 .....	XXXVIII

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Albédo de différents revêtements de sol .....	25
Tableau 2: Emissivité de quelques surfaces exposées au rayonnement solaire .....	28
Tableau 3: Propriétés thermiques de quelques revêtements de sol .....	30
Tableau 4: Diffusivité et effusivité thermique de quelques revêtements de sol.....	32
Tableau 5: Porosité de revêtements de sol .....	34
Tableau 6: Valeur de l'intensité de l'ICU en fonction de la vitesse du vent.....	52
Tableau 7: Échelle de sensation thermique d'ASHRAE.....	53
Tableau 8: Valeurs du PMV selon neuf échelles de confort. ....	53
Tableau 9: Valeurs du PMV et du PET, sensations de l'environnement thermique et les niveaux de stress thermiques. ....	56
Tableau 10: Spécifications techniques de DHT11 .....	107
Tableau 11: Paramètres mesurés par Mini Station Météo SM-018.....	110
Tableau 12: Calendrier de mesures .....	111
Tableau 13: Valeurs moyennes de conditions climatiques journalières. ....	112
Tableau 14: Propriétés thermiques de pavages .....	116
Tableau 15: Masse volumique et chaleur massique de pavages .....	117
Tableau 16: Valeur moyenne de l'albédo de pavage .....	119
Tableau 17: Valeur moyenne, maximale et minimale de la température de surface et la température de l'air pendant la première série.....	122
Tableau 18: Valeur moyenne de la température de surface et la température de l'air pendant la deuxième série.....	123
Tableau 19: Exemples de couples de valeurs des paramètres rayonnement solaire et vitesse du vent .....	126
Tableau 20: Exemples de couples de valeurs des paramètres rayonnement solaire et vitesse du vent .....	129
Tableau 21: Exemples de couples de valeurs des paramètres rayonnement solaire et humidité relative.....	132
Tableau 22: Exemples de couples de valeurs des paramètres rayonnement solaire et vitesse du vent.....	134
Tableau 23: Durée du confort au niveau de chaque pavage.....	135
Tableau 24: Intensité de l'ICU dans le site expérimental .....	136
Tableau 25: Coefficient de chaque paramètre.....	145

Tableau 26: Indices de sensibilité réduite de différents paramètres.....	146
Tableau 27: Comparaison de résultats expérimentaux et résultats de simulation.....	156
Tableau 28: Températures de l'air maximales et minimales dans un espace public de la ville d'Antananarivo.....	160
Tableau 29: Températures de l'air maximales et minimales dans un espace public de la ville d'Antsirabe.....	161
Tableau 30: Températures de l'air maximales et minimales dans un espace public de la ville de Fianarantsoa .....	163
Tableau 31: Températures de l'air maximales et minimales dans un espace public de la ville de Toliara .....	164
Tableau 32: Évolution de températures de l'air maximales et minimales dans un espace public de la ville de Toamasina.....	166
Tableau 33: Températures de l'air maximales et minimales dans un espace public de la ville de Mahajanga .....	167
Tableau 34: Températures de l'air maximales et minimales dans un espace public de la ville d'Antsiranana .....	169
Tableau 35: Durée journalière du confort dans un espace public de la ville d'Antananarivo	169
Tableau 36: Durée journalière du confort dans un espace public de la ville d'Antsirabe.....	170
Tableau 37: Durée journalière du confort dans un espace public de la ville de Fianarantsoa	171
Tableau 38: Durée journalière du confort dans un espace public de la ville de Toliara .....	171
Tableau 39: Durée journalière du confort dans un espace public de la ville de Toamasina ..	172
Tableau 40: Durée journalière du confort dans un espace public de la ville de Mahajanga ..	173
Tableau 41: Durée journalière du confort dans un espace public de la ville d'Antsiranana ..	173
Tableau 42: Intensité de l'ICU au-dessus de chaque pavage .....	174
Tableau 43: Différentes valeurs d'albédo destinées à la simulation.....	175
Tableau 44: Durée du confort selon l'augmentation de l'albédo de chaque pavage.....	180
Tableau 45: Différentes valeurs d'intensité de l'ICU et albédo .....	180
Tableau 46: Limites de valeurs de propriétés thermiques.....	181
Tableau 47: Fonctions et équations de Bessel.....	XVII
Tableau 48: Matrice quadripolaire associé à un transfert unidirectionnel dans un milieu d'épaisseur finie dans génération d'énergie.....	XVIII
Tableau 49: Matrice quadripolaire associé à un transfert unidirectionnel dans un milieu semi-fini dans génération d'énergie.....	XVIII

Tableau 50: Quadripôle associé à un transfert unidirectionnel dans un milieu avec génération d'énergie.....	XIX
Tableau 51: Albédo de différents revêtements de sol .....	XXI

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le changement climatique est un défi majeur pour les sociétés contemporaines. Les zones urbaines sont particulièrement vulnérables aux impacts de ce problème. [Lucas \(2018\)](#) a affirmé que le taux d'urbanisation mondiale est passé de 3.4% en 1800 à 69% en 2015. Selon une recherche publiée dans le rapport de l'[ONU-Habitat](#) en 2018, les pays en développement, notamment en Afrique, dans les Caraïbes et dans le Pacifique, compteront en 2030 plus de personnes vivant en milieu urbain qu'en milieu rural. À Madagascar, les taux d'urbanisation sont environ 19.3 % ([MDG-INSTAT-RGPH2018](#)). Parmi ces chiffres, Antananarivo représente 25.5 %, Fianarantsoa 11.7 %, Toamasina 19.7 %, Mahajanga 19.1 %, Toliara 13.9 % et Antsiranana 25.4 %. Cette croissance de la population urbaine s'accompagne de l'étalement des espaces urbains. La minéralisation et la réduction des espaces verts contribuent à la modification des conditions climatiques dans les villes. En ce qui concerne l'espace public, lieux de rassemblement par excellence et de circulation, les revêtements de sol tels que l'asphalte, le béton et les pavés ont un impact important sur le climat ([Santamouris, 2013](#)). Ils absorbent la chaleur pendant la journée, ce qui contribue à la formation de l'îlot de Chaleur Urbain (ICU). Celui-ci est une zone urbaine dont la température est significativement plus élevée que celle des zones environnantes. Il peut avoir des impacts négatifs sur la qualité de l'air et la santé humaine en réduisant le confort thermique. Pour assurer un environnement agréable au niveau de cet espace public ouvert, il faut prendre en considération son climat. Il dépend d'un grand nombre de facteurs tels que la température, l'état hygrométrique de l'air, le vent au voisinage du sol, la nébulosité et l'ensoleillement. Les éléments du climat suscités peuvent être modérés ou amplifiés en fonction des éléments naturels et artificiels tels que les végétations et les matériaux utilisés. De ce fait, le choix du matériau pour les revêtements de sol constitue un paramètre très important. Pourtant, les exigences techniques et mécaniques dictent avant tout le choix et les contraintes revêtent d'autres aspects comme l'esthétique. Il manque de normes de conception résistantes à la chaleur. Cette thèse s'inscrit dans le cadre de confort thermique de ce matériau. D'où son intitulé « *Étude des interactions entre le comportement thermique de revêtements de sol et le climat urbain à micro-échelle par des expérimentations in situ, modélisation et simulation* »

L'objectif de notre travail est d'identifier les matériaux de revêtements de sol utilisés dans les espaces publics en milieu urbain, assurant, par leurs caractéristiques thermiques, de meilleur confort thermique en milieu extérieur et de faibles impacts sur le climat urbain à micro-échelle. Ce manuscrit s'articule autour de deux parties :

La première partie relève de la synthèse bibliographique et l'état des lieux. Le premier chapitre traite les trois modes de transfert de chaleur et les lois qui le régissent. La méthode des quadripôles est également abordée. Dans le deuxième chapitre sont développés les propriétés radiatives et conductives des revêtements de sol. Il s'agit de l'albédo, le facteur d'absorption, l'émissivité, la conductivité thermique, la chaleur massique, la diffusivité thermique et l'effusivité thermique. Le troisième chapitre aborde la climatologie urbaine, en incluant le bilan thermique d'une ville et le phénomène de l'îlot de chaleur urbain. Le concept de confort thermique y est par ailleurs présenté. Plusieurs travaux d'investigation concernant l'impact de revêtements de sol sur l'îlot Chaleur Urbain ont été menés dans différentes contrées avec diverses approches. Ces dernières sont synthétisées dans le quatrième chapitre. Elles comportent la synthèse bibliographique de méthodes expérimentales et de méthodes de simulation numérique réalisées par différents auteurs.

La seconde partie de cette thèse est dédiée à l'étude expérimentale, la modélisation et la simulation numérique. Les matériels et la méthode de détermination de propriétés radiatives et thermiques de pavages sont développés dans le cinquième chapitre. Afin d'estimer ces dernières, la méthode de fil chaud parallèle y est présentée. La mesure et l'acquisition des données nécessitent différents composants, et un programme développé sous MATLAB est utilisé pour analyser ces données expérimentales. Le logiciel Mesurim 2 est également exposé dans ce chapitre. Il repose sur l'estimation de l'albédo de pavages. Le sixième chapitre se focalise sur les approches expérimentales de la mesure in situ. Ces dernières consistent à installer divers capteurs sur les pavages exposés au rayonnement solaire. Les résultats obtenus pendant cette expérimentation sont présentés dans le septième chapitre. L'influence de différents paramètres climatiques y est exposée. Le huitième chapitre se concentre sur le développement de modèle mathématique à partir de données expérimentales pour prédire la température de pavage et la température de l'air à différentes hauteurs. La méthode d'apprentissage supervisé est utilisée. Ce modèle est utilisé dans la conception de l'outil de simulation numérique afin de pouvoir simuler une très large gamme de scénarios, de pouvoir anticiper l'évolution du milieu urbain et de proposer des solutions pour un confort extérieur optimal selon le type de milieu urbain. Le dernier chapitre est consacré à l'application de cet outil dans les différentes villes de Madagascar. L'influence de l'albédo et la conductivité thermique sur la variation de la température de surface, la température de l'air, l'indice de confort PET et l'intensité d'ICU y sont étudiées.

**PARTIE 1 : DEVELOPPEMENTS  
THÉORIQUES ET ÉTAT DES LIEUX**

# CHAPITRE I : LES TROIS MODES DE TRANSFERT DE CHALEUR

## INTRODUCTION

Le transfert de chaleur est un concept important dans de nombreux domaines, notamment en ingénierie, en physique, en chimie et en climatologie. C'est une discipline riche en phénomènes physiques et en applications pratiques dans notre vie de tous les jours (Giovannini et al., 2012). Ainsi, comprendre les principes de base du transfert de chaleur est essentiel pour concevoir des systèmes de chauffage, de refroidissement et de ventilation efficaces, ainsi que pour comprendre les phénomènes naturels tels que la convection dans l'atmosphère et la conduction thermique à travers les matériaux. Il est devenu donc une science très vaste dont certaines lois remontent à 1811 ou plus loin, mais qui subit une étude intensive et féconde. Ce présent chapitre se concentre sur ses principes de base, notamment les trois modes de transfert de chaleur et les lois qui le régissent.

### I.1. CONDUCTION

La conduction est définie comme étant le mode de transmission de la chaleur ou échange d'énergie interne provoquée par la différence de température entre deux régions d'un milieu solide, liquide, gazeux, ou encore entre deux milieux en contact physique. Il n'y a pas de déplacement appréciable des molécules. Celle-ci est le seul mécanisme intervenant dans le transfert de chaleur dans un solide homogène, opaque et compact. Dans les fluides, elle joue aussi un rôle important, mais elle est presque toujours combinée à la convection et parfois au rayonnement.

#### I.1.1. Loi de Fourier

Les lois de conduction peuvent s'exprimer par des expressions mathématiques précises. Les problèmes pourront se traiter par voie analytique. Fourier apparente la conduction de la chaleur à l'écoulement d'un fluide qui a lieu des régions chaudes vers les régions froides, et dont les seules manifestations dans la matière se traduisent par des variations de température. Cette théorie ne tient pas compte de la structure moléculaire ou atomique d'une substance qu'elle assimile a priori à un milieu continu. Elle n'est plus valable quand les distances entre molécules sont relativement trop grandes. Cette théorie néglige les variations de volume dues aux dilatations et ne fait strictement intervenir que les échanges calorifiques.



La loi de Fourier dans le cas d'un champ de températures à une dimension s'exprime par (André, 1990) :

$$\Phi = -\lambda S \frac{dT}{dx} \quad (\text{I-1})$$

$\phi$  : flux de chaleur en W traversant le plan d'abscisse x.

S : surface perpendiculaire au flux thermique en m<sup>2</sup>

$\frac{dT}{dx}$  : gradient de température au point x considéré ou variation de la température par unité de longueur dans la direction x.

$\lambda$  : conductivité thermique du matériau en W m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>

C'est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert de chaleur par conduction. Elle représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par une unité de temps sous un gradient de température.

Le signe moins dans l'équation I-1 provient de ce que l'on désire, par convention, que  $\Phi$  soit positif quand la chaleur s'écoule vers les x positifs, ce qui correspond à un gradient négatif, car la chaleur s'écoule des hautes vers les basses températures.

### I.1.2. Flux thermique

Le flux thermique à travers une surface S est la quantité de chaleur qui entre par unité de temps dans le volume V par la portion de surface limitrophe S.

$$\Phi = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{Q}{t_2 - t_1} \quad (\text{I-2})$$

Q désigne la quantité de chaleur qui entre dans V à travers S pendant le temps t<sub>2</sub>-t<sub>1</sub>. Le flux de chaleur qui pénètre dans un volume V se propage en décrivant des lignes de courant. Il a la dimension d'une puissance.

### I.1.3. Équation générale de la conduction

Dans le cas tridimensionnel, l'équation de la chaleur dans le cas le plus général s'écrit (Cf. ANNEXE 1) :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \varphi_s = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{I-3})$$

- Si le corps est orthotrope et non homogène, elle est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \varphi_s = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{I-3a})$$

Notons bien que  $\lambda_x, \lambda_y, C_p$  et  $\rho$  sont des fonctions de  $x, y, z, T$ , et indirectement de  $t$  ; que  $\varphi_s$  est une fonction de  $x, y, z, t$  et  $T$  ; enfin que  $T$  est fonction de  $x, y, z$  et  $t$ .

- Dans le cas où le solide est isotrope et aussi homogène et si  $\lambda, C_p$ , et  $\rho$  indépendants de  $x, y, z$ , nous obtenons :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \frac{\varphi_s}{\rho C_p} \quad (\text{I-3b})$$

- Dans un solide isotrope, si  $\lambda, C_p$ , et  $\rho$  dépendent de la température, l'équation I-3 devient :

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + \frac{d\lambda}{dT} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 \quad (\text{I-3c})$$

- Si dans l'équation I-3, on exprime que le solide ne contient pas de source,  $\varphi_s=0$ , on obtient l'équation parfois appelée équation de Poisson :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \Delta T = \frac{\lambda}{\rho C_p} \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (\text{I-3e})$$

- En régime permanent, nous obtenons l'équation de Laplace :

$$\Delta T = 0 \quad (\text{I-3f})$$

#### I.1.4. Résistance thermique d'une paroi

La *figure 1* représente une paroi homogène d'épaisseur  $e$ , de surface  $S$ , de conductivité thermique équivalente  $\lambda$  dont la face en  $x$  égal à 0. Elle est maintenue à la température  $T_1$  et la face en  $x$  égal à la température  $T_2$ .

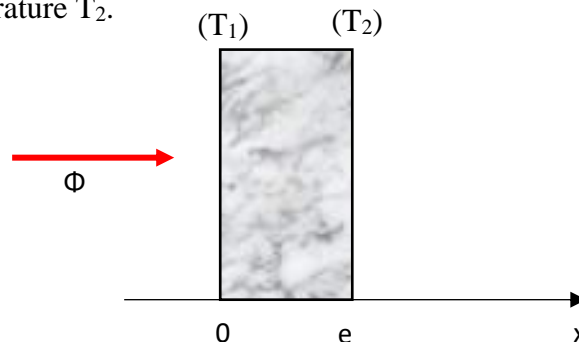


Figure 1: Conduction dans une paroi

En régime permanent, le transfert de chaleur par conduction dans une paroi est régi par l'équation de LAPLACE. Le modèle mathématique décrivant la conduction pure est alors :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{d^2 T}{dx^2} = 0 \quad (\text{I-4})$$

Après la résolution de cette équation, nous avons l'expression du flux thermique qui traverse leur surface d'échange S :

$$\Phi = \frac{\lambda S}{e} (T_1 - T_2) \quad (\text{I-5})$$

Il est important de noter que le flux de chaleur est proportionnel à la différence de température entre ses deux faces. Le coefficient de proportionnalité qui représente la conductance thermique du dispositif est donné par l'équation I-6.

$$G_{\text{th}} = \frac{\lambda S}{e} \quad (\text{I-6})$$

La résistance thermique est l'inverse de la conductance.

$$R_{\text{th}} = \frac{1}{G_{\text{th}}} = \frac{e}{\lambda S}$$

La différence de températures entre les deux faces peut alors s'écrire de la forme  $T_1 - T_2 = R_{\text{th}} \Phi$ . Cette relation est analogue à la loi d'OHM. En effet, un milieu homogène de longueur L, de section S, ayant une conductivité électrique  $\sigma$  parcouru par un courant I développe une différence de potentiel  $U_1 - U_2$ , telle que  $U_1 - U_2 = RI$ .

### I.1.5. Résistance thermique de cylindre creux

Le cylindre creux de rayon intérieur  $r_i$  et de rayon extérieur  $r_e$  est représenté par la *figure 2*. Le matériau occupant l'espace entre  $r_i$  et  $r_e$  est homogène de conductivité thermique  $\lambda$ .

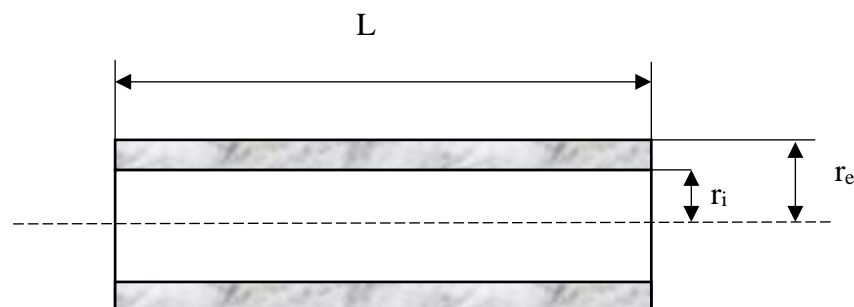


Figure 2: Conduction dans un cylindre creux

Si sa longueur L est suffisamment grande de telle sorte que les effets des extrémités peuvent être négligés, le transfert par conduction est purement radial. Ainsi, l'équation de conduction en régime permanent se réduit alors :

$$\frac{d}{dr} \left( r \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (\text{I-7})$$

La température de surface intérieure est maintenue constante  $T_i$ , tandis que la surface extérieure est la température  $T_e$ . Le flux radial de la chaleur est donné par :

$$\Phi = \frac{T_1 - T_2}{\text{Log} \left( \frac{r_e}{r_i} \right)}$$

D'où l'expression de la résistance thermique de cylindre creux :

$$R_{th} = \frac{1}{2 \pi \lambda L} \text{Log} \left( \frac{r_e}{r_i} \right) \quad (\text{I-8})$$

### **I.1.6. Méthodes des quadripôles**

La méthode des quadripôles est une technique utilisée pour caractériser les propriétés thermiques d'un matériau, telles que la conductivité thermique, la diffusivité thermique et la capacité thermique. Elle repose sur la mesure des variations de température et de flux de chaleur à l'aide de dispositifs appelés quadripôles. Elle offre une approche pratique et efficace, en particulier dans des configurations complexes ou avec des matériaux à conductivité thermique élevée ou variable. Elle est largement utilisée dans divers domaines de recherche et d'ingénierie, tels que l'industrie des semi-conducteurs, l'électronique de puissance et la thermique.

#### **a. Écoulement unidirectionnel dans une paroi**

Dans le cas d'un transfert de chaleur unidirectionnel dans une paroi d'épaisseur e, sa température T (x, t) vérifie l'équation de transmission de chaleur :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{I-9})$$

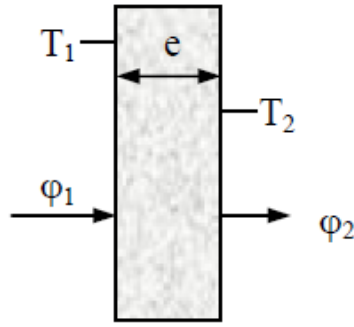


Figure 3: Mur d'épaisseur e

En appliquant la transformée de Laplace, on obtient :

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{p}{a} \theta \quad (\text{I-10})$$

Où  $\theta(x, p)$  est la transformée de Laplace de la température  $T(x, t)$ . Selon Yves (2011), la solution de cette équation est de la forme :

$$\theta(x, p) = k_1(p) \cosh(qx) + k_2(p) \sinh(qx) \quad (\text{I-10a})$$

Avec  $q^2 = \frac{p}{a}$ . La transformée de Laplace du flux en un point quelconque d'une paroi s'écrit :

$$(\text{I-10b}) \quad \Phi(x, p) = -\lambda S \frac{\partial \theta}{\partial x}(x, p)$$

Donc :

$$\Phi(x, p) = -\lambda S k_1 q \sinh(qx) - \lambda S k_2 q \cosh(qx)$$

L'équation I-10 a et I-10 b peuvent être écrites en  $x = 0$  et en  $x = e$  :

$$\theta(0, p) = k_1$$

$$\theta(e, p) = k_1 \cosh(qe) + k_2 \sinh(qe)$$

$$\Phi(0, p) = -\lambda S k_2$$

$$\Phi(e, p) = -\lambda S q k_1 \sinh(qe) - \lambda S q k_2 \cosh(qe)$$

On élimine  $k_1$  et  $k_2$  entre ces quatre équations et on exprime les grandeurs de sortie ( $\theta(0, p)$ ,  $\Phi(0, p)$ ) en fonction de grandeurs d'entrée ( $\theta(e, p)$ ,  $\Phi(e, p)$ ), on aboutit à :

$$\begin{bmatrix} \theta(0, p) \\ \Phi(0, p) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \cosh(qe) & \frac{1}{\lambda q S} \sinh(qe) \\ \lambda q S \sinh(qe) & \cosh(qe) \end{bmatrix}}_M \begin{bmatrix} \theta(e, p) \\ \Phi(e, p) \end{bmatrix} \quad (\text{I-11})$$

M représente la matrice quadripolaire. Elle représente une matrice de transfert. On peut par ailleurs établir une analogie entre la propagation d'un courant en régime sinusoïdal et le transfert thermique unidirectionnel en régime transitoire. L'intensité du courant électrique est analogue avec le flux de chaleur dans l'espace de Laplace  $F(x, p)$ , le potentiel électrique  $U$  est analogue avec la température dans l'espace de Laplace  $q(x, p)$  et l'impédance électrique  $Z$  est analogue à l'impédance thermique  $Z$ .

### b. Écoulement radial dans un cylindre creux

Le cylindre creux étudié est représenté par la *figure 4*.

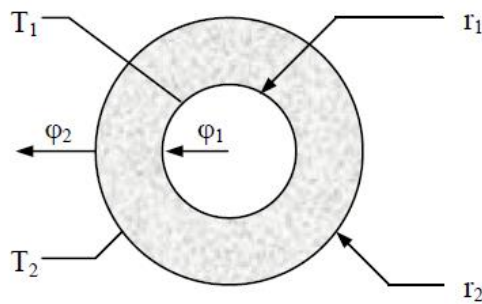


Figure 4: Cylindre creux

On montre de la même manière que les températures et les flux dans l'espace de Laplace peuvent être reliés par une relation quadripolaire :

$$\begin{bmatrix} \theta(r_1, p) \\ \Phi(r_1, p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta(r_2, p) \\ \Phi(r_2, p) \end{bmatrix} \quad (\text{I-12})$$

Avec :

$$A = qr_2 [K_1(qr_2) I_0(qr_1) + K_0(qr_1) I_1(qr_2)]$$

$$B = \frac{L}{2\pi\lambda l} [K_0(qr_1) I_0(qr_2) - K_0(qr_2) I_0(qr_1)]$$

$$C = 2\pi L p C_p r_1 r_2 p [K_1(qr_1) I_1(qr_2) - K_1(qr_2) I_1(qr_1)]$$

$$D = qr_1 [K_0(qr_2) I_1(qr_1) + K_1(qr_1) I_0(qr_2)]$$

$I_0, I_1, K_0, K_1$  étant des fonctions de Bessel (Cf. [ANNEXE 2](#))

### c. Résistance de contact entre deux solides

Le transfert de chaleur à travers une résistance de contact  $R_C$  à l'interface entre les deux solides est schématisé comme la figure suivante :

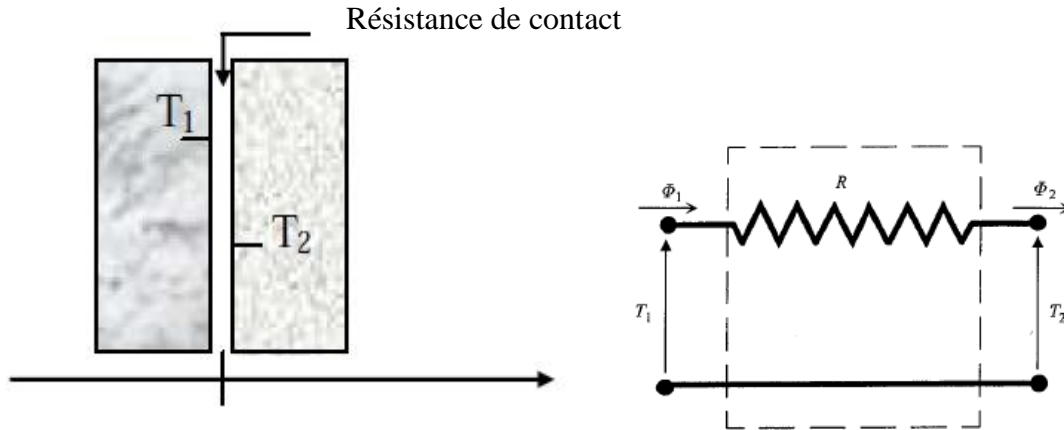


Figure 5: Schéma de deux solides avec résistance de contact et schéma électrique équivalent

Le flux de chaleur s'écrit  $\varphi = \frac{T_1 - T_2}{R_C}$ . Il peut aussi s'écrire :  $T_1 = R_C \varphi + T_2$ . Dans l'espace de

Laplace, on a :  $\theta_1 = \theta_2 + R_C \Phi$  si  $\Phi$  est la transformée de Laplace du flux  $\varphi$  et  $\theta_i$  celle de la

température  $T_i$ . Ainsi : 
$$\begin{cases} \theta_1 = \theta_2 + R_C \Phi_1 \\ \Phi_1 = \Phi_2 \end{cases}$$

On peut donc écrire sous forme matricielle quadripolaire :

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \Phi_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & R_C \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \Phi_2 \end{bmatrix} \quad (\text{I-13})$$

### d. Association de matrices quadripolaires

#### d.1. Association en série

L'association en série de deux matrices quadripôles s'effectue en multipliant les matrices. Pour les deux matrices quadripôles  $M_1$  et  $M_2$ , nous avons l'équation suivante :

$$[M_{\text{éq}}] = [M_1] \times [M_2] \quad (\text{I-14})$$

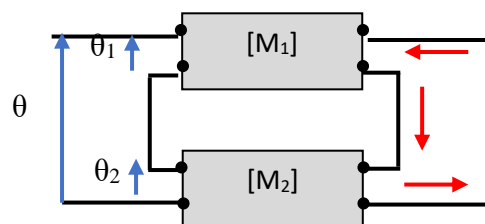


Figure 6: Association en série de matrices quadripolaires

### d.2. Association en parallèle

L'association en parallèle de deux matrices quadripôles s'effectue en ajoutant les matrices. Si  $M_1$  et  $M_2$  sont deux matrices quadripôles, on obtient :

$$[M_{\text{éq}}] = [M_1] + [M_2] \quad (\text{I-15})$$

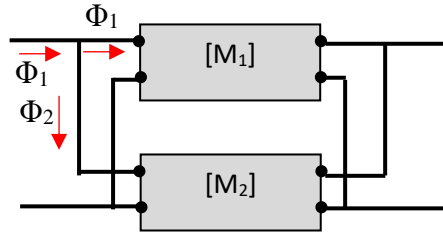


Figure 7: Association en parallèle de matrices quadripolaires

### d.3. Association en cascade

L'association des matrices quadripôles en cascade consiste à effectuer une multiplication séquentielle des matrices. Pour  $N$  quadripôles, numérotés de 1 à  $N$ , on a :

$$[M_{\text{éq}}] = [M_1] \times [M_2] \times \dots \times [M_N] \quad (\text{I-16})$$

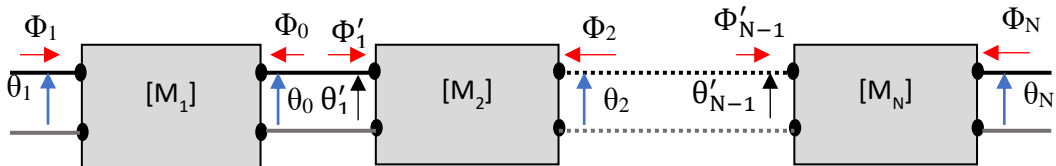


Figure 8: Association en cascade de matrices quadripolaires

#### I.1.7. Milieu semi-infini

L'application du modèle du milieu semi-infini est aussi une autre méthode pour étudier le comportement thermique d'un matériau lorsqu'il est soumis à des perturbations thermiques sinusoïdales en sa surface. Un milieu semi-infini est une paroi d'épaisseur suffisamment grande pour que la perturbation appliquée sur une face ne soit pas ressentie par l'autre face. Les problèmes pratiques qui s'y rattachent sont le stockage de la chaleur dans le sol, l'absorption de l'énergie solaire à la surface de la terre, puis sa propagation dans le sol, le stockage de la chaleur dans les nappes souterraines.



Pour un corps continu d'épaisseur infinie limitée par une paroi plane,  $x = 0$ . On admet que le transfert de chaleur au sein du corps se fait par conduction uniquement et de façon unidirectionnelle. Le milieu semi-infini est initialement à la température uniforme  $T_i$ . On impose brutalement la température  $T_0$  sur sa surface, cette condition aux limites est appelée condition de Dirichlet. Elle est donnée par la formule suivante :

$$T(x = 0, t) = T_0 = T_m + \Delta T \sin \omega t \quad (\text{I-17})$$

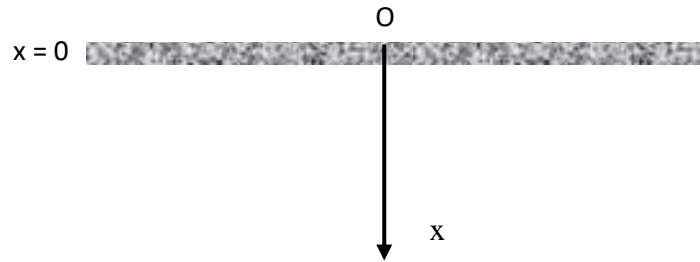


Figure 9: Milieu semi-infini

L'évolution thermique de ce corps est décrite par l'équation de transfert de chaleur par conduction associée à la condition aux limites. D'après l'équation I-3, l'équation de transfert de chaleur par conduction s'écrit :

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (\text{I-18})$$

La solution du régime quasi-stationnaire s'écrit :

$$T(x, t) = \Delta T_s \exp\left(-x \sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right) \sin\left(\omega t - x \sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right) \quad (\text{I-19})$$

Avec  $\Delta T_s \exp\left(-x \sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right)$  représente l'amplitude en un point  $x$ .

$$\Delta T_s = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2}$$

$a$  représente la diffusivité thermique et  $\omega$  est la pulsation.

Cette équation nous permet de déterminer la distribution de la température en tout point  $x$  d'un solide semi-infini, à chaque instant  $t$ . On peut en déduire les différents paramètres caractérisant la propagation de la température et qui décrit l'inertie thermique du milieu.

### a. Profondeur de pénétration

La profondeur de pénétration est définie comme la distance à partir de la surface avec laquelle l'amplitude de la variation de température est réduite d'un facteur spécifique par rapport à la température à la surface. Elle dépend de plusieurs facteurs, notamment de la conductivité thermique du matériau, de la période de temps considérée et des conditions limites appliquées. Elle est utilisée pour déterminer jusqu'où la chaleur se propage à partir de la surface dans le matériau. La connaissance de la profondeur de pénétration thermique est essentielle pour la conception et l'analyse de systèmes de chauffage, de refroidissement ou de traitement thermique dans lesquels la propagation de la chaleur doit être contrôlée ou optimisée. Elle est donnée par la formule suivante :

$$\delta = \sqrt{\frac{2a}{\omega}} \quad (\text{I-20})$$

### b. Facteur d'amortissement

Le facteur d'amortissement pour une distance  $x$  à l'intérieur de corps semi-infini est le rapport des amplitudes de la température intérieure en un point  $x$  et de la température de surface à l'extérieur. Plus le facteur d'amortissement est faible, plus les températures intérieures sont amorties. Noté  $f$ , il est donné par :

$$f = \frac{\Delta T(x)}{(\Delta T_m)_{x=0}} \quad (\text{I-21})$$

Où  $\Delta T(x)$  : amplitude de température de la face située à une distance  $x$  ;

### c. Déphasage en temps

Le déphasage thermique se réfère au laps de temps nécessaire à un flux de chaleur pour traverser un matériau. Il représente le temps requis pour que la température de la face intérieure atteigne son maximum à partir du moment où le pic de température est atteint sur la face extérieure.

$$\Delta t = \frac{1}{\omega} \times \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \quad (\text{I-22})$$

Le facteur amortissement et le déphasage sont très intéressants car ils décrivent l'inertie thermique du milieu considéré. [Emmanuelle H. et al. \(2017\)](#) disent que l'inertie thermique des matériaux peut être brièvement expliquée par ces deux paramètres. [Aste et al. \(2009\)](#) ont montré que le matériau léger possède un déphasage plus faible et un facteur d'amortissement plus élevé que celui du matériau lourd. Ils en déduisent que le premier atténue moins les variations des fluctuations thermiques extérieures que le dernier. Ces deux grandeurs peuvent être évaluées en fonction de la température intérieure et fournissent des informations sur le comportement de celui-ci. Ils peuvent être aussi calculés à partir des propriétés thermophysiques des matériaux constituant le milieu.

#### **d. Vitesse apparente de propagation de l'onde de température**

C'est la vitesse avec laquelle un point d'onde, par exemple un point d'amplitude maximum, se déplace dans la direction des  $x$ , après un temps, mais elle n'a rien à voir avec la propagation de la chaleur elle-même. En observant qu'un maximum de température en  $x = 0$  se retrouve à une profondeur  $x$  après un retard  $\Delta t$ , on peut dire que ce maximum a voyagé avec une vitesse  $V$  telle que :

$$V = \frac{x}{\Delta t} = \sqrt{2a\omega} \quad (\text{I-23})$$

Cette vitesse varie comme  $a^{1/2}$ . Ce qui montre l'importance de la valeur de la diffusivité quant à la vitesse apparente de propagation d'une onde thermique.

## **I.2. CONVECTION**

La convection est le mode de transmission de la chaleur qui implique le déplacement d'un fluide liquide ou gazeux. On la trouve dans l'échange qui a lieu entre une paroi et un fluide. En réalité, il s'agit d'une combinaison du phénomène de conduction avec celui d'un transfert de matière. La paroi cède par pure conduction de la chaleur au fluide adjacent qui la transmet de couche en couche dans une direction perpendiculaire à la paroi. En outre, le mouvement du fluide permet à l'énergie ainsi accumulée de s'écouler vers des régions plus froides. Si le mouvement est « turbulent », un brassage énergétique des particules de fluide en mouvement permet un transport d'énergie considérable, dans la direction perpendiculaire à la paroi.

## **I.2.1. Types de convection**

### **a. Convection naturelle**

La convection naturelle, également connue sous le nom de convection libre, est un processus de transfert de chaleur qui se produit dans un fluide, tel que l'air ou l'eau, en raison de la différence de densité causée par la différence de température. Le fluide chauffé se dilate et devient moins dense, ce qui le fait monter, tandis que le fluide refroidi se contracte et devient plus dense, ce qui le fait descendre. Ce processus crée une circulation naturelle dans le fluide, appelée courant de convection, qui transporte la chaleur de la source chaude vers la source froide. La convection naturelle est souvent observée dans les fluides qui sont chauffés à partir de la base. En effet, le fluide chaud monte vers le haut et est remplacé par le fluide plus froid qui se déplace vers le bas pour le remplacer. Elle est importante dans de nombreux processus naturels, tels que les courants océaniques et les mouvements de l'air dans l'atmosphère. Elle est également utilisée dans de nombreuses applications industrielles et domestiques, telles que la ventilation naturelle dans les bâtiments, le refroidissement par convection des équipements électroniques, le chauffage solaire de l'eau et l'échangeur de chaleur de type serpentin.

### **b. Convection forcée**

La convection forcée est un processus de transfert de chaleur qui utilise un fluide en mouvement, tel que l'air ou l'eau, pour transporter la chaleur de la source chaude vers la source froide. Contrairement à la convection naturelle, la convection forcée utilise une pompe, un ventilateur ou un autre mécanisme pour déplacer le fluide à travers un conduit, un échangeur de chaleur ou un radiateur. Elle est couramment utilisée dans les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation, ainsi que dans les équipements de refroidissement tels que les réfrigérateurs et les climatiseurs. Elle est également utilisée dans de nombreux processus industriels, tels que le refroidissement des machines, l'évaporation de l'eau et le séchage des produits. Dans un système de convection forcée, le fluide chaud est généralement pompé ou soufflé à travers un échangeur de chaleur ou un radiateur, où la chaleur est transférée à l'air ou à l'eau qui circule à travers l'échangeur. Le fluide refroidi est ensuite renvoyé vers la source chaude pour être réchauffé à nouveau, créant ainsi un cycle continu de transfert de chaleur.

### I.2.2. Loi du Newton

Elle donne la quantité de chaleur  $d^2Q$  échangée par convection entre un élément de surface plane d'aire  $dS$  à la température  $T_p$  et un fluide de température  $T_f$  pendant l'intervalle de temps  $dt$  :

$$d^2Q = h_c(T_f - T_p) dS dt \quad (I-24)$$

$h_c$  : coefficient d'échange de chaleur par convection, ou plus simplement coefficient de convection.

Quels que soient le type de convection et le régime d'écoulement du fluide (laminaire ou turbulent), le flux de chaleur échangé entre le fluide en mouvement et la paroi solide s'exprime par :

$$\Phi = h_c S (T_f - T_p) \quad (I-25)$$

Le coefficient d'échange convectif  $h_c$  dépend de plusieurs paramètres. Plusieurs méthodes ont été développées pour déterminer le coefficient de convection. Généralement, sa valeur est déterminée à partir de relations empiriques. Il dépend d'un nombre important de paramètres : caractéristiques du fluide, sa température, sa vitesse, le type d'écoulement, les caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide, dimension de la paroi, de sa nature et de sa surface. La méthode utilisant l'analyse dimensionnelle est la méthode la plus utilisée pour déterminer le coefficient de convection  $h$ . [Deléglise et al. \(2000\)](#) ont pris la valeur de  $h$  égale à  $11 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  pour l'air ambiant lors de son expérience. Par contre, [Santamouris \(2013\)](#) a utilisé une valeur égale à  $5,9 \text{ W/m}^2/\text{K}$ . Pour un écoulement laminaire de l'air avec une vitesse de vent ( $V_v$ ) ne dépassant pas de  $2 \text{ m/s}$ , le coefficient de transfert de chaleur peut être calculé selon l'équation I-26 pour ([Matthew et al., 2010](#)).

$$h_c = 5.8 + 4.1 v_v \quad (I-26)$$

### I.3. RAYONNEMENT

Le rayonnement thermique est le mode de transmission par lequel la chaleur passe d'un corps à haute température à un autre plus froid. Les deux corps ne se touchent pas, mais ils sont séparés par un milieu transparent tel l'air ou le vide. Il s'agit d'un rayonnement électromagnétique, mais limité aux longueurs d'onde du « rayonnement thermique » dont l'absorption par certains corps possède la propriété de transformer l'énergie radiante en chaleur ou plus exactement en énergie calorifique. Le rayonnement thermique émis par le corps se situe entre la longueur d'onde  $0,1 \mu\text{m}$  et  $100 \mu\text{m}$ .

### I.3.1. Loi de Stefan-Boltzmann

C'est la loi fondamentale du rayonnement thermique. Elle exprime que le flux d'énergie radiante émis par une surface idéale, appelée « noire », est proportionnel à la surface et à la quatrième puissance de la température absolue T.

$$\Phi = \sigma ST^4$$

$\sigma$  est la constante de Stefan, qui vaut  $5.66697 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-4}$  (I-27)

### I.3.2. Emittance

C'est une grandeur physique qui caractérise le flux lumineux émis par une surface lumineuse. L'émittance est dite monochromatique si elle concerne un intervalle spectral étroit  $d\lambda$  autour d'une longueur d'onde  $\lambda$ . Si l'on considère le flux d'énergie  $d\varphi_{\lambda}^{\lambda+d\lambda}$  émis entre les deux longueurs d'ondes  $\lambda$  et  $\lambda+d\lambda$ , on la définit par :

$$M_{\lambda,T} = \frac{d\varphi_{\lambda}^{\lambda+d\lambda}}{dSd\lambda}$$

Si l'émittance est relative à l'ensemble du spectre, elle est dite totale. Ainsi, elle représente la densité de flux de chaleur émise par rayonnement par  $dS$  sur tout le spectre des longueurs d'ondes. Elle n'est plus fonction que de la température T :

$$M_T = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} M_{\lambda,T} d\lambda = \frac{d\varphi}{dS} \quad (\text{I-28})$$

### I.3.3. Réception du rayonnement par un matériau

Quand un rayon incident d'énergie  $\varphi_{\lambda}$  frappe un corps à la température T, une partie de l'énergie incidence  $\varphi_{\lambda}\rho_{\lambda,T}$  est réfléchiée par une surface S, une autre partie  $\varphi_{\lambda}\alpha_{\lambda,T}$  est absorbée par le corps qui s'échauffe et le reste  $\varphi_{\lambda}\tau_{\lambda,T}$  est transmise et continue son chemin.

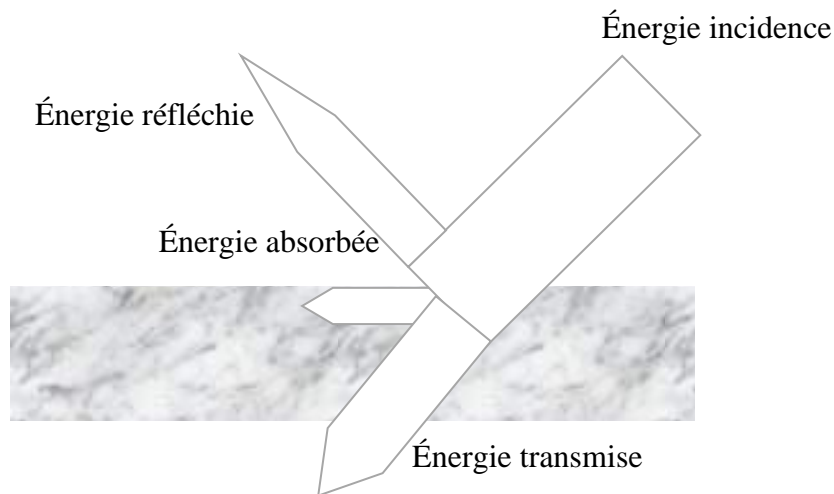


Figure 10: Réception du rayonnement par un corps

D'après cette figure, le bilan énergétique s'écrit :

$$\varphi_{\lambda} = \varphi_{\lambda} \rho_{\lambda,T} + \varphi_{\lambda} \alpha_{\lambda,T} + \varphi_{\lambda} \tau_{\lambda,T} \quad (\text{I-29})$$

$\rho_{\lambda,T}$  : facteur ou coefficient de réflexion ou réflectivité

$\alpha_{\lambda,T}$  : facteur ou coefficient d'absorption ou absorptivité

$\tau_{\lambda,T}$  : facteur ou coefficient de transmission.

D'après l'équation I-29, la somme de ces trois facteurs est égale à l'unité.

$$1 = \rho_{\lambda,T} + \alpha_{\lambda,T} + \tau_{\lambda,T} \quad (\text{I-30})$$

Selon André (1990), la nature du corps, son épaisseur, sa température T, la longueur d'onde  $\lambda$  du rayonnement incident et l'angle d'incidence influencent ces facteurs. Si l'on considère l'énergie incidente sur tout le spectre des longueurs d'onde, on obtient les pouvoir réfléchissant  $\rho_T$ , absorbant  $\alpha_T$  et filtrant  $\tau_T$  totaux qui sont respectivement appelés facteur de réflexion, facteur d'absorption et facteur de transmission. Pour le cas d'un matériau opaque, l'équation I-30 devient :

$$1 = \rho + \alpha \quad (\text{I-31})$$

### I.3.4. Lois de rayonnement

#### a. Corps noir

Le corps noir est un corps qui absorbe intégralement tout le rayonnement qu'il reçoit et n'en réfléchit ou n'en transmet rien, et ceci indépendamment de son épaisseur, de sa température, de l'angle d'incidence et de la longueur d'onde du rayonnement incident. On utilise le corps noir comme une référence à laquelle on compare les caractéristiques du rayonnement des autres corps.

#### b. Loi de Planck et Stefan Boltzmann

Dans un intervalle centré autour d'une longueur d'onde  $\lambda$ , le flux d'énergie émis par un corps noir à la température T augmente très rapidement avec la longueur d'onde  $\lambda$ , atteint un maximum puis retombe très vite. Cette émission d'énergie en fonction de  $\lambda$  dépend seulement de sa température, mais non pas de la nature de la matière avec laquelle interagit le rayonnement. C'est la loi de Planck et elle s'écrit :

$$E_{\lambda,T} = \frac{2hC^2\lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{hC}{k\lambda T}\right) - 1} \quad (\text{I-32})$$

C : vitesse de la lumière

$h$  : constante de Planck

$k$  : constante de Boltzmann égale à  $1.38065 \times 10^{-23}$  J/K

$E_{\lambda,T}$  : émittance monochromatique du corps noir

L'intégration de cette formule de Planck pour toutes les longueurs d'onde donne l'émittance totale  $E_T$  du corps noir qui n'est plus fonction que de la température  $T$ . Celle-ci est donnée par la loi de Stefan Boltzmann :

$$E_T = \int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda = \sigma T^4$$

On définit les propriétés émissives des corps réels par rapport aux propriétés émissives du corps noir dans les mêmes conditions de température et de longueur d'onde. On les caractérise à l'aide de coefficients appelés facteurs d'émission ou émissivités.

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{M_{\lambda,T}}{E_{\lambda,T}} \quad (\text{I-33})$$

L'émittance totale d'un corps non noir à la température  $T$  est donné par la relation :

$$M_T = \varepsilon_T \sigma T^4 = \varepsilon_T E_T \quad (\text{I-34})$$

### c. Loi de Wien

La relation entre la longueur d'onde maximale  $\lambda_{\max}$  correspondant à  $E_{\lambda_{\max}}$  et la température absolue  $T$  est donnée par la loi de déplacement de WIEN sous la forme :

$$\lambda_{\max} T = 2897 \mu\text{mK} \quad (\text{I-35})$$

Prenons comme exemple l'enveloppe externe de soleil qui a une température autour de 6000 K, il a donc un maximum d'émission situé dans le visible. Pour des températures typiques de la Terre d'environ 300 K, le maximum d'émission est situé dans l'infrarouge vers 10  $\mu\text{m}$ , et le rayonnement émis dans les longueurs d'ondes visibles est à peu près nul.

### d. Loi de Kirchhoff

Pour le transfert de chaleur par rayonnement entre deux corps initialement aux températures  $T_1$  et  $T_2$ , la loi de Kirchhoff établit un rapport entre le coefficient d'absorption  $\alpha$  et le coefficient d'émission  $\varepsilon$  d'une même surface lorsque l'équilibre thermique est atteint entre les deux corps.

A la température d'équilibre  $T$  et pour une longueur d'onde  $\lambda$  donnée, le rapport  $\frac{M_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}}$  est le

même pour tous les corps. Ainsi, le facteur d'absorption est égal au facteur d'émission.

$$\frac{M_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} = C \quad (\text{I-36})$$



Dans le cas du corps gris, on peut généraliser la loi de Kirchhoff, ce qui facilite ses applications. Par définition, le corps gris est un corps dont le pouvoir absorbant est indépendant de la longueur d'onde du rayonnement qu'il reçoit. Il est défini par  $\alpha_{\lambda,T} = \alpha_T$ . Son émittance est alors  $M_T = \alpha_T E_T$ . Ainsi, l'émissivité du corps gris est indépendante de la longueur d'onde.

## CONCLUSION

Ce chapitre a abordé les trois modes de transfert de chaleur, à savoir la conduction, la convection et le rayonnement. Nous avons examiné en détail les principes fondamentaux et les différentes lois qui régissent de chaque mode. L'équation générale de la conduction ainsi que la loi de Fourier, qui décrit le flux thermique à travers un matériau, ont été développées. Les concepts de résistance thermique pour les parois et les cylindres creux ont été traités, ainsi que les méthodes des quadripôles pour analyser les transferts unidirectionnels et radiaux. Le transfert de chaleur dans un milieu semi-infini a été étudié également. Une distinction a été faite entre la convection naturelle et forcée, en mettant l'accent sur la loi de Newton qui régit le transfert de chaleur par convection. La loi de Stefan-Boltzmann et l'importance de l'émissivité dans la réception du rayonnement par un matériau sont allées y exposer. Les lois de rayonnement telles que la loi de Planck, la loi de Wien et la loi de Kirchhoff ont également été explorées. Il est important de noter que les matériaux sont caractérisés thermiquement par diverses grandeurs, telles que la conductivité thermique, la diffusivité thermique, la chaleur spécifique, le facteur de réflexion, le facteur d'absorption et l'émissivité. Ces propriétés jouent un rôle essentiel dans l'analyse du comportement thermique de matériau. Le prochain chapitre approfondira ces différentes propriétés radiatives et conductives des revêtements de sol.

# CHAPITRE II : PROPRIÉTÉS RADIATIVES ET CONDUCTIVES DES REVÊTEMENTS DE SOL EXTÉRIEURS

## INTRODUCTION

Les revêtements de sol extérieurs (RSE) sont de matériaux de construction, naturel ou manufacturé, qui couvre le sol. Comme tout autre revêtement, ils servent de protection ou de décoration et sont spécifiquement adaptés pour résister aux passages des personnes, des animaux ou des engins. Ils sont largement répandus dans la construction urbaine et apportent des caractéristiques remarquables. Les RSE ont un impact significatif sur l'environnement urbain, en particulier en termes de température et d'énergie solaire absorbée ou réfléchi ([Hailu et al., 2020](#)). D'une part, leurs propriétés radiatives telles que l'albédo et l'émissivité jouent un rôle important dans la régulation thermique des surfaces. D'autre part, les propriétés thermiques, à savoir la conductivité thermique, la chaleur massique et la diffusivité thermique, influencent également leur température de surface. Ce présent chapitre explore alors ces différentes propriétés thermiques et radiatives de RSE.

### II.1. PROPRIÉTÉS DE REVÊTEMENTS DE SOL EXTÉRIEURS LIÉS AU RAYONNEMENT SOLAIRE

#### II.1.1. Albédo ou facteur de réflexion solaire

Vis-à-vis du rayonnement solaire, les propriétés des matériaux sont les mêmes que l'on a présentés dans le chapitre I, [paragraphe I.3.3](#). L'albédo est un agent climatique peu étudié et encore mal compris ([Gabrielle et al., 2005](#)). Le terme « albédo » vient du mot grec albus qui signifie blanc. Il a été inventé au 19<sup>e</sup> siècle par l'astronome américain George Philipps Bond. Il est à noter que ce terme est utilisé en climatologie pour dénommer la réflectivité ou le facteur de réflexion. L'albédo désigne le rapport de l'énergie solaire réfléchi par une surface sur l'énergie solaire totale qu'elle reçoit.

$$\rho = \frac{\text{Energie réfléchi}}{\text{Energie incidente}} \quad (\text{II-1})$$

Pour un « corps noir » parfaitement absorbant, l'albédo vaut 0. Un réflecteur parfait est caractérisé par une valeur de 1. Selon la NASA, l'albédo moyenne de globe est égal à 0.3 soit 30%. [Deléglise et al. \(2000\)](#) ont affirmé qu'il varie en fonction de l'angle d'incidence, de la nature de matériau, de son relief et de la longueur d'onde du rayonnement incident. Vis-à-vis de la réflectivité qui peut être spéculaire ou diffuse, les surfaces de matériau sont classées en deux catégories ([Carlos et al., 2017](#)).

Les surfaces spéculaires, telles que le verre, un miroir d'eau ou des métaux brillants, sont caractérisées par une réflectivité proche de zéro dans toutes les directions, sauf à l'angle de réflexion correspondant. En revanche, elle est la même dans toutes les directions pour les surfaces diffuses telles que les vêtements, le papier, l'asphalte et la peinture blanc mat.

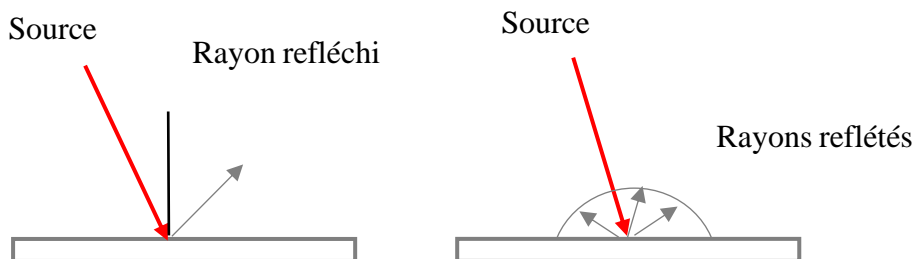


Figure 11: a) Réflexion spéculaire et b) réflexion diffuse

L'albédo est mesuré à l'aide de plusieurs appareils de mesure dont les plus couramment sont le pyranomètre, le radiomètre solaire et l'albédomètre (Akbari et al., 2015). Ce dernier utilise un détecteur de lumière sensible pour mesurer la quantité de rayonnement réfléchi par une surface. Il est souvent utilisé dans les études scientifiques et les mesures précises de l'albédo (Tzu-Ping et al., 2012).



Figure 12: Albédomètre

Le pyranomètre sert à mesurer le rayonnement solaire incident. Il mesure à la fois le rayonnement direct et diffus provenant du soleil. L'albédo est calculé en comparant la quantité de rayonnement solaire incident avec la quantité de rayonnement réfléchi par une surface. L'étude de Shengyang (2015) montre que cet appareil de mesure est performant par rapport aux autres.



Figure 13: Pyranomètre

Le radiomètre solaire mesure la puissance du rayonnement solaire sur une surface donnée. Il est également utilisé pour estimer l'albédo en mesurant à la fois le rayonnement solaire incident et le rayonnement réfléchi par la surface.



Figure 14: Radiomètre solaire

En 2016, [Bernardo et al.](#) ont développé une méthode pour calculer l'albédo de surface en utilisant les images OLI (Operational Land Imager). [Gabriel et al.](#) ont appliqué également cette méthode en 2020. Les données nécessaires au calcul de l'albédo ont été extraites de métadonnées de l'image : termes additifs et multiplicatifs de rayonnement et de réflectance et angle d'élévation du soleil. [Roesler et al. \(2016\)](#) ont affirmé que l'albédo varie avec l'heure de la journée, même spatialement sur les surfaces. Seule une valeur représentative peut être attribuée en comprenant qu'elle n'est pas nécessairement constante. Il est fortement affecté par le vieillissement des RSE. D'après l'étude réalisée par [Filippo et al. \(2017\)](#), il augmente avec l'âge. Le *tableau 1* nous donne différentes valeurs de l'albédo de revêtements de sol.

Tableau 1: Albédo de différents revêtements de sol (Colombert, 2008)

Matériaux	Albédo
Asphalte noir	0.1 – 0.3
Béton sombre	0.1 – 0.35
Pelouse	0.1 – 0.35
Ardoise	0.1 – 0.35
Béton clair	0.4 – 0.6
Brique rouge	0.4 – 0.6
Pierre	0.4 – 0.6
Pierre calcaire	0.7 - 0.9
Marbre blanc	0.7 - 0.9
Peinture blanche	0.7 - 0.9

L'asphalte présente une valeur d'albédo relativement basse allant de 0,1 à 0,3. Cela signifie qu'ils absorbent une grande quantité de lumière solaire. L'ardoise et la pelouse ont des valeurs similaires à ceux du béton sombre, généralement entre 0,1 et 0,35. Les revêtements de sol en pierre naturelle possèdent des valeurs plus élevées, variant de 0,4 à 0,9. Ils reflètent davantage la lumière solaire. Santamouris (2013) a confirmé que la couleur et la rugosité de la surface de RSE sont déterminantes de sa valeur. Les couleurs claires présentent une absorptivité plus faible au spectre du rayonnement solaire visible, tandis que l'absorptivité spécifique à la partie infrarouge est tout à fait indépendante de la couleur. La *figure 15* illustre l'albédo de différentes couleurs.

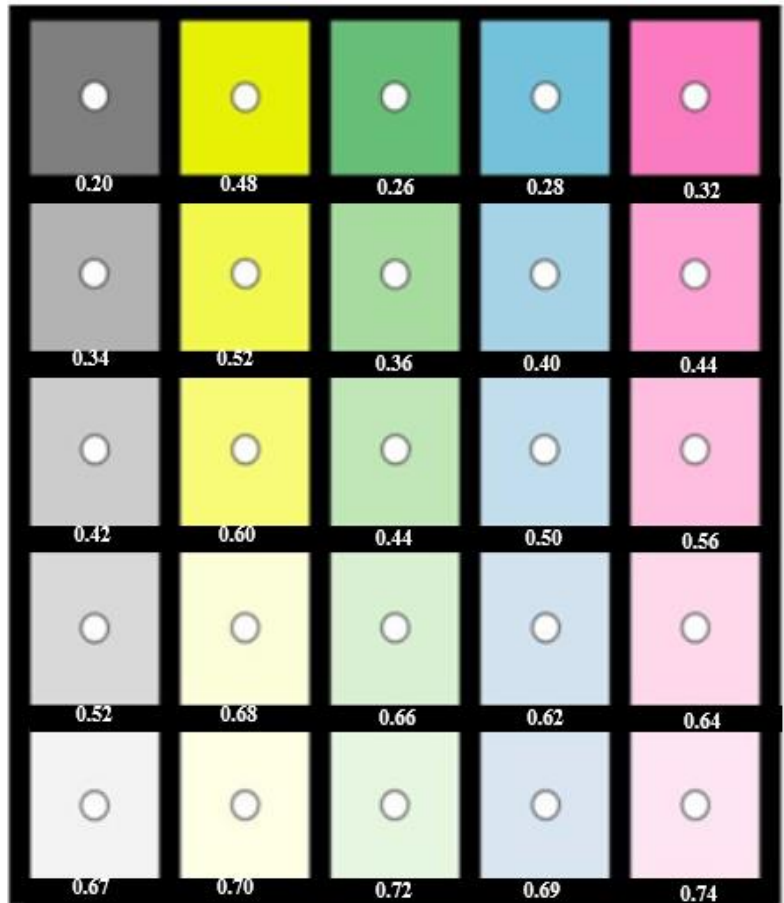


Figure 15: Albédo de quelques couleurs (Carlos et al., 2017)

### II.1.2. Facteur d'absorption solaire

Le facteur d'absorption est la capacité de matériau à absorber le rayonnement solaire. Pour le RSE, qui est un corps opaque, il est donné par la formule suivante :

$$\alpha = 1 - \rho \quad (\text{II-2})$$

Avec  $\rho$  représente son albédo. La plupart des études s'intéressent simplement à ce dernier.

### II.1.3. Émissivité

L'émissivité d'une surface est le rapport de l'énergie qu'elle rayonne par celle qu'un corps noir rayonnerait à la même température. C'est donc une mesure de la capacité d'un corps à absorber et à réémettre l'énergie rayonnée. D'après la loi de KIRCHOFF citée dans le paragraphe I.3.4.d du chapitre précédent, l'émissivité est égale au facteur d'absorption. Pour le cas de corps noir, qui absorbe et réémet toute l'énergie, elle est égale à l'unité. Pour un corps quelconque de température uniforme, elle est inférieure à un.

L'émissivité est donnée par l'équation suivante :

$$\varepsilon = \frac{\text{Energie émise par la surface}}{\text{Energie émise par une surface noire à la même température}} \quad (\text{II-3})$$

Pour déterminer la valeur de l'émissivité d'une surface, les instruments les plus couramment utilisés sont le pyromètre infrarouge, la caméra infrarouge et l'émissiomètre. Celui-ci s'agit d'un instrument spécialement conçu en utilisant des techniques de réflexion et de transmission de la lumière infrarouge pour déterminer l'émissivité relative d'un matériau par rapport à un corps noir.



Figure 16: Emissiomètre

Le pyromètre infrarouge utilise des capteurs infrarouges pour détecter le rayonnement thermique émis par la surface et calcule ensuite l'émissivité en comparant ce rayonnement avec celui d'un corps noir à une température connue.



Figure 17: Pyromètre infrarouge

Bien que les caméras thermiques soient principalement utilisées pour visualiser les variations de température, certaines caméras thermiques avancées permettent également de mesurer l'émissivité d'une surface. Ils utilisent des algorithmes sophistiqués pour compenser les effets de l'émissivité lors de la mesure des températures.



Figure 18: Caméra thermique

Les RSE émettent un rayonnement des grandes longueurs d'ondes en fonction de leur température et de leur émissivité (Santamouris, 2013). Les valeurs élevées de cette dernière correspondent à de bons émetteurs de rayonnement et favorisent la libération de l'énergie absorbée très facilement. Elle est le facteur le plus important affectant la température de surface pendant la période nocturne (Jooseng et al., 2007). Elle joue aussi un rôle important sur la température maximale et minimale pendant la journée autant que l'albédo.

Le *tableau 2* donne l'émissivité de quelques surfaces exposées au rayonnement solaire.

Tableau 2: Emissivité de quelques surfaces exposées au rayonnement solaire (Mohammed, 2018, Habiba et al., 2016)

Etendue	Caractéristiques	Emissivité
Sable nu	Sec	0.84 – 0.90
	Humide	0.91 – 0.95
Sol nu	Argileux sec	0.95
	Argileux humide	0.97
Surfaces artificielles	Béton	0.71 – 0.88
	Route bituminée	0.55 – 0.95
	Asphalte	0.95
	Brique	0.90 – 0.92
	Pierre	0.85 – 0.95
	Tuile	0.90
Surfaces agricoles	Prairies	0.90 – 0.95
	Cultures de blé, riz	0.90 – 0.99
	Vergers	0.90 – 0.95



Nous remarquons que l'émissivité de surfaces naturelles sont proches de 0.90, cela permet de dissiper plus efficacement la chaleur et de réduire l'absorption de chaleur dans l'environnement extérieur. Les surfaces agricoles et les forêts émettent presque 100% de l'énergie qu'elles absorbent.

## **II.2.PROPRIÉTÉS THERMIQUES CONDUCTIVES ET PHYSIQUES DE REVÊTEMENTS DE SOL EXTÉRIEURS**

### **II.2.1. Conductivité thermique**

D'après la définition citée dans le [paragraphe I.1.1](#), la conductivité thermique est une mesure des qualités isolantes ou conductrices d'un matériau. La connaissance de celle-ci est importante dans le choix des RSE à utiliser, qu'il s'agit de réduire ou, au contraire, de favoriser les échanges de chaleur. On distingue :

- Les isolants thermiques qui sont caractérisés par une faible conductivité (inférieure à  $0,17 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) ;
- Les matériaux thermiquement conducteurs constitués principalement par les métaux et les alliages et pour lesquels les conductivités sont supérieures à  $10 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  ;
- Les autres matériaux qui n'appartiennent pas à ces deux catégories.

Plusieurs méthodes sont utilisées afin de déterminer la conductivité thermique d'un matériau, parmi lesquelles les plus courantes sont la méthode de la plaque chaude, la méthode du fil chaud, la méthode du Flash, la méthode du Tricouche, la méthode du plan chaud, la méthode du ruban chaud et la méthode du « hot disc ». L'ouvrage d'[Yves \(2011\)](#) fournit des informations détaillées sur ces méthodes. Des résumés sont présentés dans l'[ANNEXE 6](#). Dans d'autres pays, divers dispositifs sont disponibles sur le marché pour mesurer cette grandeur. Quelques valeurs de la conductivité thermique de revêtements de sol extérieurs sont présentées dans *le tableau 3*. Selon [Santamouris \(2013\)](#), les RSE avec une conductivité thermique élevée permettent un transfert de chaleur plus rapide, ce qui peut être bénéfique dans les climats froids où il est important de garder les surfaces chaudes. En revanche, dans les climats chauds, ceux qui avec une conductivité thermique faible sont préférables, car ils réduisent le transfert de chaleur dans l'environnement environnant.

## II.2.2. Chaleur spécifique

La chaleur spécifique  $C_p$  est définie comme étant la quantité d'énergie requise pour augmenter la température d'une unité de masse d'un degré. Elle caractérise l'aptitude du matériau à emmagasiner de la chaleur. Ceci met en évidence l'importance de la chaleur spécifique pour tous calculs de stockage de chaleur ou de transfert de chaleur. Elle peut être calculée par la relation :

$$C_p = \frac{Q}{m \Delta T} \quad (\text{II-4})$$

Où  $Q$  est la quantité de chaleur,  $m$  représente la masse du corps et  $\Delta T$  est la différence de température. Ce paramètre est fonction de la structure moléculaire du matériau et de sa phase (solide, liquide ou gaz). Selon [Santamouris \(2013\)](#), la chaleur spécifique des RSE a un impact similaire sur les températures de surface maximales et minimales comme la conductivité thermique. Le *tableau 3* donne différentes valeurs de la capacité massique de RSE.

### II.2.1. Masse volumique

La masse volumique est le rapport entre la masse ( $m$ ) et le volume ( $V$ ) d'un RSE. Il s'agit d'une propriété matérielle importante qui affecte la température et la diffusivité thermique.

Tableau 3: Propriétés thermiques de quelques revêtements de sol ([Matthew et al., 2010](#), [Yves, 2011](#))

Revêtements de sol	Conductivité thermique ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	Chaleur massique ( $\text{J/kg. K}$ )	Masse volumique ( $\text{kg/m}^3$ )
Asphalte	0.74	900	2300
Ardoise	2.2	879	2400
Basalte	1.6	881	2850
Béton plein	1.80	878	2300
Bitume (cartonné)	0.23	1305	675
Brique terre cuite	1.15	878	1800
Calcaire dur	2.4	882	2450
Calcaire tendre	1	879	1650
Granite	3	881	2600
Gravier (vrac)	0.7	889	1800
Grès	2.6	880	2500
Marbre	2.5	881	2700
Schiste	2.2	879	2400

Parmi les revêtements de sol extérieurs, les pierres naturelles possèdent la conductivité thermique la plus élevée qui varie de  $2.2 \text{ W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  à  $3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , ce qui lui permet de transmettre rapidement la chaleur. Le béton et la brique en terre cuite transmettent de la chaleur de manière efficace puisqu'ils présentent des valeurs modérées, environ  $1.5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . La valeur la plus faible est enregistrée pour la famille de bitume approximativement  $0.23 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Ce dernier est un matériau idéal pour les revêtements de sol dans les régions où la chaleur doit être conservée. Il est remarqué que la chaleur massique de chaque matériau est quasiment identique.

### II.2.2. Capacité thermique volumique

La capacité thermique volumique représente la faculté d'un matériau à emmagasiner de la chaleur rapportée à son volume. Elle est définie par la chaleur nécessaire pour élever de  $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$  la température d'un mètre cube de matériau. Elle est obtenue en faisant le produit entre la masse volumique et la chaleur massique. De lourds matériaux denses tels que le béton, la brique et la pierre ont une capacité thermique volumique élevée. Ils absorbent et stockent la chaleur, et la transmettent petit à petit. C'est le paramètre le plus important pour l'absorption et le stockage de la chaleur. Plus elle est élevée, plus la capacité du matériau à absorber et à stocker la chaleur est importante. Selon [Santamouris \(2013\)](#), la conductivité thermique et la capacité thermique volumique sont les propriétés thermiques qui affectent la performance de RSE.

### II.2.3. Diffusivité thermique

La propagation de la chaleur dans un matériau dépend de sa diffusivité thermique « a », qui est le rapport de la conductivité thermique  $\lambda$  sur la capacité thermique volumique  $\rho C_p$  :

$$a = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (\text{II-5})$$

Exprimée en  $[\text{m}^2. \text{s}^{-1}]$ , la diffusivité thermique détermine la vitesse avec laquelle la chaleur se propage dans le matériau. Elle exprime donc la capacité de ce dernier à transmettre une variation de température. Elle intervient directement dans l'équation de transfert de la chaleur. Plus sa valeur est faible, plus le front de la chaleur mettra du temps à traverser l'épaisseur du matériau. [Hailu et al. \(2020\)](#) ont affirmé que le paramètre thermophysique le plus important lié au transfert de chaleur par conduction est la diffusivité thermique du matériau. Ces propriétés font l'objet de recherches depuis de nombreuses années par de nombreux auteurs ([Rositsa et al., 2018](#)).

Cependant, il n'y a pas de valeurs uniformes pour les matériaux de revêtements de sol, car elle dépend fortement de la composition du mélange, de sa masse volumique, de sa température et de sa méthode de fabrication. Les revêtements de sol avec une diffusivité thermique élevée peuvent contribuer à réduire sa température de surface en permettant une répartition plus uniforme de la chaleur dans l'environnement environnant.

Tableau 4: Diffusivité et effusivité thermique de quelques revêtements de sol (Matthew et al., 2010, Yves, 2011)

Revêtements de sol	Diffusivité thermique $\times 10^7$ (m <sup>2</sup> /s)	Effusivité thermique b (J.m <sup>-2</sup> . °C <sup>-1</sup> . s <sup>-1/2</sup> )
Asphalte	3,6	1237,7
Ardoise	10,4	2154,3
Basalte	6,4	2004,3
Béton caverneux	8,4	1529,1
Béton plein	8,7	1879,9
Bitume (cartonné)	2,6	450,1
Brique terre cuite	7,3	1348,1
Calcaire dur	11,1	2277,3
Calcaire tendre	6,9	1204,3
Granite	13,1	2621,4
Gravier (vrac)	4,4	1058,4
Grès	11,8	2391,7
Marbre	10,5	2438,6
Schiste	10,4	2154,3

D'après les données du *tableau 4*, la pierre naturelle présente une diffusivité thermique relativement élevée, ce qui favorise une transmission rapide de la chaleur. En revanche, l'asphalte restreint efficacement la dissipation rapide de cette dernière en raison de sa faible valeur de diffusivité.

#### II.2.4. Effusivité thermique

L'effusivité thermique ou coefficient de transmission surfacique « b » traduit l'aptitude d'un matériau à échanger de l'énergie thermique avec son environnement. Ainsi, elle représente la capacité d'un matériau à absorber l'énergie et à la restituer. À la déférence de la diffusivité thermique qui décrit la rapidité du déplacement de la chaleur à travers la masse d'un matériau, l'effusivité décrit la rapidité avec laquelle un matériau absorbe la chaleur. Ainsi une effusivité élevée limite les valeurs du gradient de température. Le comportement ou la réaction des couches superficielles des matériaux, en particulier au niveau des surfaces à l'intérieur de la pièce, est caractérisé par l'effusivité du matériau qui les constitue. Elle évolue en fonction de la conductivité thermique et de la capacité thermique volumique et calculée par la relation suivante :

$$b = \sqrt{\lambda \rho C_p} = \frac{\lambda}{\sqrt{a}} \quad (\text{II-6})$$

#### II.2.5. Inertie thermique

L'inertie thermique peut être considérée comme la capacité des matériaux à maintenir stable sa température intérieure malgré les variations de la température extérieure. Ainsi, elle gère la transmission des variations de température et le stockage des flux thermiques dans les matériaux. Selon [Jean Louis \(2006\)](#), elle est définie comme une propriété de matériau à s'opposer aux variations de température. Pour [Liebard \(2005\)](#), elle est une notion qui recouvre à la fois l'accumulation de la chaleur et sa restitution progressive au moment venu, avec un décalage dans le temps appelé déphasage. On peut donc définir simplement l'inertie thermique d'un matériau comme sa capacité à stocker de la chaleur et à la restituer petit à petit, afin d'atténuer les variations des températures internes. Pour les revêtements de sol, elle dépend en grande partie des propriétés thermiques des matériaux qui la constituent. Elle peut être évaluée à l'aide des deux propriétés à savoir la diffusivité thermique et l'effusivité thermique.

##### a. Inertie thermique de transmission

L'inertie thermique de transmission s'oppose au transfert du flux à travers le matériau et ce sont les matériaux opaques exclusivement qui sont concernées. Elle agit en résistant à la variation de température extérieure due aux amplitudes thermiques du climat et aux effets du rayonnement solaire. Vis-à-vis de cette variation extérieure, ce type d'inertie fait appel principalement à la diffusivité thermique « a » du RSE ([Cf. Paragraphe II.2.3](#)). Avec une faible diffusivité, les variations de température seront fortement retardées. En effet, la diffusivité thermique commande la vitesse de transmission d'une variation de température à travers celui-ci.

## **b. Inertie thermique par absorption**

L'inertie thermique par absorption réduit les variations internes de la température, due à l'intermittence des sources de chaleur interne en absorbant la chaleur. Ce sont les parties à l'intérieur de RSE qui sont concernées. Par absorption de la chaleur, ce type d'inertie devient prépondérant donnant toute son importance à l'effusivité thermique « b » (Cf. [Paragraphe II.2.4](#)). En absorbant facilement les flux de chaleur, un revêtement de sol effusif s'échauffera peu et limitera les variations de température interne.

### **II.2.6. Perméabilité**

La perméabilité est la mesure de la capacité des revêtements de sol à transmettre l'eau. En d'autres termes, la facilité avec laquelle l'eau peut s'écouler à travers le volume. Il est important de noter que la texture et la structure de l'agrégat peuvent l'affecter. La taille et le nombre de pores sont étroitement liés à ces facteurs. En général, plus la texture des particules est fine, plus la zone de contact des particules est élevée et donc plus la perméabilité est lente. D'autre part, la porosité d'un matériau est généralement définie comme le rapport entre le volume des pores et le volume total de la substance. Elle est également liée à la taille des vides et à la zone de contact des particules. Par conséquent, le flux de chaleur de la substance peut être grandement affecté par la porosité. Plus cette dernière est faible, plus la performance de transfert de chaleur est plus élevée ([Tina, 2013](#)).

Tableau 5: Porosité de revêtements de sol ([Asaeda et al.,1996](#))

Matériau	Porosité (%)
Asphalte	8.9
Sol	16.5
Macadam	38.4
Sable	30.0

## II.3.STOCKAGE DE L'ÉNERGIE THERMIQUE

Le stockage de l'énergie thermique est le processus de capturer, de conserver et de libérer de l'énergie sous forme de chaleur. Celui-ci peut se faire par une simple variation de température (stockage à chaleur sensible), par un changement de phase (stockage à chaleur latente), par une transformation physique (adsorption) ou une réaction chimique (stockage thermochimique). C'est le type de transformation de matériaux qui désigne le mode de stockage de l'énergie. Pour l'énergie thermique, elle peut être stockée suite à l'élévation de température qui modifie l'énergie interne du matériau. Les techniques de stockage de l'énergie thermique sont illustrées sur la *figure 19*. Les deux voies principales sont le stockage par la chaleur sensible et le stockage par chaleur latente. La sélection est fonction de la durée de stockage et de la température désirée (Hongois, 2011).

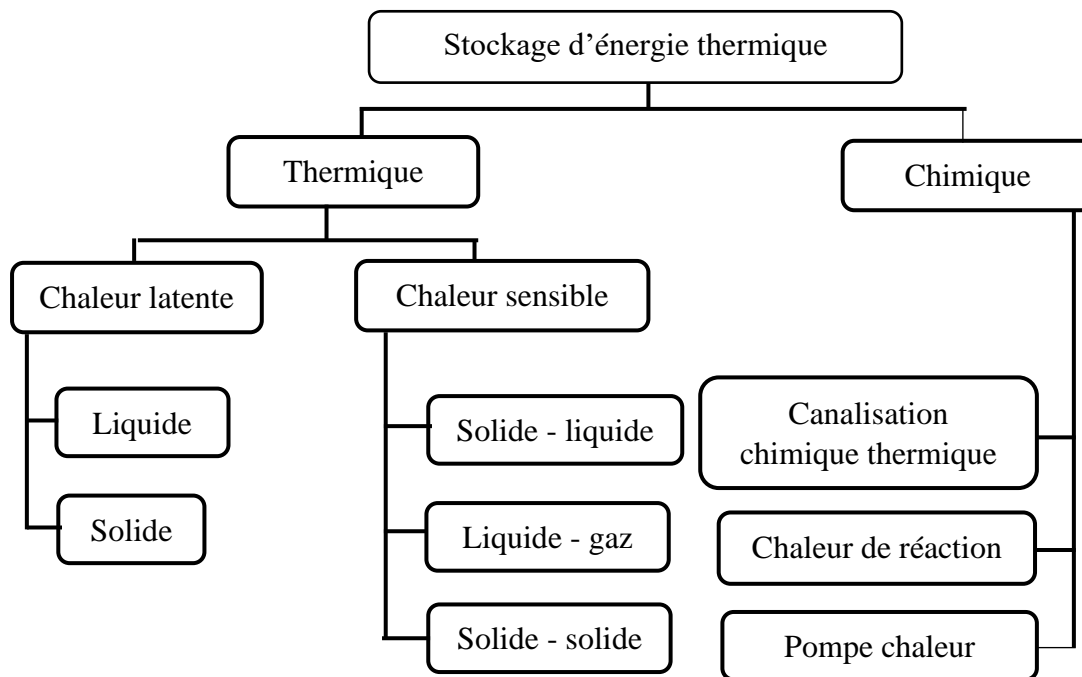


Figure 19: Les différentes techniques de stockage de l'énergie thermique (Akrouche, 2011)

### II.3.1. Stockage par chaleur sensible

Ce mode de stockage est le moyen le plus ancien utilisé pour emmagasiner de l'énergie sur des durées plus ou moins longues par l'utilisation d'une source de chaleur pour élever la température de matériau sans changement d'état. L'énergie stockée est généralement faible à cause de la faible densité de stockage, ce qui implique des volumes de stockage importants.

Cette énergie s'exprime en fonction de la chaleur massique des matériaux  $C_p$  et s'écrit de la manière pour une variation de température  $T_2 - T_1$  :

$$E_{m,sens} = mC_p(T_2 - T_1) \quad (\text{II-7})$$

L'utilisation la plus courante de la chaleur sensible est le stockage thermique saisonnier par des systèmes à grande échelle (stockage souterrain) (Hongois, 2011).

### II.3.2. Stockage par chaleur latente

Ce mode de stockage permet de stocker l'énergie par chaleur latente à une température constante qui correspond à la température de changement de phase ou changement d'état physique de la paroi. Le changement d'état à température constante permet essentiellement de réguler la température dans les applications de chauffage ou de climatisation des bâtiments. Le changement de phase solide-liquide, dont la variation volumique est faible, permet de stocker une grande énergie sous forme de chaleur latente avec des variations faibles de température. Un matériau à changement de phase stocke en premier lieu l'énergie sous forme de chaleur sensible et lorsque la température extérieure atteint sa température de changement de phase, le matériau change d'état, provoquant une rupture des liaisons entre les chaînes moléculaires constituant le matériau. La *figure 20* décrit la relation entre l'élévation de la température et l'enthalpie d'un matériau au cours et en dehors d'un changement de phase.

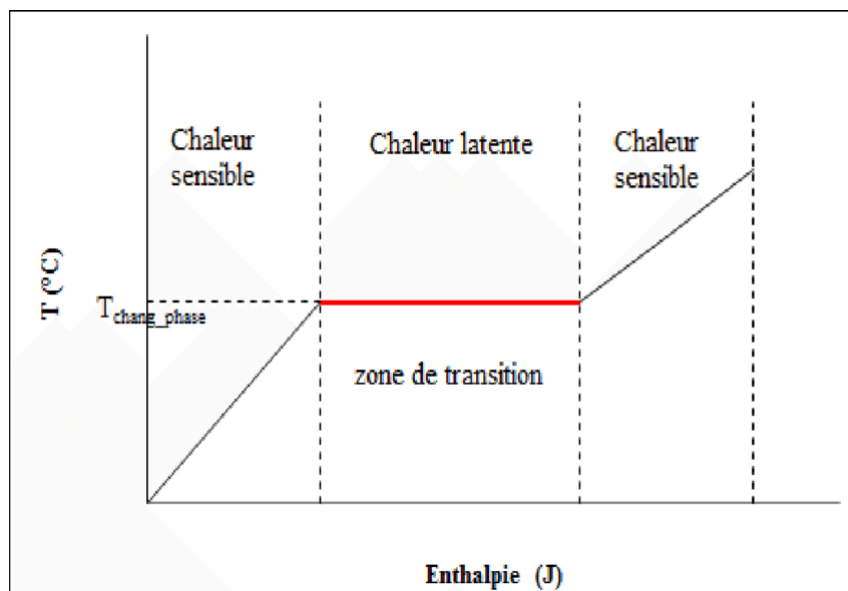


Figure 20: Relation Température/Enthalpie (Laghzaoui, 2010)



Le changement d'état d'un matériau pur se fait à température constante et l'énergie sera stockée par chaleur latente jusqu'à la transformation complète d'un état à un autre. Le surplus d'énergie sera stocké sous forme de chaleur sensible (Laghzaoui, 2010). L'énergie massique stockée s'écrit de la manière suivante :

$$E_{m, \text{lent}} = \Delta H_{\text{latente}} = m \int C_p dt + C^{te} \quad (\text{II-8})$$

Où  $\Delta H_{\text{latente}}$  est l'enthalpie massique de transformation ou de changement de phase. Le stockage de l'énergie thermique dans les matériaux joue un rôle très important. Il permet d'amortir et de lisser les fluctuations thermiques et de maintenir une température moyenne acceptable dans ces derniers pendant un certain nombre d'heures.

## CONCLUSION

Ce chapitre a pour but de présenter les différentes propriétés thermiques et radiatives de revêtements de sol. Nous avons constaté que l'albédo de ces revêtements varie généralement entre 0,1 et 0,9. Il varie en fonction de la couleur et la texture de leur surface. Il est observé que les matériaux de couleur sombre ont une tendance à avoir une faible valeur d'albédo, tandis que ceux de couleur claire sont plus réfléchissants. L'albédo peut être mesuré à l'aide de capteurs ou par des méthodes de mesure numériques. L'émissivité des revêtements de sol se situe entre 0,55 et 0,95. Nous avons développé les différentes méthodes pour déterminer la conductivité thermique des revêtements de sol. La pierre naturelle a une conductivité thermique élevée environ 3 W/m. K, tandis que l'asphalte présente une valeur la plus faible égale à 0.23 m. K. La chaleur massique des revêtements de sol est souvent similaire d'un matériau à un autre. Il est à noter que la conductivité et la capacité thermique volumique ainsi que l'albédo sont les facteurs qui affectent la performance thermique de revêtements de sol. Le chapitre suivant abordera la notion de la climatologie urbaine et ses aspects liés aux revêtements de sol.

## CHAPITRE III : CLIMATOLOGIE URBAINE

### INTRODUCTION

La climatologie urbaine est définie comme la science qui étudie le climat de la ville. Elle est aujourd'hui un domaine de recherche investi à la fois par les climatologues et les géographes, mais également par les architectes et les urbanistes. Elle fournit des outils et des approches pour évaluer l'impact des villes sur le climat et vice versa (NAJJAR et al., 2010). Colombert (2008) a affirmé que les bâtiments, l'organisation urbaine, les activités industrielles, les transports et l'espace public constituent les facteurs qui interviennent le climat urbain. Ils comprennent à la fois les activités humaines, les sources de pollution atmosphérique, les rejets de chaleur, la nature et la structure de la surface urbaine. Ces dernières rassemblent la route, le pavage, la végétation, le sol naturel, la surface d'eau, la morphologie du cadre bâti et la géométrie urbaine. Ainsi, la structure d'une ville peut être contrôlée par la planification urbaine et l'aménagement urbain. Il est alors possible selon Givoni (1998) de modifier le climat urbain par le biais des règles d'urbanisme et par la conception des zones périurbaines voisines et des nouvelles villes. Le chapitre suivant aborde sur les théories de la formation de climat urbain.

### III.1. BILAN THERMIQUE D'UNE VILLE

#### III.1.1. Échelles

L'étude du climat urbain nécessite de distinguer différentes échelles (Oke, 2006). À l'horizontal, trois échelles peuvent être distinguées en climatologie : la micro-échelle, l'échelle locale et la méso-échelle (Oke, 2006).

- La méso-échelle ( $10^4$  à  $2 \times 10^5$  m) correspond à la zone influencée par exemple par la présence d'une agglomération. Une unique station ne peut pas représenter cette échelle
- L'échelle locale ( $10^2$  à  $5 \times 10^4$  m) correspond à l'échelle pour laquelle sont conçues les stations météorologiques, c'est-à-dire que les caractéristiques de la zone étudiée, comme la topographie, sont prises en compte, mais pas les effets micro. Dans le cas d'une zone urbaine, l'échelle locale correspond à un quartier pour lequel il peut être trouvé une unité dans le développement urbain.
- La micro-échelle ( $10^{-2}$  à  $10^3$  m) permet de distinguer le microclimat qui existe au niveau d'un bâtiment, d'une rue, d'un arbre, d'un jardin, d'une cour. En effet, à faible distance, il peut être observé des différences de températures de quelques degrés et le flux d'air est également perturbé par le moindre objet. Dans l'idéal, les stations urbaines devraient éviter ces influences microclimatiques mais, en réalité, ceci est difficilement réalisable. Nous avons choisi cette échelle pour le cas de notre étude.

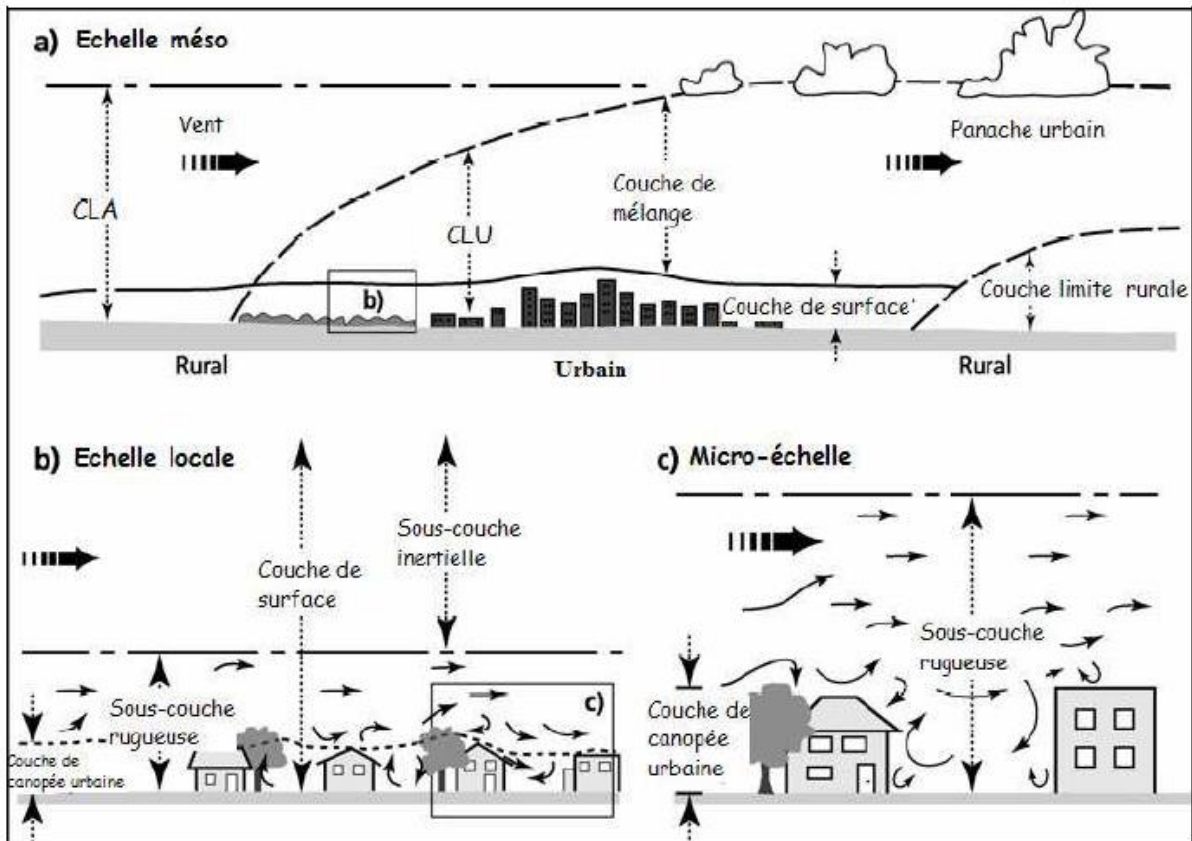


Figure 21: Représentation schématique de la couche limite urbaine (CLU) à méso-échelle (a), à l'échelle locale (b) et à micro-échelle (c) (Pierre et al., 2015)

### III.1.2. Bilan thermique d'une ville

Dans une ville, suite aux variations des paramètres du climat, de multiples échanges énergétiques se créent à partir des différents aménagements et activités urbains qui s'y trouvent. Ce qui explique la formation d'un microclimat bien déterminé (Mohammed, 2018). Colombert (2008) a étudié le rôle prédominant des paramètres radiatifs dans le bilan d'énergie d'une ville. Il a testé la sensibilité de ce bilan à différents facteurs tels que le bâtiment, l'espace public, l'organisation urbaine, les activités industrielles et les transports. En effet, le bilan thermique d'une surface urbaine est la somme algébrique des flux énergétiques qu'elle échange avec son environnement. Il permet d'appréhender la majorité des perturbations générées par une ville. L'équation III-1 récapitule ce bilan (Bouyer, 2009).

$$Q_R + Q_F = Q_H + Q_L + \delta Q_S + \delta Q_A \quad (\text{III-1})$$

Les gains sont l'énergie thermique provenant du soleil ( $Q_R$ ) et d'origine anthropique ( $Q_F$ ). Par contre, le flux de chaleur latente ( $Q_L$ ), le flux de chaleur sensible ( $Q_H$ ), la variation de la quantité

de chaleur stockée par la zone urbaine ( $\delta Q_S$ ) et le flux de chaleur advectif ( $\delta Q_A$ ) constituent les déperditions.

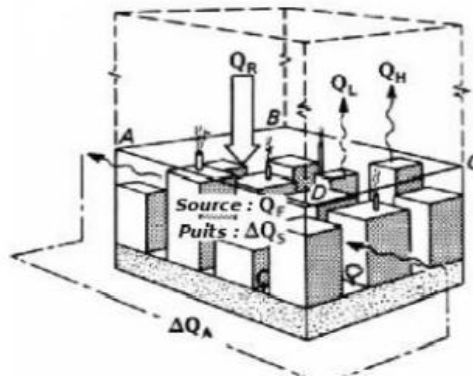


Figure 22: Bilan énergétique pour une zone urbaine (Fahed, 2018)

#### a. Rayonnement net ( $Q_R$ )

Le rayonnement net correspond au rayonnement de courtes et grandes longueurs d'onde « capturé » ou perdu par la surface étudiée. Il est le résultat du bilan radiatif. Tous les termes de ce bilan sont affectés par le milieu urbain, que ce soit dû à sa géométrie, aux matériaux ou encore à la pollution atmosphérique qui y règne.

#### a. Chaleur d'origine anthropique ( $Q_F$ )

La chaleur anthropique représente la chaleur générée par les sources mobiles et stationnaires d'une zone. Elle correspond à la somme de production de chaleur des véhicules, de l'industrie, des bâtiments et des équipements urbains. Cette chaleur est par la suite convertie en rayonnements, en flux turbulent de chaleur ou encore en flux de chaleur stockée. Elle est étroitement liée à la taille et à la densité de la ville, à ses fonctions et à son industrialisation, ainsi qu'à la zone climatique et aux besoins de chauffage ou de climatisation.

#### b. Variation de quantité de chaleur stockée ( $\delta Q_S$ )

Elle est définie par la variation de la quantité de chaleur stockée par la zone urbaine. Les phénomènes radiatifs et thermiques conduisent à une accumulation de la chaleur au sein des matériaux et du sol. Cette énergie est restituée à l'atmosphère principalement durant la nuit et constitue durant cette période une des principales sources de chaleur. Il n'existe à l'heure actuelle pas de méthode permettant de mesurer directement la quantité de chaleur stockée au sein de l'environnement urbain (Roberts et al., 2003). Cette valeur est souvent déduite par le biais de méthode alternative comme la déduction par rapport aux autres termes du bilan d'énergie.

### c. Flux de chaleur latente ( $Q_L$ )

Le flux de chaleur latente est l'énergie échangée par un corps lors de son changement de phase. Le paragraphe sur l'inertie thermique développe la notion de la chaleur latente (Cf. [Paragraphe II.3](#)). Dans le cas des villes, ce flux est dû à la vapeur d'eau dégagée par les sols, les végétaux et les surfaces poreuses. L'imperméabilisation du milieu urbain et la diminution de la présence de végétaux modifie considérablement les flux de chaleur latente.

### d. Flux de chaleur sensible ( $Q_H$ )

L'échange de chaleur sensible par convection thermique est dû aux transferts aérodynamiques de chaleur entre les surfaces solides et la masse d'air, du fait de leur différence de température. C'est une des causes majeures de la présence d'un îlot de chaleur urbain. Il est alimenté à la fois par les rejets de chaleur d'origine anthropique et par la chaleur stockée au sein du sol et des bâtiments. Le concept sur le stockage de chaleur latente est cité dans le [paragraphe II.3](#) du premier chapitre. Selon [Colombert \(2008\)](#), le refroidissement radiatif plus rapide que la baisse de la température de l'air met en évidence le rôle du flux de chaleur sensible dans le réchauffement de l'atmosphère.

### e. Flux de chaleur advectif ( $\delta Q_A$ )

Le flux advectif correspond à la quantité de chaleur fournie ou prélevée à la masse d'air circulant dans le volume fictif et associé à l'élément de surface urbaine. Il dépend de l'écart de température de l'air qui entre et qui sort du volume considéré. Ce flux est donc dû au gradient spatial de température, l'humidité et de vent. L'étude de [Pigeon et al. \(2007\)](#) citée par [Fahed, \(2018\)](#) a considéré que le flux advectif est négligeable pour les sites ayant une forme horizontale étendue et relativement homogène et est ainsi souvent négligé en milieux urbains.

## III.1.3. Bilan radiatif au-dessus d'une ville

Si l'on considère la surface d'échange comme étant une surface fictive se trouvant au niveau de la hauteur moyenne des bâtiments pour la ville, le bilan radiatif exprime la quantité de rayonnement absorbée par sa surface et la quantité de rayonnement émise vers l'atmosphère. Il peut s'écrire de la façon suivante :

$$Q_R = (1 - \rho) R_G \downarrow + R_A \downarrow - R_T \uparrow \quad (\text{III-2})$$

P : albédo moyen de la surface d'une ville,

$Q_R$  : rayonnement net ou bilan radiatif,

$R_G$  : rayonnement solaire global reçu sur une surface horizontale,

$R_A$  : rayonnement atmosphérique descendant de grande longueur d'onde (atmosphère – sol),

$R_T$  : rayonnement terrestre de grande longueur d'onde émis par la surface (sol – atmosphère).

### **b. Rayonnement solaire global**

Le rayonnement solaire subit, lors de son passage à travers les couches atmosphériques, une double atténuation due aux phénomènes d'absorption et diffusion. Deux types de rayonnement peuvent ainsi être distingués au niveau de la surface : le rayonnement solaire direct et le rayonnement rediffusé par la voûte céleste, ou rayonnement diffus. Le rayonnement solaire global est donc la somme de ces deux composantes et il est donné par la formule suivante :

$$R_G = D + I \sin h \quad (\text{III-3})$$

$R_G$  : le rayonnement solaire global,

$D$  : le rayonnement solaire diffus,

$I$  : le rayonnement solaire direct,

$h$  : la hauteur du soleil

Le rayonnement solaire, première source d'apports thermiques, a un spectre de longueurs d'onde compris approximativement entre 0.3 et 2.5  $\mu\text{m}$ . On divise souvent ce domaine de rayonnement en 3 sous-domaine, celui des visibles (0.4 à 0.7  $\mu\text{m}$ ), une partie des ultra-violets (0.2 à 0.4  $\mu\text{m}$ ) ainsi que le domaine des rayons infrarouges (0.76-2.5  $\mu\text{m}$ ) (Maxime, 2010). En effet, ces rayonnements sont principalement de courtes longueurs d'onde. Selon ASTM (American Society for Testing and Materials), l'énergie contenue dans ces spectres est d'environ 5% pour l'Ultra-Violet, 46% pour les Visibles et 49% pour les Infra-Rouge.

### **c. Rayonnement réfléchi**

Le rayonnement réfléchi est donné par l'albédo de la zone urbaine, qui dépend à la fois de la géométrie du cadre bâti et des matériaux de construction. Les matériaux urbains présentent des albédos variés, mais en moyenne, plus faibles que ceux observés pour des surfaces naturelles (Tableau 1). La morphologie urbaine, c'est-à-dire l'arrangement géométrique des composants urbains et le piégeage du rayonnement, participe également à une diminution de l'albédo des zones urbaines.

#### **d. Rayonnement atmosphérique descendant de grande longueur d'onde**

Les éléments présents dans l'atmosphère comme l'air, la vapeur d'eau, le gaz carbonique, le nuage et les aérosols émettent un rayonnement thermique de grande longueur d'onde. La surface du sol reçoit ainsi une certaine quantité de rayonnement descendant du domaine infrarouge. Son intensité dépend essentiellement de la température et de la composition chimique de la couche limite urbaine. Sa valeur peut être déterminée par les données météorologiques ou explicitée par des formules empiriques (Vinet, 2000).

#### **e. Rayonnement de grande longueur d'onde émis par le milieu**

Tout corps ayant une température  $T_s$  et se comportant comme un corps gris émet un rayonnement thermique dans toutes les directions et la densité de ce rayonnement est défini par la loi de Stéphan Boltzmann (Cf. Paragraphe I.3.1) :

$$R_T = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (\text{III-4})$$

$\varepsilon$  : émissivité de la surface

$\sigma$  : constante de Stefan Boltzmann

$T$  : température de la surface

Le rayonnement thermique émis par le milieu dépend de la température de surface et de l'émissivité des matériaux constituant le sol. En milieu urbain, les matériaux ont de manière générale des températures de surface plus élevées que les matériaux plus naturels voisins, ainsi le rayonnement thermique ascendant est plus important en zone urbaine, et ce, particulièrement en milieu de journée, heure à laquelle les matériaux ont eu le temps de se réchauffer (Vinet, 2000).

#### **III.1.4. Balance thermique au niveau de la surface de revêtements de sol**

La balance thermique est déterminée par la quantité de rayonnement solaire absorbé et de rayonnement infrarouge émis, la chaleur est transférée par convection vers l'air atmosphérique. Elle est stockée dans le RSE et conduite dans le sol. Quand le phénomène de chaleur latente est présent, l'évaporation ou la condensation affecte le régime thermique de ses surfaces.

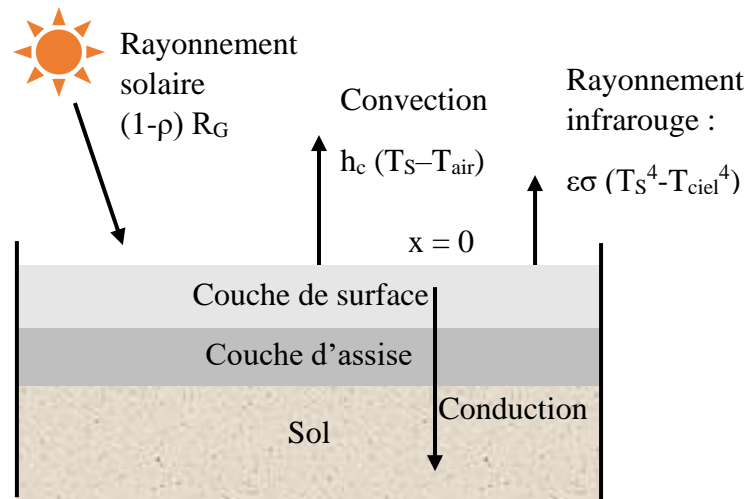


Figure 23: Balance thermique à la surface de revêtement de sol (Shengyang, 2015)

Le rayonnement solaire  $R_G$  venant du soleil est absorbé et reflété par le RSE en fonction de son albédo. Il est donné par la formule de l'équation III-5 :

$$Q_{\text{réfléchi}} = \rho R_G \quad (\text{III-5})$$

$\rho$  : l'albédo de sa surface.

En outre, il émet également de rayonnement suivant l'équation de Stefan-Boltzmann, comme on a montré dans le paragraphe I.3.1 du premier chapitre.

$$Q_{\text{émis}} = \varepsilon \sigma (T_S^4 - T_{\text{ciel}}^4) \quad (\text{III-6})$$

Avec  $\varepsilon$  est l'émissivité de sa surface,  $T_S$  est sa température de surface,  $T_a$  est la température de l'air et  $\sigma$  est la constante de Stefan-Boltzmann. Certaines études ont utilisé la seule température de l'air ambiant pour calculer le rayonnement entre ses surfaces et l'atmosphère (Matthew et al., 2010). L'équation empirique suivante estime la température du ciel.

$$T_{\text{ciel}} = T_{\text{air}} \left( 0.8 + \frac{T_{\text{dp}}}{250} \right)^{0.25} \quad (\text{III-7})$$

$T_{\text{dp}}$  : température du point de rosée

Le RSE perd la chaleur vers l'air par convection si celui-ci possède une température inférieure à la surface. D'après ce qu'on a cité dans la loi de Newton du paragraphe I.2.2, l'équation suivante est utilisée.

$$Q_{\text{convection}} = h_c (T_S - T_{\text{air}}) \quad (\text{III-8})$$

$h_c$  représente le coefficient de convection.



En milieu extérieur, il est donné par les formules suivantes (Filippo et al., 2017) :

$$h_c = 5.8 + 4.1 V_v \text{ pour } V_v < 5 \text{ m/s} \quad (\text{III-9a})$$

$$h_c = 7.3 V_v^{0.78} \text{ pour } V_v > 5 \text{ m/s} \quad (\text{III-9b})$$

Quelques valeurs et corrélations empiriques permettent d'explicitier ce coefficient d'échange convectif sont déjà citées dans le [paragraphe I.2.2](#).

De plus, le RSE conduit la chaleur vers le sol par conduction. Le flux peut être modélisé à l'aide de la loi de Fourier (Cf. [Paragraphe I.1.1](#)) pour différentes couches. Ces dernières peuvent donc être considérées comme un milieu semi-infini s'étendant vers le bas de la surface du revêtement à la profondeur  $x$  où  $\Delta T$  tend vers 0 (Cf. [Paragraphe I.1.7](#)).

En résumé, le bilan thermique au niveau de la surface de RSE est alors donné par l'équation suivante (Matthew et al., 2010) :

$$\rho_m C_{pm} \Delta e \frac{T_s^{i+1} - T_s^i}{\Delta t} = (1 - \rho) R_G - h_c (T_s - T_{air}) - \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{ciel}^4) - \lambda \frac{T_s^i - T_l^i}{\Delta e} \quad (\text{III-10})$$

Indice supérieur  $i$  : compteur de pas temporel

Indice inférieur  $m$  : numéro de la couche

Le premier membre de cette équation donne l'énergie thermique stockée dans le RSE pendant une journée. Le deuxième membre représente les gains et les déperditions. L'énergie thermique provenant du rayonnement solaire à ondes courtes est un gain, tandis que la convection de l'air et l'échange du rayonnement à ondes longues et la conduction thermique peuvent être de gains ou de pertes.

### III.2. PHÉNOMÈNE D'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN

Luc Howard a été le premier à prédire que la température dans la zone urbaine serait supérieure de celle des zones rurales (Howard, 1833). Les travaux de Chandler (1970, 1976) et surtout de Tim Oke (1974, 1979) ont permis de fixer les caractéristiques de l'îlot de chaleur urbain et leurs effets sur les villes. La différence de température entre celle observée dans une ville et celle observée dans une zone avoisinante peut atteindre une valeur considérable. Selon Oke (1988), les écarts de température peuvent aller de 2 °C pour une ville de 1 000 habitants à 12 °C pour une mégapole de plusieurs millions d'habitants. Récemment, ce phénomène a fait l'objet de nombreux travaux de recherche. Pour la ville d'Antananarivo, Arsonina et al., (2018) ont confirmé que l'îlot de chaleur dans la ville d'Antananarivo existe. La cartographie des températures montre que l'intensité de l'ICU est plus prononcée dans certaines zones comme Analakely, 67 ha, Anosibe, Soanierana, Ambanidia (Radanielina, 2019).

La *Figure 24* illustre ce phénomène montrant une différence de température entre les zones rurales et le centre-ville d'Antananarivo.

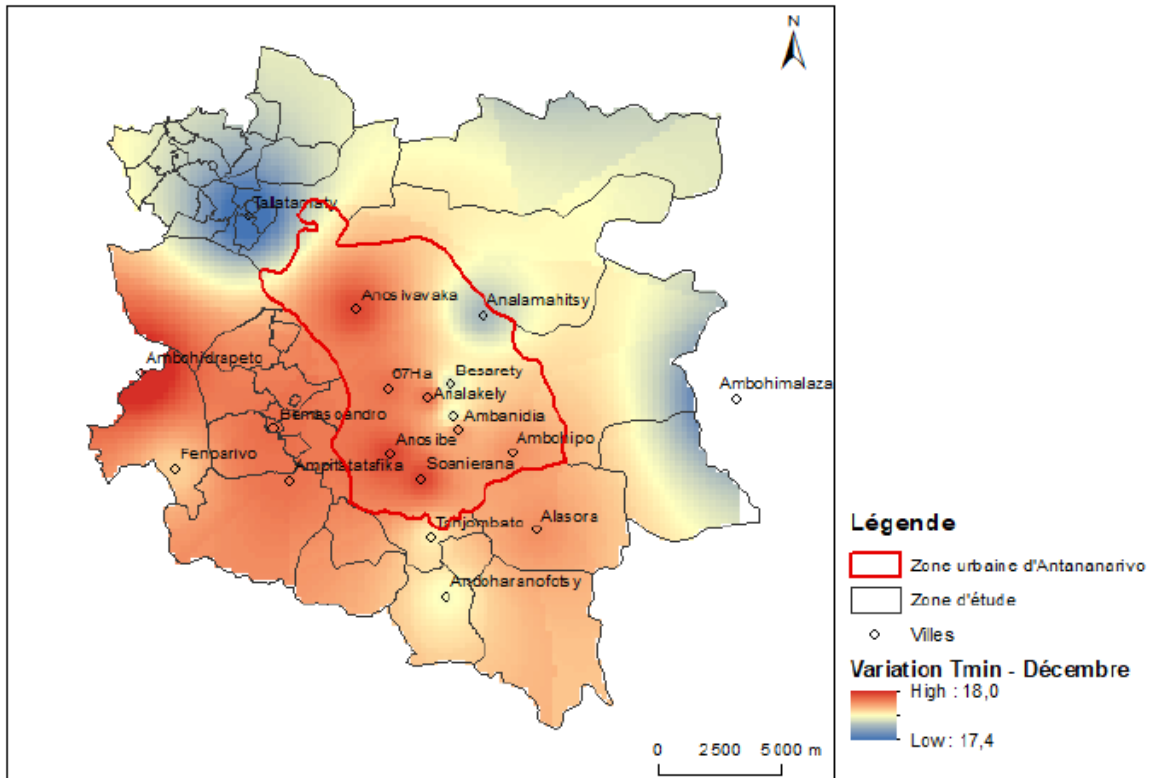


Figure 24: Carte représentant les températures minimales en décembre de la zone urbaine d'Antananarivo (Radanielina, 2019 )

### III.2.1.Types d'ICU

#### a. Îlot de chaleur surfacique

L'îlot de chaleur surfacique se situe aux surfaces directement exposées au rayonnement solaire comme les toitures et les revêtements de sol extérieurs. Cet îlot existe durant la journée et la nuit, mais il est plus important durant la journée du fait des rayonnements solaires. Il varie selon les saisons et est maximal durant l'été.

#### b. Îlot de chaleur atmosphérique

L'îlot de chaleur atmosphérique est défini par la différence de température de l'air entre le centre-ville et les zones environnantes. Selon Oke (1976), ce type d'îlot se divise en deux :

- La canopée urbaine correspond à une couche d'air partant du sol urbain arrivant au sommet des toitures des bâtiments ou au sommet d'un arbre. En effet, l'interaction entre les structures urbaines et les paramètres micro-météorologique engendre des mouvements de turbulence qui rendent la canopée urbaine souvent perturbée (Athamena, 2012). Elle est la plus signifiante dans l'activité humaine (Roesler et al., 2016)

- La couche limite s'étend du sommet des toitures des bâtiments jusqu'à plusieurs dizaines de mètres au-dessus des toitures. La distance entre la surface du sol et la limite de la couche urbaine ne dépasse pas les 1.5 km. Selon [Oke \(1982\)](#), cette distance est entre 0.5 et 1.5 km. Il est à noter qu'au-delà de cette couche, l'atmosphère n'est pas influencée par la surface urbaine.

### **III.2.2. Origines de l'îlot de chaleur urbain**

L'apparition des îlots de chaleur urbains est due à la combinaison de facteurs anthropiques et les facteurs naturels. Les trois principales catégories de ces derniers sont la climatologie, la météorologie et la topographie de la ville. Ces facteurs ne peuvent pas être influencés par la planification urbaine. A contrario, les facteurs humains ou anthropiques sont l'urbanisation, la forme architecturale des villes, les revêtements des matériaux, notamment le choix de l'albédo des surfaces extérieures, la pollution, l'émission de chaleur anthropique et la diminution du couvert naturel.

#### **a. Émission de gaz à effet de serre**

Les gaz à effet de serre piègent l'énergie solaire dans l'atmosphère et participent ainsi à son réchauffement. La poursuite des émissions de ce gaz au rythme actuel ou à un rythme plus élevé devrait accentuer le réchauffement et modifier profondément le système climatique au XXI<sup>e</sup> siècle ([Pachauri, et al., 2007](#)). Dans les milieux urbains, les sources d'émission de gaz à effet de serre sont principalement : les véhicules, les procédés industriels et le chauffage des immeubles à l'aide de combustibles fossiles ([MDDEP, 2006](#)).

#### **b. Perte du couvert forestier dans les milieux urbains**

[Canorel \(2009\)](#) a défini l'urbanisation d'un point de vue physique, comme étant la substitution du couvert végétal par des surfaces minérales comme le bitume, la pierre, le béton. Pourtant, la présence des espaces verts affecte la distribution du rayonnement solaire, la température et l'humidité de l'air. Les arbres permettent de créer un effet d'ombrage et de réfléchir une partie du rayonnement solaire par leur feuillage. Ils diminuent les gains d'énergie provenant du soleil  $Q_R$  de l'équation III-1. Ils sont aussi capables à absorber l'eau du sol puis la restituer dans l'atmosphère par transpiration. En conséquence, le taux d'humidité dans l'air va augmenter dans le milieu environnant. Ils affectent le microclimat urbain grâce au phénomène d'évapotranspiration qui se base sur l'évaporation et la transpiration de l'eau simultanément dans l'atmosphère.

Ce phénomène contribue à la baisse de la température physiologique de l'air ambiant (PET) et peut améliorer le confort. Un arbre est considéré comme un climatiseur évaporatif naturel de 0,378 m<sup>3</sup>/jour (Akbari et al., 1992). Ce taux d'évapotranspiration est équivalent à 26.7 kWh/jour (Bouyer, 2009). En effet, les végétations assurent les pertes de flux de chaleur latente  $Q_L$  de bilan énergétique d'une ville.

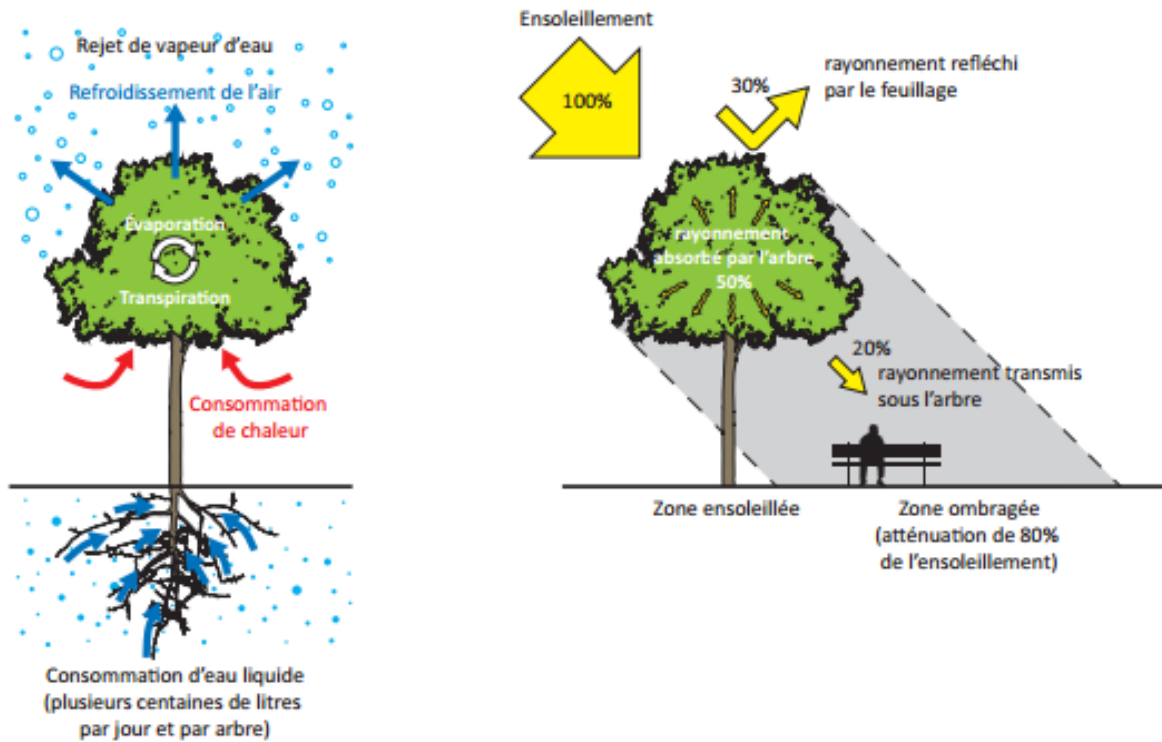


Figure 25: Bilan thermique à la surface des arbres (Fahed, 2018)

### c. Imperméabilité des matériaux

Les sols naturels ont été remplacés par des matériaux imperméables, tels que le RSE et les matériaux utilisés pour la construction des bâtiments qui, n'assurant pas de fonctions de filtration et d'absorption de l'eau, modifient le parcours naturel des eaux pluviales (Rushton, 2001). En minimisant la disponibilité de l'eau en milieu urbain, les processus naturels rafraîchissants comme l'évaporation de l'eau contenue dans les sols sont restreints et ne peuvent pallier le réchauffement urbain (Brattebo, et al., 2003). Ainsi, les pertes de flux latent sont faibles ( $Q_L$ ). Les températures les plus chaudes sont localisées sur les grandes étendues de matériaux imperméables comme les aéroports, les zones industrielles et commerciales, les aménagements sports et les loisirs bitumés, le parking ou la toiture-terrasse de bâtiments.

#### d. Propriétés thermiques des matériaux

Oke (1976), Akbari et al. (1992) et Bouyer (2009) ont affirmé que la ville stocke plus de chaleur que la campagne. Ceci est principalement dû aux propriétés des matériaux qui composent les bâtiments, les voies de circulations et les infrastructures urbaines. Leur comportement par rapport au rayonnement et à la chaleur est différent de celui de la terre nue ou végétalisée que l'on trouve plus facilement à la campagne. Les principales variables de la performance thermique des matériaux sont l'albédo, la conductivité thermique et la capacité thermique (Cf. Chapitre II). Ces paramètres influencent le bilan thermique de l'équation III-2. Ainsi, la nature de la surface urbaine, avec sa part de sols minéralisés, de sols nus, enherbés ou végétalisés, et de surfaces d'eau, joue un rôle important dans l'intensité des modifications climatiques. Santamouris (2013), Roesler et al. (2016), Hailu et al. (2020) ont confirmé que les matériaux urbains affectent fortement l'ICU.

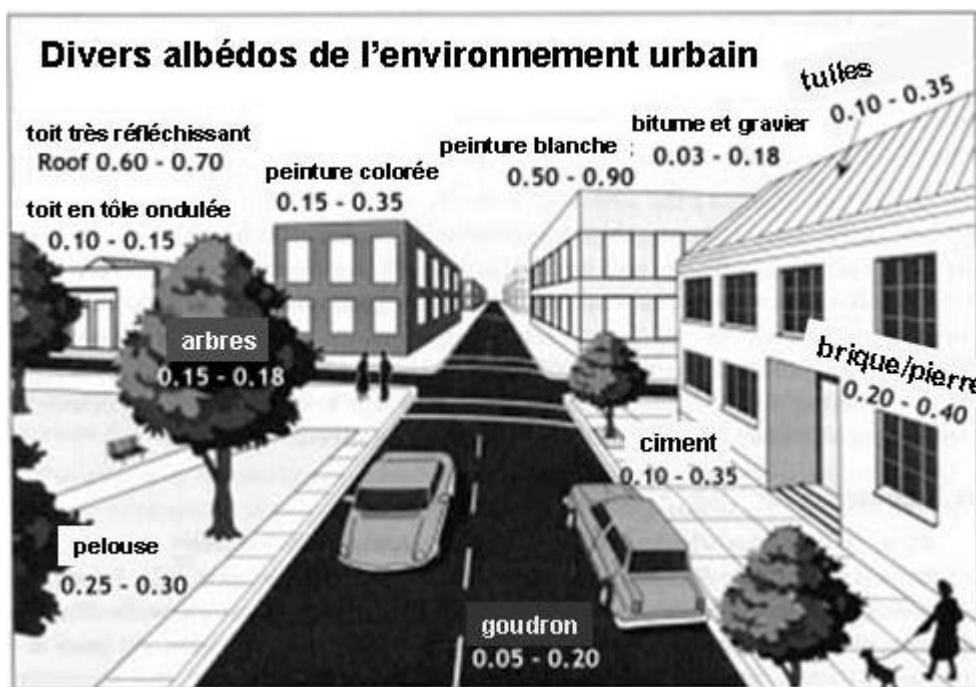


Figure 26: Divers albédos de l'environnement urbain (Fahed, 2018)

#### e. Morphologie urbaine et taille des villes

La morphologie urbaine joue également un rôle dans la formation des ICU (USEPA, 2008). À l'échelle de la ville, l'énergie reçue du soleil et de l'atmosphère est absorbée et réfléchié en partie par les matériaux d'une ville. Lorsqu'elle est absorbée, elle chauffe les bâtiments, les différents revêtements et les couverts urbains.

Les grands bâtiments et les rues étroites peuvent nuire à la bonne ventilation des centres urbains, (Coutts, et al., 2008). La morphologie urbaine est caractérisée par le facteur de vue du ciel (Pigeon, et al., 2008). Un autre facteur anthropique est le piégeage radiatif. Les matériaux stockent cette énergie puis l'émettent à nouveau sous forme de rayonnement de grande longueur d'onde. Ceux-ci seront piégés de la même manière que les rayons solaires (Colombert, 2008). L'intensité du piégeage radiatif est fortement liée au rapport « W/H » de la largeur de la rue W sur la hauteur des bâtiments H.

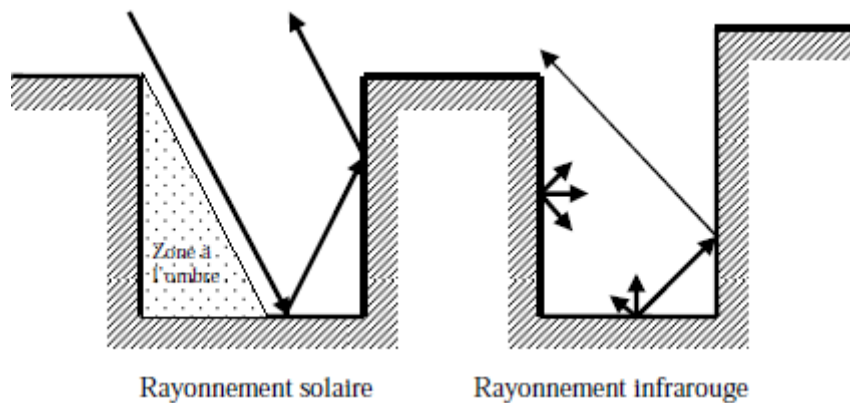


Figure 27: Morphologie de la ville (Colombert, 2008)

#### f. Chaleur anthropique

La production de chaleur anthropique ( $Q_F$ ) est un autre facteur contribuant au développement d'ICU, notamment dans les milieux urbains denses (USEPA, 2008). La production de la chaleur anthropique dépend essentiellement du nombre d'habitants d'une ville. Les systèmes de climatisation à air dégagent des charges thermiques qui s'ajoutent à l'ambiance extérieure. Des études réalisées sur Paris ont montré que si la puissance de climatisation double l'intensité d'ICU (Munck et al., 2010).

En effet, l'ICU a été considéré comme l'un des problèmes majeurs de l'urbanisation et de l'industrialisation de la civilisation humaine. Il augmente les occurrences de conditions météorologiques, accélère le réchauffement climatique, augmente la demande d'énergie des villes, élève la pollution de l'environnement, endommage la santé humaine et même contribue aux taux de mortalité.

### III.2.3. Intensité de l'ICU

La taille de la ville est principalement mesurée par sa population. La *Figure 28* illustre 2 droites de régression reliant l'intensité maximale de l'ICU à la population pour deux différentes régions d'Europe et l'Amérique du Nord.

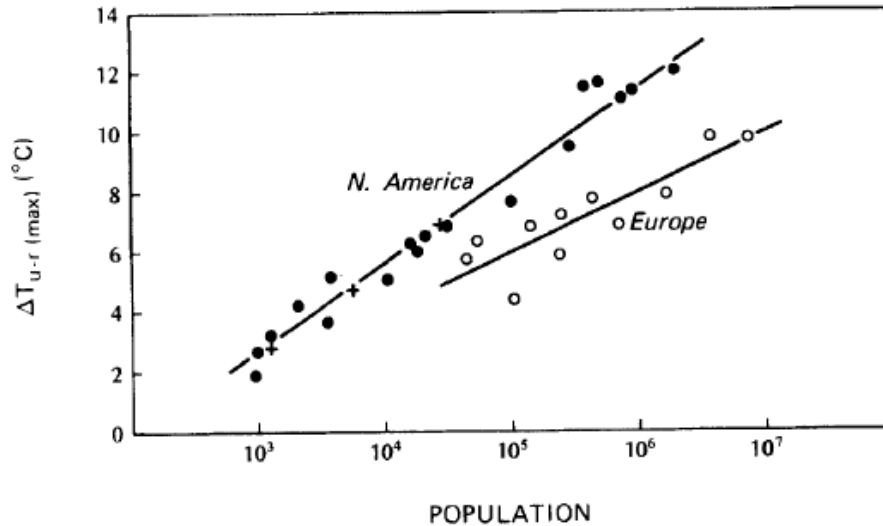


Figure 28: Relation entre l'intensité maximale de l'ICU et la population pour l'Europe et l'Amérique du Nord (OKE, 1981)

Cette figure nous montre que l'intensité d'ICU augmente en suivant la croissance de la population. Plusieurs formules empiriques ont été établies pour trouver une relation entre  $\Delta T_{u-r}$  maximale et la population. Oke (1982b) propose une expression qui dépend de la population (P) et la vitesse du vent non urbain à l'échelle régionale en m/s ( $V_v$ ).

$$\Delta T_{u-r(max)} = \frac{P^{0.25}}{(4V_v)^{0.5}} \quad (^\circ\text{C}) \quad \text{(III-11)}$$

D'après cette équation, nous observons que l'intensité d'ICU diminue lorsque la vitesse du vent augmente. Le *tableau 6* suivant donne les écarts de températures « instantanées » entre Villacoublay en banlieue, à peine touchée par l'urbanisation à cette époque et la station de la tour Saint-Jacques, au centre de Paris.

Tableau 6: Valeur de l'intensité de l'ICU en fonction de la vitesse du vent (Escourrou, 1991)

Vitesse du vent de référence (m/s)	Intensité de l'ICU (°C)
1	4.5
2	3.4
3	3.4
4	2.6
5	2.2

En 2008, Colombert a cité le travail de Givoni (1978) qui relie l'intensité de l'ICU d'Uppsala en Suède avec les éléments météorologiques tels que la nébulosité (N), la vitesse du vent ( $V_v$ ), la température (T) et l'humidité spécifique (q).

$$\Delta T_{u-r(\max)} = 2.8 - 0.1 N - 0.38 V_v + 0.02 T - 0.03q \quad (\text{III-12})$$

### III.3. CONFORT THERMIQUE EXTÉRIEUR EN MILIEU URBAIN

Selon Mohammed (2018), la notion de confort est la combinaison de facteurs physiologiques, psychologiques et psychosensoriels qui varient d'un individu à un autre et qui le conduisent à exprimer le bien-être de son état. Son évaluation dans les espaces extérieurs sont nécessaires, car cela représente un élément majeur dans le développement et la conception des villes. De nombreux auteurs ont l'étudié, à savoir Ouarda (2008), Fahed (2018), Mouada, (2020). Ils se sont alors penchés sur l'analyse des causes de la dégradation de confort en essayant de la remédier et de concevoir de nouveaux espaces qui répondent le mieux aux exigences du bien-être des usagers, et pourront être qualifiés de confortables. Son évaluation dépend généralement de quatre variables environnementales : la température de l'air, la température moyenne radiante, l'humidité et la vitesse du vent.

#### III.3.1. Définition

Le confort thermique est défini comme étant « un état de satisfaction du corps vis-à-vis de l'environnement » (ASHRAE, 2009). L'ASHRAE a développé une échelle appelée « ASHRAE thermal sensation scale » pour exprimer la sensation du confort. Le *tableau 7* représente cette échelle.



Tableau 7: Échelle de sensation thermique d'ASHRAE (ASHRAE, 2009)

+3	Chaud
+2	Tiède
+1	Légèrement tiède
0	Neutre
-1	Légèrement frais
-2	Frais
-3	Froid

### III.3.2. Indice de confort

#### a. Indice PMV (Predicted Mean Vote)

L'indice PMV ou vote moyen prévisible a été développé par Fanger en 1972 pour décrire le confort thermique. Cet indice a d'abord été utilisé pour la description du confort thermique à l'intérieur des bâtiments, mais plus tard, il a été utilisé pour décrire le confort en milieu extérieur, (Honjo, 2009). Il est calculé à partir de l'équation modifiée de Fanger, qui a été développée pour un milieu extérieur. ASHRAE (2009) exprime l'indice PMV décrit par Fanger selon l'équation suivante :

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028) S \quad (III-13)$$

M : métabolisme du corps

S : Stockage d'énergie dans le corps humain

Tableau 8: Valeurs du PMV selon neuf échelles de confort (ASHRAE, 2009)

Échelle de sensation	Sensation thermique
-4	Extrêmement froid
-3	Froid
-2	Frais
-1	Légèrement frais
0	Neutre
1	Légèrement tiède
2	Tiède
3	Chaud
4	Extrêmement chaud

Cette échelle permet de procéder à une estimation du confort thermique. La sensation thermique optimale correspond à une valeur nulle du PMV. Cependant, on peut globalement situer la zone de confort dans la fourchette [-1, +1]. Une valeur positive indique que la température de l'air est plus élevée que celle qui correspond au confort, alors qu'une valeur négative signifie que la température de l'air est plus basse que la température correspondante au confort optimale. Mais, il est à noter que le PMV dépend du climat de la zone étudiée et il peut atteindre des valeurs inférieures et supérieures respectivement à -4 et +4.

La classification des valeurs de PMV selon neuf échelles de confort est représentée par la figure 29.

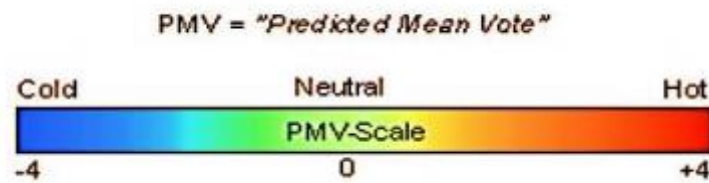


Figure 29: Classification des valeurs de PMV selon neuf échelles de confort (Mouada, 2020)

### b. Indice PPD (Predicted percentage dissatisfied)

Le PPD est le pourcentage prévisible d'insatisfait indiquant le pourcentage des personnes insatisfaites. Cet indice dépend directement du PMV. Fanger (1982) relie ces deux indices selon l'équation :

$$PPD = 100 - 95e^{[-(0.03353PMV^4 + 0.2179PMV^2)]} \quad (III-14)$$

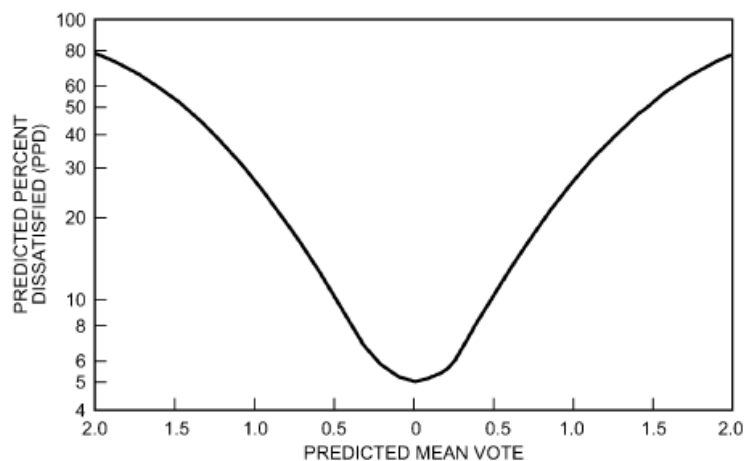


Figure 30: Variation du PPD en fonction du PMV (ASHRAE, 2009)

L'analyse du graphique montre que le PPD augmente lorsque le PMV s'éloigne de la valeur zéro. Pour un PMV égal à -1 ou +1, près de 25% des personnes ne seront pas satisfaites. Il est à noter aussi que même pour un PMV égal à zéro, il y a encore 4% de personnes insatisfaites.

### c. Indice UTCI (Universal Thermal Climate Index)

En 2009, l'UTCI a été validé pour être utilisé dans l'étude du confort thermique dans les espaces extérieurs. Il est basé sur un modèle dynamique du mécanisme thermorégulateur du corps humain. Ce modèle est applicable pour tous les climats, ainsi que pour de courtes et de longues périodes d'exposition. D'après [Bröde, et al., \(2010\)](#), il prend en compte les différents niveaux d'isolation du corps humain dus aux vêtements. Il permet de simuler les échanges thermiques à l'intérieur du corps humain, ainsi que les échanges qui ont lieu entre l'intérieur du corps et la surface, en tenant compte des particularités anatomiques, thermiques et physiologiques ([Fiala et al., 1999](#)). Pour déterminer l'UTCI, un environnement de référence défini de la façon suivante : humidité relative de 50%, pression de vapeur d'eau inférieure à 20 hPa, température de l'air égale à la température moyenne radiante et avec une vitesse du vent faible. Il est donné par la formule suivante :

$$ITCU = 0.4 \times (T + T_r) + 15 \times (ET - 0.0063 \times (T - 12)^2) \times \left(1 - \frac{HR}{100}\right) \quad (\text{III-15})$$

où :

T est la température de l'air en degrés Celsius

Tr est la température moyenne radiante en degrés Celsius.

ET est le taux d'évaporation en g/m<sup>2</sup>/h, qui dépend de la température de l'air et de l'humidité relative. Il peut être calculé à l'aide de la formule suivante :

$$ET = 0.013 H \times \left(1 - \frac{HR}{100}\right) \times (1.98T - 26.8) + 3.6 \times \left(1 - \frac{HR}{100}\right) \times (T - 29)^{0.5} \quad (\text{III-15a})$$

HR est l'humidité relative en pourcentage

La *figure 31* montre le niveau de stress thermique selon les valeurs de l'UTCI. Le confort thermique correspond à des valeurs d'UTCI comprises entre +9 et 26 °C.

UTCI (°C) range	Stress Category
above +46	extreme heat stress
+38 to +46	very strong heat stress
+32 to +38	strong heat stress
+26 to +32	moderate heat stress
+9 to +26	no thermal stress
+9 to 0	slight cold stress
0 to -13	moderate cold stress
-13 to -27	strong cold stress
-27 to -40	very strong cold stress
below -40	extreme cold stress

Figure 31: Niveau de stress thermique selon les valeurs de l'UTCI (Fahed, 2018)

#### d. Indice PET (Température physiologique équivalente)

PET est un indice qui reflète une réalité plus conforme du confort thermique extérieur. Cet indice est défini comme étant la température de l'air en °C à laquelle le bilan énergétique pour des conditions d'intérieur assumées est caractérisé par la même température du corps humain et de la peau et le même taux de sueur que ceux calculés pour les conditions extérieures réelles.

Tableau 9: Valeurs du PMV et du PET, sensations de l'environnement thermique et les niveaux de stress thermiques (Mohammed, 2018)

PMV	PET	Sensation humaine	Niveau de stress
-3.5	4 °C	Très froid	Stress extrême froid
-2.5	8 °C	Froid	Stress froid fort
-1.5	13 °C	Frais	Stress froid modéré
-0.5	18 °C	Légèrement frais	Stress froid léger
0.5	23 °C	Confortable	Pas de stress thermique
1.5	29 °C	Légèrement chaud	Léger stress chaud
2.5	35 °C	Chaud	Stress chaud modéré
3.5	41 °C	Très chaud	Stress chaud extrême

Différentes études ont montré que l'intervalle de la PET indiquant un état acceptable de confort varie entre une région et une autre. Le résultat de Lin en 2009 citée par [Fahed](#) en 2018 montre que cet intervalle se situe entre 20 °C et 24 °C pour un climat subtropical humide. [Mouada, \(2020\)](#) a affirmé qu'elle est l'un des indices les plus utilisés pour la description du confort thermique extérieur.

Le calcul de cet indice est assez complexe, car il prend en compte plusieurs paramètres environnementaux tels que la température de l'air ambiant, l'humidité relative, la vitesse du vent et le rayonnement solaire. Cependant, il peut être calculé à l'aide de la formule suivante :

$$PET = T_s - (0.55 - 0.0055 HR)(T_s - 58) - (10.4 V_v^{0.53} - V_v + 10.4) + 0.35 \left( \frac{R_G}{1000} \right) - 19.8 \quad (\text{III-16})$$

Où :

- $T_s$  est la température moyenne de la peau en degrés Celsius. Une estimation de la température moyenne de la peau peut être obtenue en utilisant la formule suivante :

$$T_s = 0.33T + 18.8 - 0.20HR \quad (\text{III-16a})$$

- HR est l'humidité relative en pourcentage
- $V_v$  est la vitesse du vent en mètres par seconde
- $R_G$  est le rayonnement solaire global en watts par mètre carré.

## CONCLUSION

Nous pouvons mieux comprendre les mécanismes qui régissent la formation de microclimats au sein d'une ville et identifier les facteurs qui influencent les températures et les vents ainsi qu'évaluer les conséquences de l'urbanisation sur le climat. Ces informations sont cruciales pour guider les décisions en matière de conception de bâtiments, de gestion des espaces verts, de développement des infrastructures et de planification urbaine. Nous avons développé dans ce chapitre le bilan thermique d'une ville et d'une surface de revêtement d'un sol. Les théories sur le phénomène de l'îlot de chaleur urbain y sont également exposées. Les principales origines sont la chaleur anthropique et l'urbanisation. L'analyse bibliographique montre que ce dernier est le plus influent. Par contre, nous avons présenté aussi les différents indices pour définir le confort dans le milieu extérieur. Il est important de noter que la température physiologique équivalente est applicable pour notre cas d'étude. Le chapitre suivant se focalisera sur les différentes méthodes utilisées pour l'étude de l'ICU influencé par le RSE.

# CHAPITRE IV : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE DES MÉTHODES UTILISÉES POUR L'ÉTUDE DE L'ICU INFLUENCÉ PAR LES REVÊTEMENTS DE SOL

## INTRODUCTION

Selon [Santamouris \(2013\)](#), les revêtements de sol extérieurs affectent fortement le climat urbain. Ils sont les principaux contributeurs au développement de l'îlot de chaleur urbain dans l'espace public. Le bilan thermique au niveau de leur surface est déterminé par la quantité de rayonnement solaire absorbé, le rayonnement infrarouge émis, la chaleur transférée par convection vers l'air atmosphérique, la chaleur stockée dans la masse du matériau et conduite vers le sol. Leurs impacts sur le climat urbain sont analysés à l'aide des méthodes de simulation numérique et des méthodes expérimentales. Ces dernières peuvent être réalisées en utilisant les techniques de télédétection à méso-échelle ou les méthodes de mesure à micro-échelle impliquant la thermographie infrarouge et les capteurs de température conventionnels. Les méthodes de simulation numérique exigent l'utilisation d'au moins un logiciel. Ce présent chapitre est dédié à la synthèse bibliographique ces différentes méthodes utilisées pour l'étude de l'ICU influencé par les revêtements de sol

### IV.1. MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

#### IV.1.1. Expérimentation in situ

L'expérimentation in situ consiste à effectuer des relevés de température, à l'aide de capteurs fixes ou mobiles appliqués directement sur la surface de revêtements de sol et dans leur environnement immédiat. Les techniques de mesure à micro-échelle permettent d'obtenir des informations détaillées sur les conditions thermiques des zones étudiées, offrant ainsi une compréhension approfondie des processus correspondants. [Hailu et al. \(2020\)](#) ont analysé des échantillons cylindriques, mesurant 150 mm de diamètre et 170 mm de hauteur (*Figure 32*). Leur étude s'est concentrée sur les effets potentiels du béton de ciment, de l'enrobé bitumineux dense et de l'enrobé poreux sur l'ICU dans un environnement naturel. L'étude menée par [Rositsa et al. \(2018\)](#) a pour objectif d'analyser différents nouveaux matériaux, notamment le polymère d'acrylate synthétique, le béton d'enrobé dense avec un liant de polymère d'acrylate thermoplastique, le bitume de pétrole visqueux et le béton d'enrobé dense avec le liant de bitume de pétrole visqueux. Les deux matériaux ont un diamètre de 45 mm et une hauteur de 10 mm et les deux autres ont un diamètre de 60 mm et une hauteur de 60 mm (*Figure 33*).

Afin d'évaluer les propriétés anti-ICU des RSE, les spécialistes ont enregistré les paramètres climatiques tels que la température de l'air, l'humidité relative de l'air, le rayonnement solaire et la vitesse du vent. Leur attention s'est également portée sur la température de surface, ainsi que sur les températures au-dessus, au milieu et au fond des matériaux. La majorité des mesures expérimentales à micro-échelle ont été réalisées à l'aide de thermographie infrarouge ou de thermocouples ou de capteurs conventionnels pour la prise de température. Hailu et ses collaborateurs ont choisi le capteur numérique DS18B20 pour mesurer la température de l'air et la température à l'intérieur des échantillons toutes les 10 minutes. Ils ont par ailleurs utilisé l'imageur thermique Fluke Ti10 afin de relever la température de surface, ainsi qu'un irradiomètre pour mesurer l'intensité du rayonnement solaire. Pour minimiser le transfert de chaleur entre la plateforme et les matériaux, plusieurs recherches (Hailu et al., 2020, Synnefa et al., 2010, Asaeda et al., 1996) recommandent d'isoler thermiquement les faces et les fonds des échantillons en les enveloppant avec des matériaux isolants. Hailu et al. (2020) concluent que la température de surface a une corrélation positive avec la température de l'air à différentes hauteurs et profondeurs. Les résultats concernant le potentiel d'îlot de chaleur (ICU) montrent que le béton de ciment présente une performance anti-ICU significativement supérieure aux autres mélanges d'asphalte. De plus, l'asphalte poreux présente une performance légèrement meilleure que le béton d'asphalte dense. En résumé, les études menées par ces divers chercheurs se concentrent uniquement sur l'évaluation des performances des revêtements de sol en se basant sur les paramètres climatiques, sans prendre en compte leurs propriétés thermiques et radiatives.



Figure 32: Échantillons testées par Hailu et al. (2020)

En revanche, certaines études ont exploré l'influence de propriétés thermophysiques des revêtements de sol sur leur réponse thermique dans diverses régions. [Rositsa et al. \(2018\)](#) ont mesuré la diffusivité thermique et la conductivité thermique des nouveaux RSE à l'aide d'un analyseur de conductivité thermique TCi conformément aux exigences de la norme ISO 22007-2 :2015. Ces mesures ont permis d'évaluer le comportement thermique des différentes couches des revêtements de sol et de comprendre comment il évolue dans des conditions climatiques variées. L'étude de [Matthew et al., \(2010\)](#) se focalise sur l'évaluation des matériaux comprenant des mélanges bitumineux et cimentaires, qu'ils soient conventionnels ou non conventionnels. Ils ont déterminé leur conductivité thermique à l'aide d'un appareil de mesure du flux thermique Hilton B480, contrôlé par ordinateur, conformément à la norme ISO 8501. Par ailleurs, [Rositsa](#) et ses collègues ont souligné que des valeurs plus élevées de celle-ci indiquent une meilleure capacité d'échange de chaleur avec l'environnement. Il convient de noter que ces auteurs n'ont pas pris en compte les propriétés radiatives des revêtements de sol dans leur étude.



Figure 33: Vue générale des matériaux testés par [Rositsa et al. \(2018\)](#)

L'impact de l'albédo des revêtements de sol sur la température de surface et la température de l'air a été étudié dans différentes recherches. Le travail de [Tina \(2013\)](#) porte sur l'investigation de l'asphalte dense, l'asphalte poreux, le béton de ciment et le béton de ciment poreux à grande échelle ([Figure 35](#)). Pour cette étude, une petite station météorologique a été installée au-dessus de chaque dalle de dimensions 4 m × 4 m × 12 cm. Cette station a permis de mesurer la température, l'humidité relative et la vitesse du vent à des hauteurs de 30 cm, 60 cm et 150 cm, ainsi que le rayonnement solaire incident sur ces matériaux. Un spectromètre a été utilisé pour estimer l'albédo de surface des revêtements.



Une autre étude réalisée par [Pomerantz et al. \(2000\)](#) a examiné la corrélation entre l'albédo des rues et la variation journalière de la température de l'air à l'échelle urbaine. Ils ont utilisé un thermomètre infrarouge et un pyranomètre de précision pour mesurer respectivement la température de surface et l'albédo de différents revêtements bitumineux. La norme ASTM E1918-97 a été recommandée pour la détermination de ce dernier. Quant à la température de l'air, elle a été mesurée à l'aide d'un thermomètre à mercure. Ils ont remarqué qu'une augmentation de l'albédo de 0.1 provoque une diminution de la température de surface de 4 °C. Ils suggèrent que la méthode du « chip-sealing » est efficace pour augmenter l'albédo des RSE. La procédure consiste à étaler une fine couche de liant bitumineux, à recouvrir une couche de granulats, puis à les presser. Le revêtement résultant présente un albédo d'environ  $67 \pm 10\%$  de l'albédo de l'agrégat utilisé. Cependant, il est pertinent de mentionner que ces différentes études ont négligé les propriétés thermiques de ces matériaux dans leurs analyses. [Asaeda et al. \(1996\)](#) ont mené une étude visant à effectuer une étude complète. Ils ont analysé la performance thermique de l'asphalte, du béton, du macadam, du sable et du sol nu dans un environnement naturel de dimensions 200 m sur 100 m. Avant l'expérience, les propriétés thermiques et radiatives de ces matériaux, telles que la conductivité thermique, la chaleur spécifique et l'émissivité, ont été mesurées. Ils ont développé un protocole, comme l'indique *la figure 34*, afin de déterminer ces deux premiers paramètres. Le protocole impliquait l'utilisation d'un réservoir cylindrique en acier à l'extérieur, contenant de l'eau chaude avec une température initiale de 80°C. À l'intérieur de ce réservoir, un autre plus petit en acier a été placé, contenant de l'eau froide avec une température initiale de 20°C. Entre les deux réservoirs, un espace de 10 cm de large est réservé pour placer l'éprouvette. La partie extérieure sur les côtés, le haut et le bas est isolé à l'aide de matériaux à très faible conductivité thermique, afin d'éviter tout échange de chaleur entre le système et l'atmosphère. Des thermistances ont été installées à trois profondeurs du matériau pour mesurer la température intérieure toutes les 5 minutes pendant une heure. Les températures de l'eau dans les réservoirs intérieur et extérieur ont été relevées à l'aide d'un thermomètre. Ils ont évalué les deux paramètres en utilisant l'équation de conduction thermique unidirectionnelle.

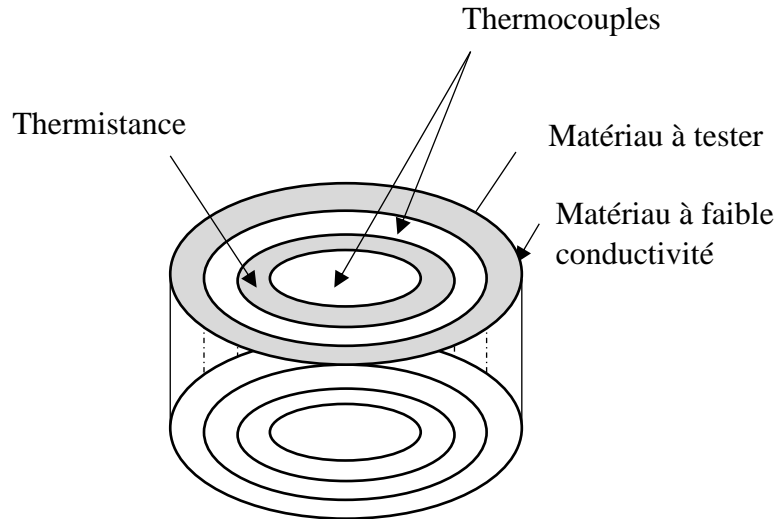


Figure 34: Schéma des expériences pour la détermination des caractéristiques thermiques des matériaux (Asaeda et al.,1996)

Pendant l'expérimentation in situ, ils ont installé à l'intérieur de l'échantillon (3 m × 3 m × 30 cm) le long de l'axe central à différentes profondeurs des tubes de cuivres de 1 mm de diamètre. Les températures du sol ont été mesurées en insérant des thermocouples de type T classe 0.75 SUS 316 dans ces tubes. Ceux-ci sont placés à 2.5, 5, 10, 15, 20 et 30 cm de la surface. De plus, des fluxmètres de type MF-81 ont été installés à 10 cm de profondeur. Le flux radiatif total descendant a également été relevé par un radiomètre net CN-11 qui couvre la bande entre 0.3 et 50  $\mu\text{m}$ . Ils ont constaté que pour l'analyse de l'ICU, il est important de considérer l'interaction entre la structure de RSE, leurs propriétés et les facteurs environnementaux. Parmi les différents matériaux qu'ils ont testés, l'asphalte chauffe dans une mesure considérablement plus importante que les autres pendant l'été. Il libère une quantité importante de chaleur dans l'atmosphère par le biais du flux de chaleur sensible et du rayonnement infrarouge.

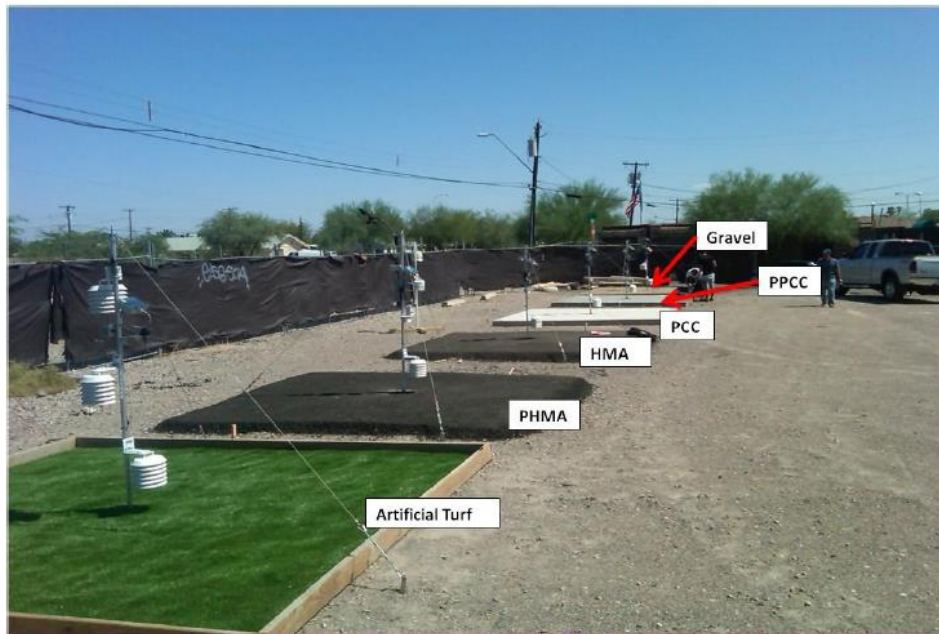


Figure 35: Les revêtements de sol testés par Tina (2013)

Roesler et al. (2016) ont évalué l'impact des modifications de diverses propriétés thermiques de la couche de surface et de base de revêtements de sol sur l'ICU. Ils ont établi de revêtement hypothétique et ont effectué trois changements indépendants pour étudier les changements des propriétés thermiques et physiques sans altérer les épaisseurs des couches. Afin de réduire la conductivité thermique, ils ont opté pour un béton moins dense. Pour modifier l'albédo de surface, ils ont utilisé un ciment contenant du dioxyde de titane ( $\text{TiO}_2$ ). La base granulaire a été remplacée par une base traitée au ciment pour modifier la conductivité thermique et la capacité thermique des revêtements de sol, tout en préservant la couche supérieure. Ils ont utilisé « Mechanistic Empirical Pavement Design Guide » pour déterminer la température de surface pour chaque cas. L'albédo a été mesuré à l'aide de l'albédomètre CMA 6 (Figure 36) selon la recommandation de la norme ASTM E 1918. Ils ont affirmé que les RSE étudiés ont une tendance à être plus froids que la référence. Il est important de comprendre les différents facteurs contribuant à modifier leur température de surface, notamment les couches, les matériaux et les conditions climatiques locales. Une autre approche a été proposée, basée sur le flux de chaleur, afin de calculer le forçage radiatif et le potentiel de réchauffement global de plusieurs types de béton. De plus, cette approche démontre comment l'inertie thermique et la diffusivité thermique de ce dernier peuvent être ajustées pour atténuer l'effet d'îlot de chaleur sur la canopée urbaine.



Figure 36: Albédomètre CMA 6

Quelques auteurs se sont intéressés à l'impact de perméabilité de revêtements de sol sur l'ICU. [Santamouris \(2013\)](#) a développé et testé six approches technologiques pour l'asphalte, le béton et la céramique afin d'améliorer leur performance thermique. Ils ont affirmé que l'utilisation de poudre fine de haut fourneau dans l'asphalte drainant, l'application de mousse de tourbe comme dans le béton poreux, l'incorporation de cendres volantes présentant une distribution granulométrique très étroite dans les briques, ainsi que l'utilisation de déchets industriels comme matière première pour les carreaux céramiques permettent de réduire l'ICU. [Tina \(2013\)](#) a confirmé que les matériaux poreux peuvent contribuer à atténuer l'accumulation de chaleur en raison de leur forte performance de drainage, ce qui permet de réduire considérablement la conductivité thermique. Ainsi, en augmentant la perméabilité des surfaces végétalisées et minéralisées, il est possible de réduire leur température de surface grâce aux processus d'évaporation.

L'utilisation de matériaux réfléchissants est l'une des mesures d'atténuation les plus étudiées et rentables pour lutter contre les effets de l'ICU en réduisant la température de surface. [Giuseppe et al. \(2018\)](#) ont présenté une étude intéressante portant sur revêtement de sol frais (cool pavements en anglais). Ils ont testé les matériaux élastomères gris et blanc sur une ancienne route asphaltée. Ces derniers ont été caractérisés en laboratoire et sur le terrain afin d'évaluer leurs propriétés thermiques et radiatives dans différentes conditions environnementales (*Figure 37*). Leur réflectance spectrale a été mesurée en laboratoire avec un spectrophotomètre à double faisceau Lambda 950. Les revêtements frais (cool coating en anglais) appliqués se sont avérés avoir une réflectance solaire beaucoup plus élevée que le RSE existant, ce qui conduit à une température de surface plus faible.

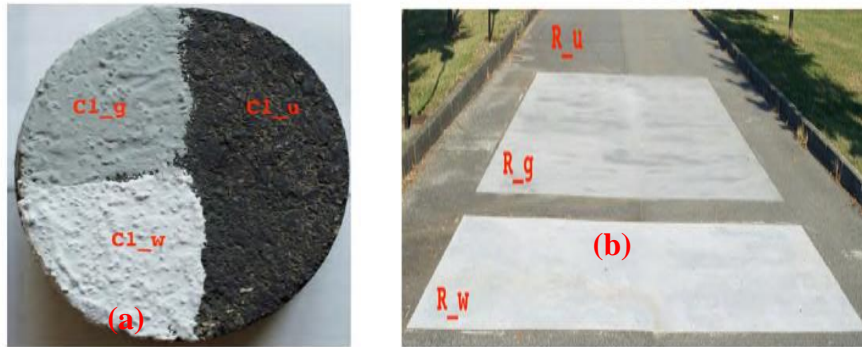


Figure 37: Matériaux testés par [Giuseppe et al. \(2018\)](#) a) laboratoire b) in situ

Une autre investigation développée par [Wong Chung et al. \(2012\)](#) s'est également concentrée sur cette approche. Ils ont mené une expérimentation sur deux revêtements de sol frais de couleur gris clair et gris foncé. La *figure 38* présente les différents revêtements appliqués à surface de l'asphalte. Ils ont mesuré la réflectivité, l'émissivité et la conductivité thermique de ces revêtements en laboratoire. Cette dernière a été déterminée en régime permanent. Ils ont ainsi relevé la température à différentes hauteurs sur un terrain extérieur en béton et route en asphalte. Les tests ont révélé que ces revêtements sont capables de réfléchir jusqu'à 81% de proche infrarouge. Ils présentent une faible conductivité thermique et une forte émissivité. Les mesures effectuées in situ ont montré d'une manière constante que ces revêtements possèdent de température de surface inférieure à celle des pavés en béton non revêtus.

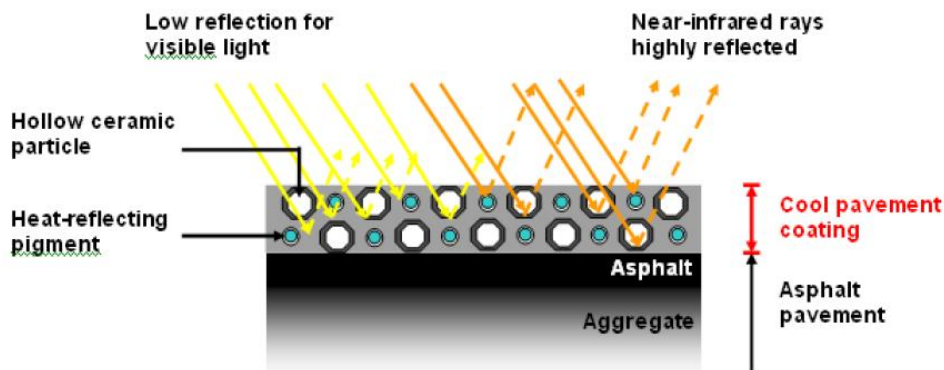


Figure 38: Vue de près de la couche de revêtement au-dessus du mélange d'asphalte ([Wong Chung et al., 2012](#))

[Doulos et al. \(2004\)](#) ont réalisé une expérimentation sur 93 matériaux utilisés pour les revêtements de sol urbains (Cf. *figure 39*). Les échantillons sélectionnés sont le béton, l'asphalte, le marbre, le granit, les galets et la mosaïque de différentes couleurs de surface (blanc, gris, noir, rouge, brun et vert) et de différentes textures de surface (avec des surfaces lisses, des surfaces rugueuses et des surfaces anaglyphes avec des marques et designs). Chaque matériau a une dimension de 40 cm × 40 cm et est placé sur une plate-forme de 40 m<sup>2</sup> de surface. Le dispositif utilisé pour les mesures comprenait une caméra infrarouge et un thermomètre de contact pour mesurer les températures de surface. Les conditions météorologiques ambiantes étaient enregistrées par une station météorologique. Cette étude a révélé une différence maximale de 6,9 °C entre la température de surface des matériaux clairs et la température de l'air, tandis que cette différence variait entre 10,2 °C et 15,5 °C pour les matériaux foncés. [Santamouris \(2013\)](#) a exploré différentes approches technologiques pour augmenter l'albédo de revêtements de sol. Une méthode consiste à appliquer sur leur surface des peintures blanches hautement réfléchissantes. Dans le cas-où des matériaux non-blancs doivent être utilisés, des pigments réfléchissant les infrarouges peuvent être envisagés. Une autre suggestion est de recouvrir les agrégats de l'asphalte avec une peinture spécialement conçue pour réfléchir la chaleur. De plus, l'utilisation de cendres volantes et de scories comme composants du béton peut également contribuer à augmenter sa réflectivité. Santamouris a constaté qu'en remplaçant 70% du ciment par du laitier, le mélange présente un albédo de 0,58, soit une augmentation de 71% par rapport à un mélange conventionnel.



Figure 39: Les 93 matériaux testés par [Doulos et al. \(2004\)](#)

Les techniques satellitaires sont couramment utilisées pour déterminer les températures de surface à une échelle méso. Elles fournissent un outil précieux pour comprendre la répartition spatiale de ces dernières dans le milieu urbain et évaluer précocement l'impact des matériaux de RSE sur l'ICU. [Hendel et al. \(2016\)](#) ont réalisé une thermographie aérienne de quelques typologies d'espaces publics parisiens. Cette méthode repose sur les lois physiques de la thermodynamique pour mesurer les températures à distance. Elle permet d'obtenir des indicateurs permettant d'évaluer les pertes de chaleur d'une ville. Hendel et ses collaborateurs ont également réaffirmé que les RSE contribuent de façon remarquable à la qualité climatique des lieux.

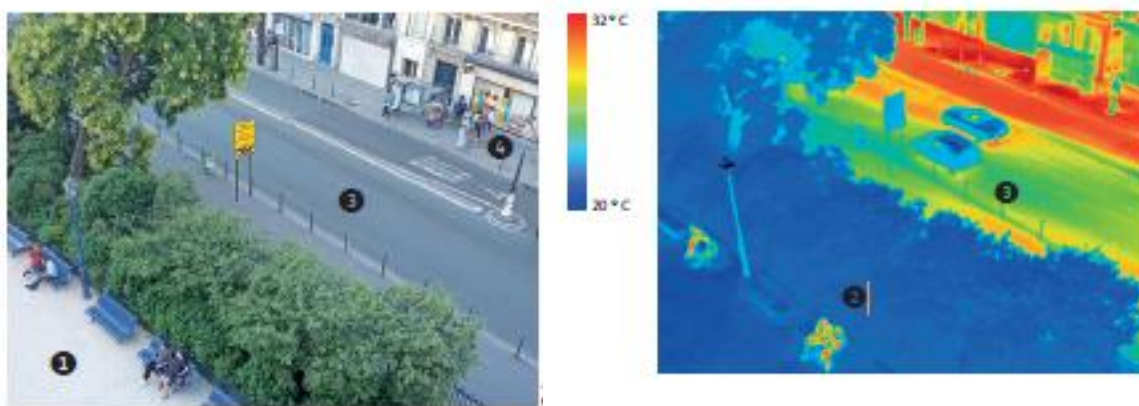


Figure 40: Différences de températures de surface d'une série de matériaux ([Hendel et al , 2016](#))

#### IV.1.2. Expérimentation en laboratoire

La mesure en laboratoire consiste à reconstituer de manière artificielle l'environnement thermique dans lequel les matériaux sont plongés dans la vraie vie. [Hendel et al \(2016\)](#) ont analysé le comportement thermoclimatique de la chaussée classique, de l'asphalte, du sable stabilisé, du granit et du gazon. Des échantillons sous forme d'éprouvettes cylindriques de 16 cm de diamètre et 32 cm de hauteur ont été utilisés et ils sont entourés d'une couche isolante composée de mousse polyuréthane expansée. La température de surface a été mesurée à l'aide d'un thermocouple de type K. Ces éprouvettes sont placées dans une enceinte avec une température et une humidité, contrôlées et soumises à des conditions climatiques pendant 72 heures. Un éclairage artificiel a été fourni par des ampoules halogènes dichroïques d'une température de 5600 K. ils concluent que la nature des matériaux de sol joue un rôle important dans le confort estival. De nombreux RSE ont la capacité de stocker l'énergie solaire, tels que les enrobés.

Jiarong et al. (2018) ont développé un mélange d'asphalte résistant à la chaleur en utilisant des billes flottantes de cendres volantes et de la céramique de schiste pour remplacer les gros agrégats. Leur objectif était de réduire la température. Ils ont effectué des tests de conductivité thermique, d'effet de refroidissement et de performance thermique. Le dispositif d'essai est principalement composé de quatre systèmes : chauffage, contrôle et enregistrement de la température, et isolation. L'échantillon, de dimensions 30 cm × 30 cm × 5 cm, a été préparé et placé dans l'appareil d'essai (*Figure 41*). Cet appareil comprend un système d'éclairage à lampe au xénon, un capteur de température, un ordinateur et une boîte en verre transparent avec ouverture sur le dessus. Pour empêcher la chaleur de sortir et améliorer la précision de mesure, Ils ont scellé l'échantillon avec une plaque de mousse d'une épaisseur de 5 cm. Les résultats montrent que l'ajout de matériaux résistants à la chaleur peut réduire la conductivité thermique et la température du mélange bitumineux.



Figure 41: système de test de l'asphalte en laboratoire (Jiarong et al., 2018)



## IV.2. MÉTHODES DE SIMULATION NUMÉRIQUE

La résolution numérique d'un problème physique implique généralement l'utilisation d'un logiciel. Les modèles mathématiques qui décrivent le problème à résoudre sont intégrés dans ces logiciels, formant ainsi des codes de simulation. De nombreuses études ont été menées par de nombreux chercheurs, ce qui a conduit au développement de logiciels de simulation thermique. Cette méthode consiste à utiliser des modèles informatiques pour simuler la répartition des températures et des flux d'énergie à l'intérieur des revêtements de sol extérieur. Selon [Akram et al. \(2010\)](#), elle est plus avantageuse que la mesure in situ lorsqu'il s'agit d'étudier la mitigation de l'ICU. [Fahed \(2018\)](#) a utilisé le logiciel ENVI-met pour analyser les effets de différentes stratégies de limitation de ce phénomène sur les paramètres climatiques. Ses politiques se focalisent sur l'augmentation de l'albédo de RSE et l'enveloppe des bâtiments ainsi que l'augmentation des espaces verts et des surfaces végétalisées. Les cartes de la distribution spatiale et temporelle de la température ambiante, de l'humidité spécifique, de la température moyenne radiante et de la température physiologique équivalente ont été générées pour permettre une meilleure compréhension des effets des mesures de mitigation sur le climat urbain. Il a confirmé l'importance de se pencher sur les caractéristiques thermiques des matériaux recouvrant les rues en utilisant le modèle du quartier semi-blanc. Ce dernier est défini par le changement de l'albédo uniquement pour les routes et les trottoirs en adoptant l'asphalte à texture rouge à la place de celui qui est ordinaire.

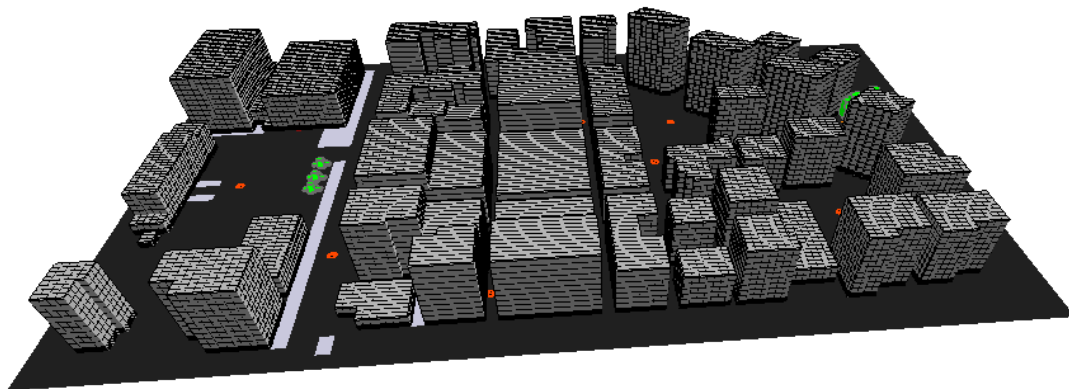


Figure 42: Modèle 3D crée à l'aide d'ENVI-met ([Fahed, 2018](#))

Mohammad et al. (2017) ont réalisé une étude à l'échelle du quartier en utilisant également ENVI-met. Ils ont effectué des simulations pour une vague de chaleur estivale afin de prédire l'effet maximal des RSE avec des surfaces ayant un albédo différent. Différents modèles ont été définis, avec la référence représentant la surface urbaine ayant un albédo de 0,1. Celui-ci est augmenté à 0.3 et à 0.5. Le confort thermique du piéton a été évalué en utilisant l'indice PET. Ils ont constaté que les marbres brillants ont des avantages microclimatiques que les granits noirs. Les résultats ont montré que les surfaces en marbre brillant offraient des avantages microclimatiques supérieurs aux surfaces en granit noir. Akram et al. (2010) ont par ailleurs utilisé le logiciel mentionné pour simuler les températures moyennes radiantés et les températures de surface. Leur étude implique différentes combinaisons de surfaces et de densités urbaines, ainsi que diverses tailles et configurations de végétation. Les résultats obtenus ont démontré que simplement recommander la plantation d'arbres à grande échelle dans les zones urbaines ne suffit pas à réduire efficacement l'effet de l'ICU. En revanche, la combinaison d'ombrage par les arbres et le choix de matériaux de surface appropriés s'est révélée plus efficace pour atténuer cet effet indésirable. Jiachuan et al. (2019) ont effectué une simulation en ligne sur "WRF" afin de prendre en compte les interactions terre-atmosphère et l'hétérogénéité de la surface. Ils ont affirmé qu'une augmentation de 0.6 de l'albédo diminue la température de surface à environ 23 °C. La Mesoscale Model version 5 (MM5) a été utilisé par Synnefa et al. (2008) pour examiner deux scénarios de modification de l'albédo tels qu'un scénario d'augmentation modérée et un scénario d'augmentation extrême. Ils ont constaté qu'une augmentation à grande échelle peut entraîner une diminution de 2 °C des températures de l'air ambiant. Jooseng et al. (2021) ont développé un modèle basé sur le bilan énergétique thermique transitoire à l'intérieur et à la surface des RSE, en tenant compte des trois principaux modes de transfert de chaleur. Ce modèle thermique a été implémenté dans un tableur et validé avec des données de terrain. Ils ont révélé qu'il existe une épaisseur de couche critique à laquelle la température maximale de surface est minimisée. Une autre simulation accomplie par Evyatar et al. (2013) à l'aide du modèle « Canyon Air Temperature » permet de prédire la température de l'air, la vitesse du vent et la température de surface dans un canyon de rue hypothermique. Ils ont utilisé les valeurs prédites pour estimer l'indice de stress thermique afin d'évaluer l'effet combiné de la modification de l'albédo sur le stress thermique des piétons dans la rue. Ils recommandent de prendre compte les changements dans le rayonnement net et la convection.

### IV.3. COMBINAISON DE MÉTHODES EXPÉRIMENTALES ET DE SIMULATION NUMÉRIQUE

Synnefa et al. (2010) ont étudié cinq échantillons d'asphalte à couche mince de dimensions 33 cm x 33 cm. Différents pigments ont été appliqués sur ces échantillons pour augmenter leur albédo tout en conservant une couleur sombre. Ils les ont pigmentés en vert, en rouge, en jaune, en beige et en blanc cassé (Figure 43). Afin d'étudier leurs propriétés optiques et leurs performances thermiques, les réflectances spectrales ont été mesurées selon la norme ASTM E903-96. Ces matériaux ont été placés sur une plate-forme non ombragée pendant toute la journée et isolés par le fond dans le but d'éliminer les effets de transfert de chaleur entre eux. Ils ont utilisé le modèle de la dynamique des Fluides Numériques pour évaluer l'impact de l'application de ces échantillons dans les espaces extérieurs sur les températures de l'air à l'échelle locale. La grille du domaine de calcul a des dimensions  $1380 \times 1704 \times 150$  et se compose  $80 \times 140 \times 50$  cellules à chaque axe respectivement. Leurs résultats indiquent que les températures de surface et la température de l'air diminuent lorsqu'on applique une couche mince colorée sur l'éprouvette. Ils ont conclu que cette dernière présente une température inférieure à celle de l'asphalte conventionnel.

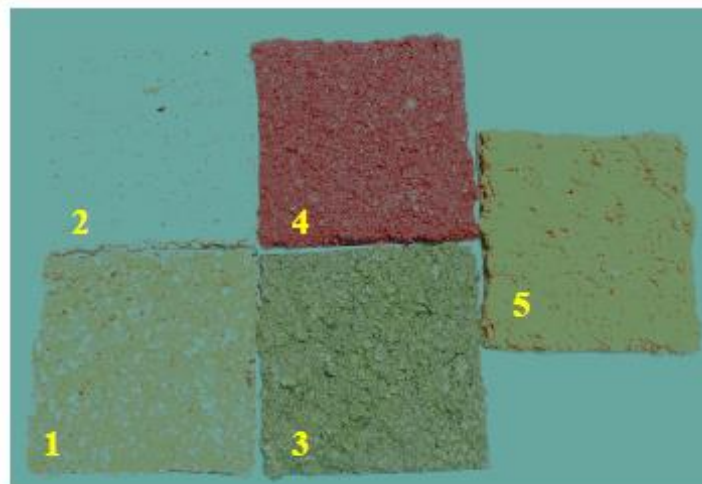


Figure 43: Éprouvettes d'asphalte pigmentés (Synnefa et al., 2010)

En 2006, [Synnefa](#) et ses collègues ont testé dix autres prototypes de revêtements à base d'acrylique. Ils ont utilisé des pigments de couleur réfléchissant le proche infrarouge et les ont comparés avec la couleur conventionnelle. Ces revêtements sont appliqués sur des pavés de béton de dimensions 40 cm × 40 cm. Leur température de surface a été contrôlée à l'aide de thermocouple type K. Les résultats expérimentaux indiquent un succès significatif dans le développement de revêtement de couleur fraîche. Ils ont constaté que les matériaux contenant ces pigments ont des valeurs de l'albédo plus élevées et des températures de surface plus basses que les revêtements standards. La différence maximale de l'albédo entre eux est de 0.22, avec une différence de température correspondante de 10.2 °C durant les conditions estivales. Ils ont également réalisé une modélisation à méso-échelle visant à évaluer l'impact de l'augmentation de ce dernier sur la température de l'air à grande échelle pendant la période estivale. Les simulations numériques ont été réalisées à l'aide de MM5. La résolution spatiale du domaine imbriqué le plus proche est  $0.67 \times 0.67 \text{ km}^2$ . [Sen et al. \(2019\)](#) ont mené une expérience sur un revêtement d'asphalte vieilli d'une superficie de 1 km<sup>2</sup>. Les données recueillies à l'aide d'une mini-station mobile (*Figure 44*) comprennent la vitesse du vent, la température de l'air et la température de surface. L'albédo a été déterminé en installant deux pyranomètres sur la plateforme. Ils ont utilisé le modèle de transfert thermique unidimensionnel à volume fini, appelé ILL-THERM pour le calcul de la température de surface dans la zone urbaine. Ils ont développé quatre stratégies pour démontrer l'efficacité des surfaces froides pour atténuer l'ICU. Dans le premier scénario, appelé "nouveaux revêtements en asphalte", ils ont simulé le microclimat de la zone en conservant la diffusivité thermique de l'asphalte, mais en réduisant leur albédo. Le deuxième scénario, nommé "revêtement en béton typique", consiste à remplacer tout l'asphalte par un béton typique, avec une augmentation de la diffusivité thermique et de l'albédo. Dans le troisième scénario, appelé "revêtements en béton réfléchissant", ils ont augmenté l'albédo du béton. Enfin, dans le quatrième scénario, ils ont envisagé une approche globale en recouvrant tous les matériaux d'une fine couche de revêtement réfléchissant.



Figure 44: Mesure de conditions climatiques avec un dispositif mobile (Sen et al., 2019)

## CONCLUSION

En conclusion, cette synthèse bibliographique met en évidence les travaux de recherche sur les diverses approches méthodologiques pour étudier l'impact de revêtements de sol extérieur sur l'ICU. Les approches expérimentales dans le cas où l'investigation se focalise sur les effets des revêtements du sol de deux types sont l'étude sur terrain et en laboratoire. Cette expérimentation a pour objet de caractériser les propriétés thermiques des matériaux de revêtements de sol et d'évaluer leur comportement thermique sous irradiation solaire dont la plupart sont à micro-échelle. Ces mesures comprennent la thermographie aérienne, les stations météorologiques au sol, les capteurs de température et d'humidité relative. Nous remarquons que les chercheurs qui effectuent ces études en laboratoire sont peu nombreux. L'approche numérique se concentre sur les recours à des logiciels de simulation. Il est à remarquer que le logiciel Envi-met est le plus populaire. La création d'outils à partir de données expérimentales est effectuée par quelques auteurs. Il est précieux pour évaluer l'efficacité de différentes configurations de revêtements de sol dans la réduction de l'ICU. Nous avons remarqué que le 30 % de cette étude se focalise sur ce dernier dont le 65 % se concerne la méthode expérimentale in situ. Par conséquent, nous allons aborder le point focal de notre thèse qui est l'étude expérimentale et la simulation numérique.

## **PARTIE 2 : EXPÉRIMENTATION ET SIMULATION NUMÉRIQUE**

## INTRODUCTION

Dans ce présent travail, nous allons évaluer l'impact du comportement thermique de pavages sur le microclimat urbain en combinant les méthodes expérimentales et la simulation numérique. En général, ce chapitre se résume dans les six étapes suivantes :

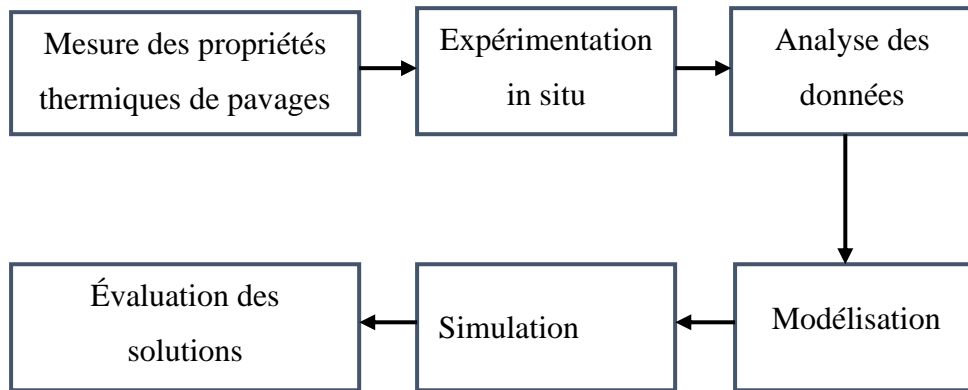


Figure 45: Étapes de l'expérimentation et la simulation

La première étape se focalise sur la mesure de la conductivité thermique, la capacité thermique volumique, la diffusivité thermique et l'albédo de pavages destinés à l'expérimentation in situ. Cette étude sur terrain consiste à disposer les pavages dans un environnement naturel. Elle a pour objectif de collecter de données météorologiques et de données de terrain, telles que les températures de surface de chaque pavage, les températures de l'air à différentes hauteurs, l'humidité relative, la vitesse du vent et la température de l'air ambiant dans la zone étudiée. Le but des traitements des données collectées est d'analyser les tendances et les corrélations entre les variables climatiques, les températures de pavages et leurs propriétés thermiques obtenues. La modélisation se concentre sur la conception du modèle afin de simuler l'impact du comportement thermique de pavages sur le microclimat urbain avec différents scénarios. Ce modèle est utilisé pour prédire les changements de la température en fonction de propriétés thermiques et radiatives de pavages ainsi que les conditions climatiques du site d'étude. Les résultats de l'analyse des données et de la modélisation sont utilisés dans la simulation. La dernière étape s'intéresse sur l'identification des solutions qui peuvent aider à améliorer le comportement thermique de pavages pour réduire leur impact sur le microclimat urbain.

# **CHAPITRE V : MATÉRIELS ET MÉTHODE DE DÉTERMINATION DES PROPRIÉTÉS THERMIQUES ET RADIATIVES DE PAVAGES**

## **INTRODUCTION**

Les propriétés thermiques et radiatives des matériaux de pavages affectent fortement le climat urbain (Cf. paragraphe IV.1.1). Avant de mener l'expérimentation in situ, nous allons mesurer l'albédo, la conductivité thermique, la capacité thermique volumique et la diffusivité thermique de nos pavés à analyser. Les matériaux en question sont des pavages locaux tels que les pavés de déchets plastiques, les pavés en terre cuite, les pavés de travertin et les pavés de béton. La méthode du fil chaud parallèle sera utilisée pour déterminer ces trois dernières propriétés. Pour estimer les valeurs de l'albédo de chaque pavage, le logiciel Mesurim 2 sera employé. L'actuel chapitre est dédié aux différents matériels et méthode pour la détermination de ces propriétés.

### **V.1.DÉTERMINATION DES PROPRIÉTÉS THERMIQUES DE PAVAGE**

La conductivité et la diffusivité thermiques, par ailleurs liées avec la capacité thermique volumique, jouent un rôle majeur dans la formation de climat urbain (Cf paragraphe IV.1.1). Il existe plusieurs méthodes pour déterminer ces propriétés. Yves (2011) a développé dans son ouvrage les sept méthodes les plus répandues, à savoir la méthode de la plaque chaude, la méthode du fil chaud, la méthode du Flash, la méthode du Tricouche, la méthode du plan chaud, la méthode du ruban chaud, la méthode du hot disc. Le choix de celles-ci dépend de la gamme de valeurs de  $\lambda$ , les faibles valeurs caractérisant les isolants, les valeurs élevées définissant les conducteurs (Cf. ANNEXE 6). Dans ce travail, nous avons opté la méthode du fil chaud parallèle. Son intérêt majeur réside dans le fait qu'elle est dédiée à un large éventail de matériaux tels que les métaux, les polymères, les isolants et les composites. Par ailleurs, elle est très sensible aux variations de la conductivité thermique, ce qui permet d'obtenir des mesures précises. Les éprouvettes nécessaires à l'expérimentation peuvent être de taille réduite, les petits échantillons. Ainsi, elle est particulièrement avantageuse pour les matériaux coûteux ou rares. En outre, il est possible d'effectuer les mesures in situ, dans des conditions réelles d'utilisation, et/ou à des températures élevées, ce qui est souvent difficile à réaliser avec d'autres méthodes.



### V.1.1. Préparation des éprouvettes

Quatre types de pavages ont été destinés à la mesure, à savoir les pavés de déchets plastiques, les pavés en terre cuite, les pavés de travertin et les pavés de béton. Leurs procédés de fabrication sont présentés dans l'ANNEXE 8 à 11. Selon Yves et al. (2019), les dimensions de l'éprouvette sont fixées à 150 mm×150 mm×30 mm.

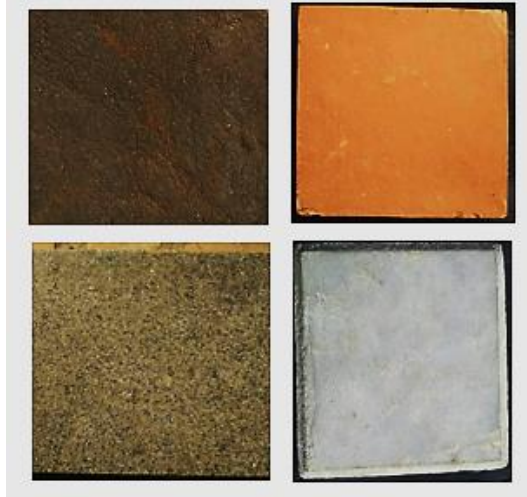


Figure 46: Éprouvettes destinées à la mesure de conductivité thermique

### V.1.2. Méthode du fil chaud

#### a. Principe de mesure

La méthode du fil chaud parallèle est une méthode de mesure dynamique fondée sur la détermination de l'élévation de la température en fonction du temps en un point donné et à une distance spécifiée d'une source thermique linéaire encastrée entre deux éprouvettes (ISO 8894-2). C'est une mesure en régime transitoire. Le fil chauffant est placé entre les surfaces de deux éprouvettes du matériau à caractériser (figure 47). Un échelon de flux constant ( $\varphi = 0$  si  $t < t_0$  et  $\varphi = \varphi_0$  si  $t > t_0$ ) est appliqué au fil chauffant et l'on relève l'évolution de la température  $T_t(t)$  à une distance  $d$  de ce fil. Pendant le temps où la perturbation n'a pas atteint les autres faces des éprouvettes, c'est-à-dire où l'hypothèse du milieu semi-infini est valide, on peut considérer que le transfert au centre de l'éprouvette autour du fil est radial. La modélisation de ce transfert de chaleur permet de calculer l'évolution de la température au centre de l'éprouvette. On applique une méthode d'estimation de paramètres pour calculer les valeurs de :

- La conductivité thermique
- La capacitance thermique de l'ensemble sonde et résistance chauffante
- La résistance de contact à l'interface de sonde/éprouvette.

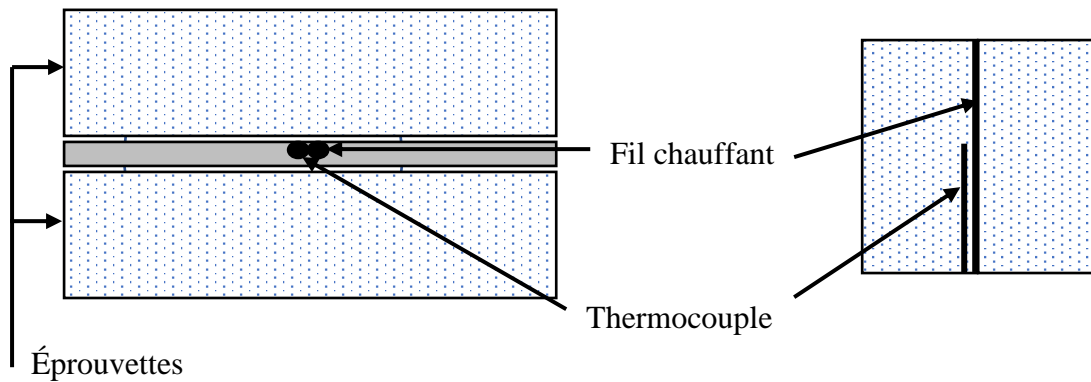


Figure 47: Schéma de la coupe de la méthode du fil chaud a) vue de face b) vue de haut (Yves , 2011)

### b. Modèles

Un certain nombre de méthodes de caractérisation thermique sont devenues populaires du fait de la simplicité du mode d'exploitation des résultats, ce qui représentait un avantage décisif lorsque les moyens de calcul étaient plus limités qu'aujourd'hui. Le développement des moyens de calcul permet maintenant d'utiliser des modèles plus complets faisant appel à moins d'hypothèses simplificatrices ou permettant de les vérifier plus simplement. Dans cette étude, la détermination de la conductivité thermique repose sur un modèle quadripolaire complet (Cf paragraphe I.1.6).

Le voisinage du fil chauffant est schématisé sur la figure suivante :

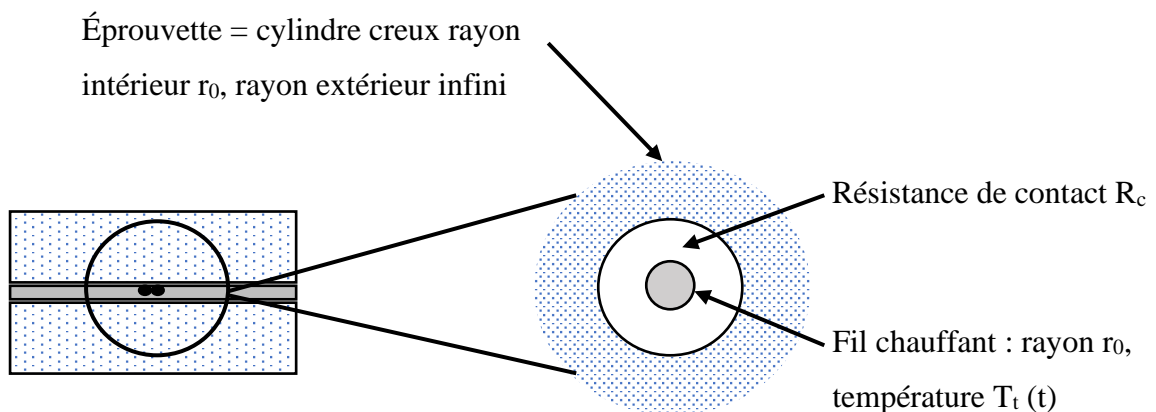


Figure 48: Schéma des transferts autour du fil chaud (Yves , 2011)

Le système est modélisé à l'aide du formalisme des quadripôles reliant le fil chauffant et un point de l'éprouvette situé à une distance d du fil. Cette relation est décrite par l'équation V-1, qui est obtenue en associant en cascade les matrices quadripôles de ces deux matériaux et celles de la résistance de contact (Cf. paragraphe I.1.1). Le fil chaud est équivalent à un cylindre plein, tandis que l'éprouvette est un cylindre creux. Les matrices correspondantes sont récapitulées dans le tableau 40 de l'ANNEXE 3. Les grandeurs de sortie sont les mesures effectuées au niveau du fil chauffant (indice w), alors que les grandeurs d'entrée correspondent aux mesures prises à une distance d du fil chauffant (indice d).

$$\begin{bmatrix} \theta_w \\ \frac{\varphi_w}{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_w & B_w \\ C_w & D_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & R_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_s & B_s \\ C_s & D_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_d \\ \frac{\theta_d}{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_d \\ \frac{\theta_d}{Z} \end{bmatrix} \quad (V-1)$$

Avec:

$$A_w = 1$$

$$B_w = \frac{1}{2\pi\lambda_w L q_w r_w} \frac{I_0(q_w r_w)}{I_1(q_w r_w)} - \frac{1}{\rho_w C_{pw} \pi r_w^2 L p}$$

$$C_w = \rho_w C_{pw} \pi r_w^2 L$$

$$D_w = \frac{q_w r_w I_0(q_w r_w)}{2 I_1(q_w r_w)}$$

$$A_s = q_s d [K_1(q_s d) I_0(q_s r_w) + K_0(q_s r_w) I_1(q_s d)]$$

$$B_s = \frac{1}{2\pi\lambda_s L} [K_0(q_s r_w) I_0(q_s d) - K_0(q_s d) I_0(q_s r_w)]$$

$$C_s = 2\pi L \rho_s C_{ps} r_w d p [K_1(q_s r_w) I_1(q_s d) - K_1(q_s d) I_1(q_s r_w)]$$

$$D_s = q_s r_w [K_1(q_s r_w) I_0(q_s d) + K_0(q_s d) I_1(q_s r_w)]$$

$$\frac{1}{Z} = 2\pi\lambda_s L q_s d \frac{K_1(q_s d)}{K_0(q_s d)} ; q_w = \sqrt{\frac{p}{a_w}} ; q_s = \sqrt{\frac{p}{a_s}}$$

Où :

$\theta_w$ : transformée de Laplace de l'augmentation de la température du fil

$\theta_d$ : transformée de Laplace de l'augmentation de la température à une distance d dans le solide

$I_0, I_1, K_0, K_1$  : fonctions de Bessel

$\lambda_w$ : conductivité thermique du fil chauffant

$\rho_w C_{pw}$ : capacité volumique du fil chauffant

L : longueur du fil chauffant

$r_w$  : Rayon du fil chauffant

d: distance entre le fil chauffant et le thermocouple

$\lambda_s$ : conductivité thermique de l'éprouvette

$a_s$  : diffusivité thermique de l'éprouvette

$R_c$ : résistance de contact à l'interface fil chauffant / éprouvette

$p$ : variable de Laplace

$\varphi_w$ : puissance dissipée dans le fil chauffant

Ainsi,

$$\frac{\varphi_w}{p} = \left( C + \frac{D}{Z} \right) \theta_d$$

$$\theta_d(p) = \frac{\frac{\varphi_w}{p}}{C + \frac{D}{Z}} \quad (V-2)$$

Avec:

$$C = A_s C_w + C_s (C_w R_c + D_w)$$

$$D = B_s C_w + D_s (C_w R_c + D_w)$$

Si la résistance thermique du fil chauffant est négligée, l'équation V-2 devient :

$$\theta_d(p) = \frac{\frac{\varphi_w}{pL} K_0(q_s d)}{\rho_w C_{pw} \pi r_w^2 p K_0(q_s r_w) + 2 \pi \lambda_s q_s r_w [1 + \rho_w C_{pw} \pi r_w^2 p R_c L] K_1(q_s r_w)} \quad (V-3)$$

L'éprouvette et le thermocouple ont des propriétés différentes et ce dernier ne produit pas de chaleur, on a alors :

$$\begin{bmatrix} \theta_t \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_t & B_t \\ C_t & D_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & R_t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_d \\ \Phi_d \end{bmatrix} \quad (V-4)$$

$\begin{bmatrix} A_t & B_t \\ C_t & D_t \end{bmatrix}$  est la matrice quadripolaire de thermocouple

$\Phi_d$  est la transformée de Laplace de la puissance dissipée à la distance  $d$  du fil chauffant.

$R_t$  est la résistance thermique de contact entre le thermocouple et l'éprouvette.

En négligeant la résistance thermique du thermocouple comparée avec la résistance thermique de contact entre le thermocouple et l'éprouvette, nous pouvons écrire :

$$A_t = 1 ; B_t = 0 ; C_t = \rho_t C_{pt} \pi r_t^2 L R_t ; D_t = 1$$

Avec  $r_t$  est le rayon du thermocouple,  $L$  est sa longueur,  $\rho_t$  est sa masse volumique et  $c_t$  est sa chaleur spécifique.

$$\theta_t(p) = \frac{\theta_d(p)}{1 + C_t p} \quad (V-5)$$

Alors, cette relation nous amène à un modèle que nous appelons « **modèle quadripôle** ». De plus, le modèle utilisé dans la **norme ISO 8894-2** (Cf. [ici](#)) considère le fil chauffant ayant un rayon nul. Ainsi, nous pouvons utiliser le développement limité des fonctions de Bessel au voisinage de zéro.

$$K_0(x) \approx -\ln(x) ; K_1(x) \approx \frac{1}{x} ; I_0(x) \approx 1 ; I_1(x) \approx \frac{x}{2}$$

D'où :

$$A_w \approx 1$$

$$B_w \approx 0$$

$$C_w \approx 0$$

$$D_w \approx 1$$

D'après ces approximations, on a :

$$C = A_s C_w + C_s (C_w R_C + D_w) = C_s$$

$$D = B_s C_w + D_s (C_w R_C + D_w) = D_s$$

D'où :

$$C_s \approx 2 \pi L \sqrt{\lambda_s \rho_s C_{ps}} d \sqrt{p} I_1(q_s d)$$

$$D_s \approx I_0(q_s d)$$

$$C_+ \frac{D}{Z} = \frac{2 \pi L d \sqrt{\lambda_s \rho_s C_{ps}} p \left[ \frac{I_1(q_s d) K_0(q_s d) + K_1(q_s d) I_0(q_s d)}{K_0(q_s d)} \right]}$$

$$\text{Alors } C_+ \frac{D}{Z} = \frac{2 \pi \lambda_s L}{K_0(q_s d)}$$

$$\theta_t(p) = \frac{\varphi_w}{p} \frac{K_0(q_s d)}{2 \pi \lambda_s L}$$

$$\text{Selon Carslaw et al. (1959), } L^{-1} \left[ \frac{1}{p} K_0(x \sqrt{p}) \right] = \frac{1}{2} \int_{\frac{x^2}{4t}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du$$

$$\text{Avec } -E_i(y) = \int_y^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du$$

Donc :

$$T_t(t) = -\frac{\varphi_w}{2 \pi \lambda_s L} E_i \left( \frac{d^2}{4 a_s t} \right) \quad (\text{V-6})$$

$E_i$  : intégral exponentiel

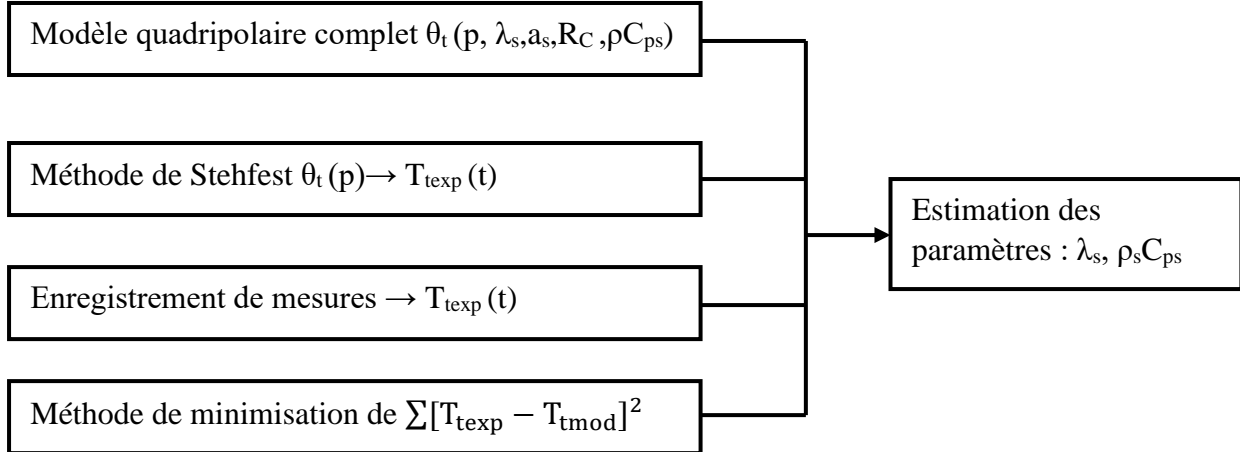
### c. Estimation de paramètres

Les propriétés thermiques du fil chauffant sont supposées être connues de sorte que les inconnues soient la conductivité thermique  $\lambda_s$ , la capacité volumique  $\rho_s c_s$  des éprouvettes et la résistance thermique de contact  $R_c$  entre le fil chauffant et ces dernières. La constante de temps  $C_t$  peut être ajoutée comme paramètre inconnu si les propriétés thermiques de l'éprouvette sont très différentes de ceux du thermocouple.

La température  $T_t(t)$  peut être calculée par la transformée de la Laplace inverse appliquée à  $\theta_t(p)$  réalisée en utilisant la méthode du Stehfest (Stehfest, 1970). L'algorithme de Marquardt (1963) est utilisé pour trouver les valeurs des paramètres inconnus qui minimisent la somme des erreurs quadratiques :

$$S = \sum_{n=1}^N [T_{t_{\text{exp}}}(t) - T_{t_{\text{mod}}}(t)]^2 \quad (\text{V-7})$$

C'est une méthode itérative utilisée pour résoudre les problèmes de moindres carrés non linéaires. Elle combine les avantages de la méthode de Gauss-Newton et de la méthode de la descente de gradient. Elle utilise des valeurs initiales et ajuste les paramètres itérativement pour minimiser la fonction d'erreur.



Pour l'estimati Figure 49: Schéma récapitulatif de l'estimation de paramètres :

$$T_t(2t) = -\frac{\varphi_w}{2\pi\lambda_s L} E_i\left(\frac{d^2}{8a_s t}\right)$$

$$D'où U = \frac{T_t(2t)}{T_t(t)} = \frac{E_i\left(\frac{d^2}{8a_s t}\right)}{E_i\left(\frac{d^2}{4a_s t}\right)} = \frac{E_i\left(\frac{u}{2}\right)}{E_i(u)}$$

Yves et al. (2019) ont identifié la fonction polynomiale suivante qui permet de calculer  $E_i$  :

$$E_i \left( \frac{d^2}{4a_s t} \right) = a_0 + a_1 U + a_2 U^2 + a_3 U^3 + a_4 U^4 + a_5 U^5 + a_6 U^6 + a_7 U^7 \quad (\text{V-8})$$

Avec

$$a_0 = 474.926168472597$$

$$a_1 = -1574.223079517534$$

$$a_2 = 2262.705889755608$$

$$a_3 = -1816.820318813171$$

$$a_4 = 877.286213344994$$

$$a_5 = -254.266213344994$$

$$a_6 = 40.904415135482$$

$$a_7 = -2.815400284900$$

La conductivité thermique est calculée en utilisant l'équation suivante :

$$\lambda_s = -\frac{\varphi_w}{4\pi L T_t(t)} E_i \left( \frac{d^2}{4a_s t} \right) \quad (\text{VI-9})$$

$$\text{Avec } \varphi_w = \frac{UI}{L}$$

U : Tension aux bornes du fil chauffant

I : Intensité du courant qui traverse le fil chauffant

L : Longueur du fil chauffant

Le calcul doit être effectué dans un intervalle du temps pendant lequel les hypothèses (masse du fil chauffant négligeable, milieu semi-infini) sont valides. Ainsi, il est important de bien choisir l'intervalle d'estimation sur lequel la température de la face non chauffée est constante.

La norme ISO 8894 recommande de prendre les valeurs de conductivité thermique calculée pour les valeurs de rapport  $\frac{T(2t)}{T(t)}$  entre 1.5 et 2.4.

#### d. Matériels

La mise en œuvre de la méthode du fil chaud parallèle nécessite :

- Un fil résistif
- Une alimentation stabilisée
- Un voltmètre
- Un ampèremètre
- Un système d'acquisition de données

### d.1. Fil résistif Nickel-Chrome

C'est un fil qui permet de réaliser des appareils compacts pouvant subir des surcharges sévères et même de court-circuit sans dommage. Ils sont fabriqués à partir de divers matériaux, tels que le nickel, le chrome, le fer, le cuivre et le tungstène. Les fils résistifs peuvent avoir des caractéristiques de résistance différentes en fonction de leur matériau, de leur épaisseur, de leur longueur et de leur température de fonctionnement. Les fils résistifs sont couramment utilisés dans les circuits électroniques, les capteurs, les dispositifs de chauffage et les éléments de résistance variables. Ils sont également utilisés dans les dispositifs de chauffage tels que les résistances de chauffage, les éléments chauffants. La méthode du fil chaud a des limites de température en fonction des matériaux utilisés pour la fabrication du fil chaud. Ainsi, l'alliage nickel-chrome 80 est l'un des matériaux utilisés dans la plupart des appareils électriques de chauffage domestique et des équipements chauffants à température moyenne. Il est composé de 80% de nickel et 20% de chrome. L'excellente résistance à la corrosion du nickel-chrome le rend intéressant ainsi que sa résistance précise et stable. Ils peuvent être choisis pour leur faible coefficient de température, leur capacité à résister aux hautes températures, leur capacité à supporter des courants élevés. Notre fil est conforme aux spécifications ASTM B344 et est conçu pour une utilisation jusqu'à 1200 °C.



Figure 50: Fil résistif Nickel-Chrome 80/20



## d.2. Alimentation stabilisée

Une alimentation stabilisée est un dispositif électronique qui permet de régler la tension et éventuellement du courant nécessaire au fonctionnement d'un appareil électrique ou électronique. Dans sa version de laboratoire, elle est généralement conçue pour fonctionner en générateur idéal de tension et de courant. Elles sont souvent utilisées dans les applications électroniques où une tension précise et constante est nécessaire, telles que les circuits électroniques de contrôle de moteurs, les équipements de mesure, les systèmes de communication, les équipements médicaux et les appareils de laboratoire. En général, l'alimentation stabilisée est une source d'alimentation plus fiable et plus précise que les alimentations non stabilisées. Ainsi, elle assure une tension constante et stable indépendamment des fluctuations de la tension d'entrée et de la charge connectée. La valeur maximale de tension et d'intensité de courant qu'elle délivre est respectivement 30 V et 10 A.



Figure 51: Alimentation stabilisée

## d.3. Voltmètre ampèremètre digital

Le voltmètre ampèremètre digital est un instrument de mesure électronique polyvalent qui permet de mesurer à la fois la tension et le courant électrique. La grande majorité des appareils de mesure actuels est construite autour d'un voltmètre et ampèremètre numériques. La grandeur physique à mesurer étant convertie en tension et en courant électrique à l'aide d'un capteur approprié. Ainsi, le KWS-DC121 a été utilisé pour mesurer ces deux grandeurs. La gamme de mesure pour la tension est de 0.00 – 99.9 V tandis qu'elle peut mesurer l'intensité de courant de 0 – 49.9 A.



Figure 52: Voltmètre-Ampèremètre

#### d.4. Thermocouple DH-1-24

Le thermocouple DH-1-24 est un type de thermocouple industriel couramment utilisé pour mesurer la température élevée. Il est généralement composé de deux fils métalliques différents, généralement en nickel et en chrome, qui sont soudés ensemble aux extrémités pour former une jonction de mesure. L'autre extrémité des fils est connectée à un instrument de mesure, tel qu'un indicateur de température ou un enregistreur de données, qui convertit la tension générée par la jonction en une mesure de la température. Le thermocouple DH-1-24 est capable de mesurer des températures allant jusqu'à environ 1600 °C avec une précision acceptable et une résolution de 0.01 °C. Il est un thermocouple de type K, qui est l'un des types les plus courants de thermocouples en raison de sa stabilité à haute température et de sa large plage de mesure. L'isolant à haute température est en céramique avec une forme cylindrique à deux trous. Le diamètre des fils est égal à 0,5 mm avec une longueur de 300 mm. La conductivité thermique de nickel-chrome 80/20 est 11.3 W/m K (Yves et al., 2019). Sa capacité thermique volumique est égale à  $3.78 \times 10^6$  J/m<sup>3</sup> K.



Figure 53: Thermocouple DH-1-24

### d.5. Système d'acquisition de données

Afin d'enregistrer la température donnée par le thermocouple, nous avons utilisé une carte Arduino, un module MAX 6675 et un module micro-SD. C'est une carte de développement open-source basée sur un microcontrôleur, qui peut être utilisée pour créer des projets électroniques interactifs. Elle sert à contrôler ces deux modules. Le module MAX 6675 est un convertisseur analogique-numérique (CAN) utilisé pour mesurer la température. Il est principalement utilisé pour mesurer des températures élevées. Le module MAX 6675 fonctionne en utilisant un thermocouple pour mesurer la température, qui est ensuite convertie en une valeur numérique. Il est facile à utiliser et ne nécessite pas de calibrage ou de réglage. Un module micro-SD Arduino est un module d'extension qui permet à un microcontrôleur Arduino de lire et d'écrire des données sur une carte microSD. Il s'agit d'un petit circuit intégré qui se connecte à un port de carte microSD et à un port de communication série de l'Arduino.



Figure 54: Système d'acquisition de données a) carte Arduino b) module MAX 6675 c) module micro-SD

### e. Montage

Les éprouvettes sont installées entre deux plaques en acier inoxydable 316L de même section et d'une épaisseur de 2 mm. Celles-ci assurent une température uniforme sur leur face non chauffée. Elles fournissent également une inertie thermique qui minimise les variations de leur température. De plus, on applique une pression sur les éprouvettes afin de minimiser les résistances de contact thermique (*figure 56*). L'augmentation de la température  $T_s(t)$  est mesurée avec un thermocouple type K chemisé. Ce dernier est inséré dans une rainure de section  $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$  et installé sur le milieu de l'éprouvette afin de mesurer la température au centre. La température est enregistrée avec un pas de temps de 0.1 s par un système d'acquisition de données carte SD connecté à l'Arduino.

L'écart de température mesurée  $T_s(t)$  avant le chauffage est de  $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Le fil chauffant est inséré dans une rainure de  $0.5 \times 0.5\text{ mm}^2$  de section. Il a la même longueur que l'éprouvette et on le place au milieu de la face de ce dernier. La distance entre le thermocouple et le fil chauffant est  $d = 5\text{ mm}$ . Deux fils de longueur  $L = 203\text{ mm}$  sont soudés sur le bout de ce dernier et ils sont connectés à un voltmètre. Une alimentation stabilisée produit un courant électrique constant  $I$  traversant ce fil. Les mesures permettent de calculer la résistance électrique par mètre du fil chauffant par  $\frac{R_{el}}{L} = \frac{U}{IL}$ . Il convient de noter que la méthode du fil chaud peut être affectée par diverses sources d'erreur, telles que les pertes thermiques à travers les surfaces de l'éprouvette, les variations de température à l'intérieur et les fluctuations du courant électrique. Par conséquent, il est important de prendre en compte ces facteurs pour obtenir des mesures précises de la conductivité thermique. Cette méthode nécessite une calibration préalable pour obtenir des mesures précises. La calibration doit être réalisée avec des éprouvettes de matériaux dont la conductivité thermique est connue avec précision.

La figure 55 présente une vue schématique du dispositif expérimental.

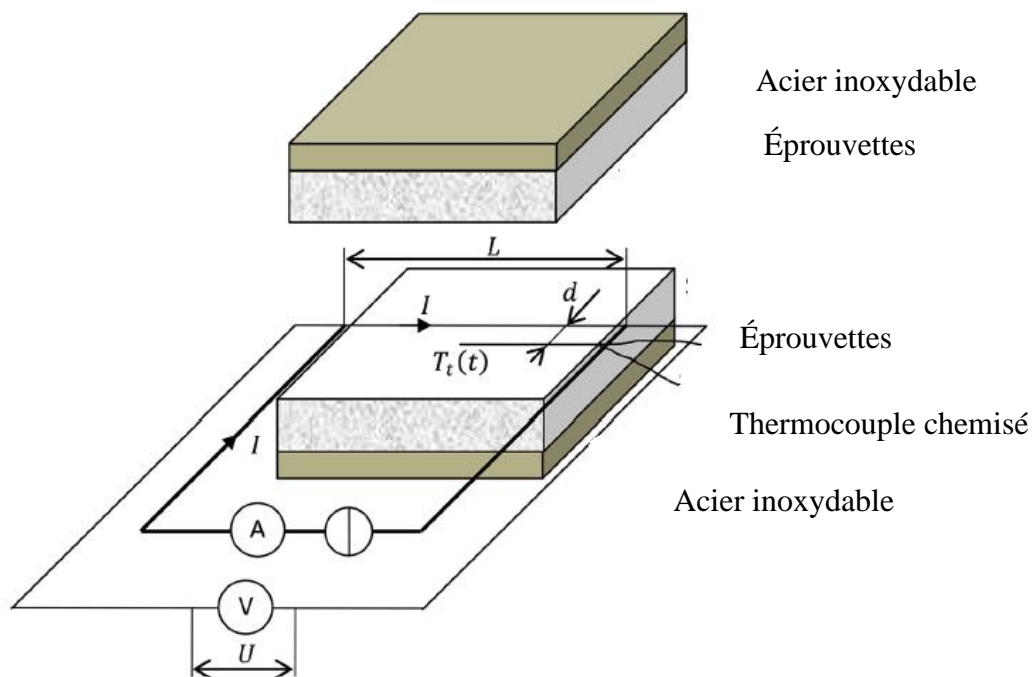


Figure 55: Vue schématique du dispositif

La convection qui se produira sur la face latérale de l'éprouvette chauffée augmentera le coefficient de transfert de chaleur par convection. Pour éviter ce problème, les éprouvettes ont été placées dans des gaines minces scellés d'épaisseur environ 0,05 mm dans lesquels l'air atteint une humidité d'équilibre avec l'éprouvette, empêchant la convection. Il a été vérifié que la résistance thermique de la gaine est négligeable par rapport à la résistance thermique de ces dernières (Yves et al., 2019).



Figure 56: Photo prise pendant l'expérimentation sur la mesure de la conductivité thermique

#### **f. Estimation de propriétés thermiques à partir de données expérimentales**

Les données obtenues durant l'expérimentation sont analysées dans un programme développé sous MATLAB afin d'estimer les propriétés thermiques de pavages. Ce logiciel offre des fonctionnalités intégrées spécifiques pour le traitement des données expérimentales et l'ajustement des courbes. Nous pouvons utiliser la fonction de régression non linéaire. Elle possède un environnement de développement intégré convivial avec une interface utilisateur graphique (GUI) qui facilite l'exploration et l'analyse des données. De plus, il existe des bibliothèques et des fonctions qui implémentent la méthode de Levenberg-Marquardt. L'organigramme de calcul est représenté par la figure suivante :

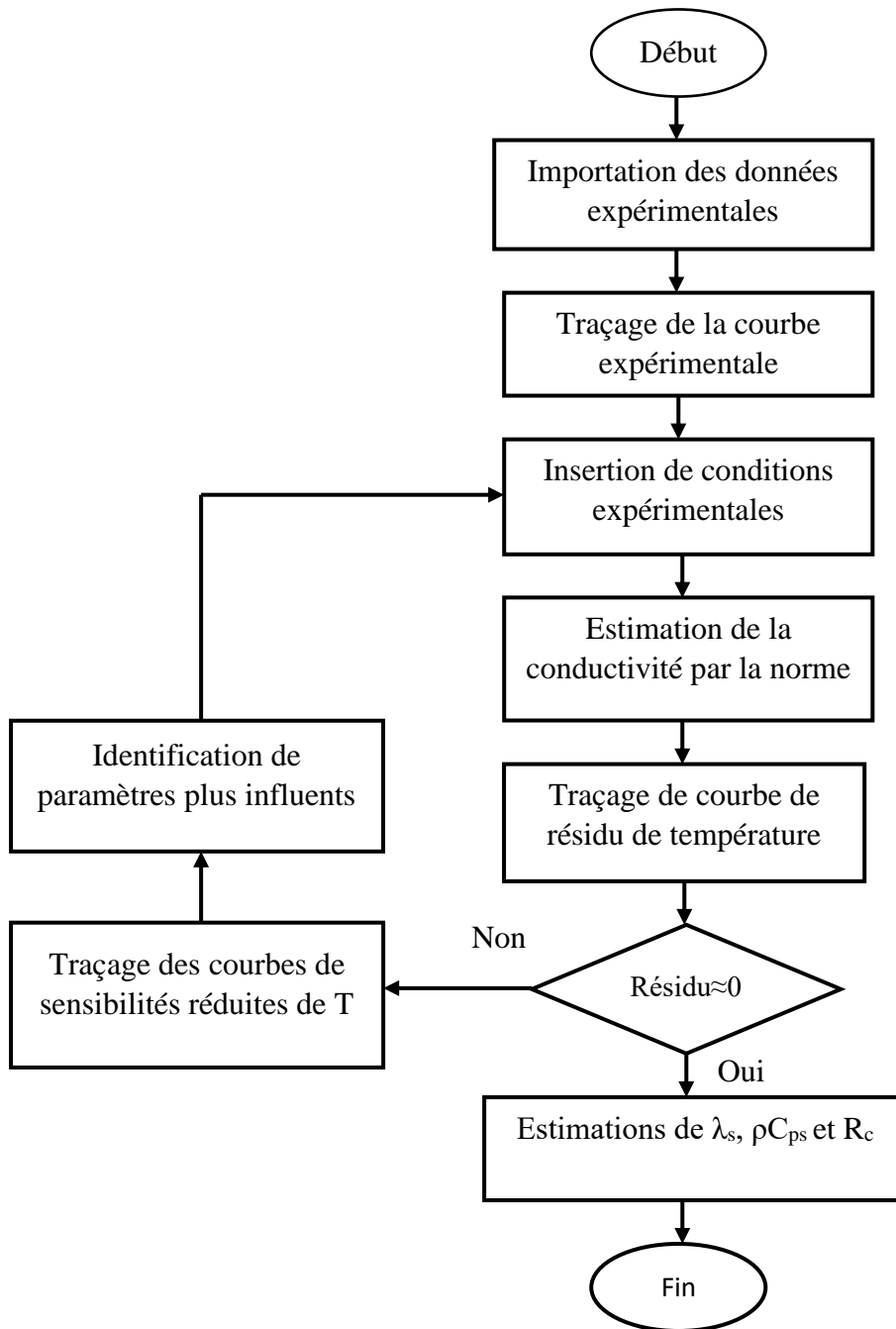


Figure 57: Organigramme pour l'estimation de  $\lambda_s$ ,  $\rho C_{ps}$  et  $R_c$  à partir des données expérimentales

## f.2. Traçage de la courbe expérimentale

Les données expérimentales rassemblent la température  $T_t(t)$  du thermocouple. Le fichier texte qui contient ces données a été importé dans le programme programme MATLAB. Après son exécution, le thermogramme expérimental illustré par la *figure 58* est obtenu. Cette figure représente la courbe de variation de la température enregistrée au centre de l'éprouvette en fonction du temps.

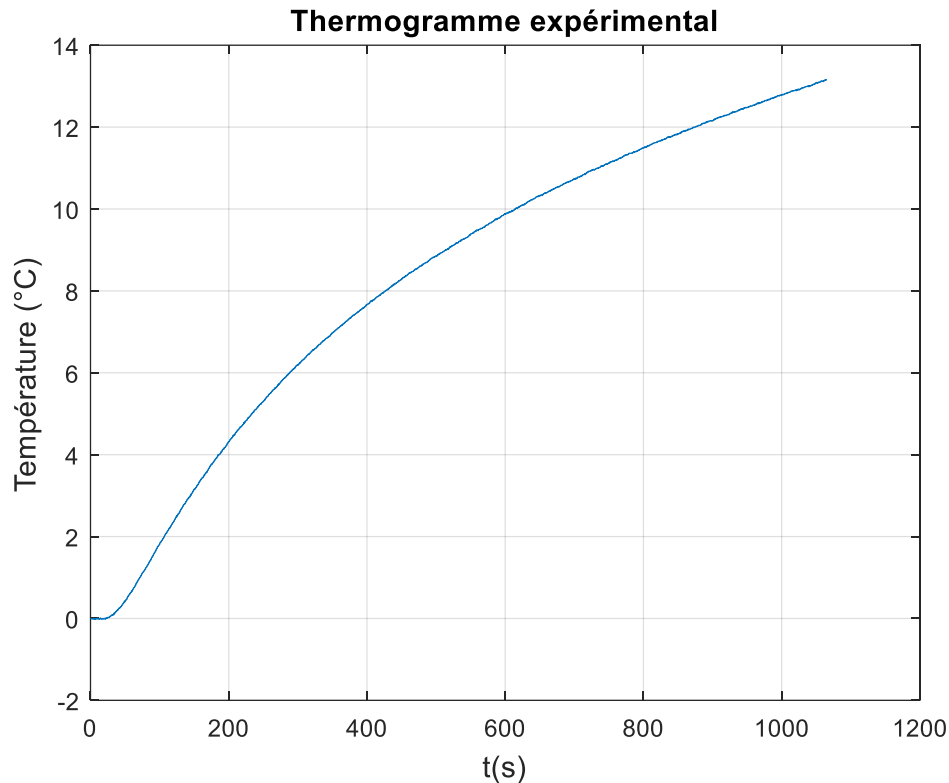


Figure 58: Thermogramme expérimental

### f.3. Insertion de conditions expérimentales

Lorsque nous effectuons une régression non linéaire, il est courant de fournir des valeurs initiales pour les paramètres du modèle (Cf. paragraphe V.1.2). Elle vise à ajuster ces derniers de manière itérative pour minimiser l'écart entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites. Pour commencer cette itération, des valeurs initiales appropriées sont nécessaires. Celles-ci devraient être proches des valeurs réelles des paramètres afin de faciliter le processus d'ajustement. Dans ce travail, nous devons fournir de valeurs initiales pour la conductivité thermique, la capacité thermique volumique et la résistance de contact.

L'interface représentée par la figure 59 est utilisée pour l'entrainement des conditions expérimentales, à savoir la distance entre le fil chauffant et le thermocouple, l'intensité du courant et la tension aux bornes de ce fil, les valeurs initiales de propriétés thermiques ainsi que le temps du début et fin de l'estimation.

Entrée des conditions expérimentales

Distance fil/thermocouple  
0.005

Intensité (A)  
1.9

Tension(U)  
2.48

Conductivité thermique estimée  
1.8

Capacité thermique estimée  
2500000

Temps début estimation  
1

Temps fin estimation  
1000

OK Cancel

Figure 59: Interface destinée à insérer les conditions expérimentales

#### f.4. Estimation de la conductivité par la norme

Après la validation de conditions expérimentales, la courbe de variation de la conductivité thermique estimée par la norme ISO 8894 s'affiche comme l'indiqué par la figure suivante :

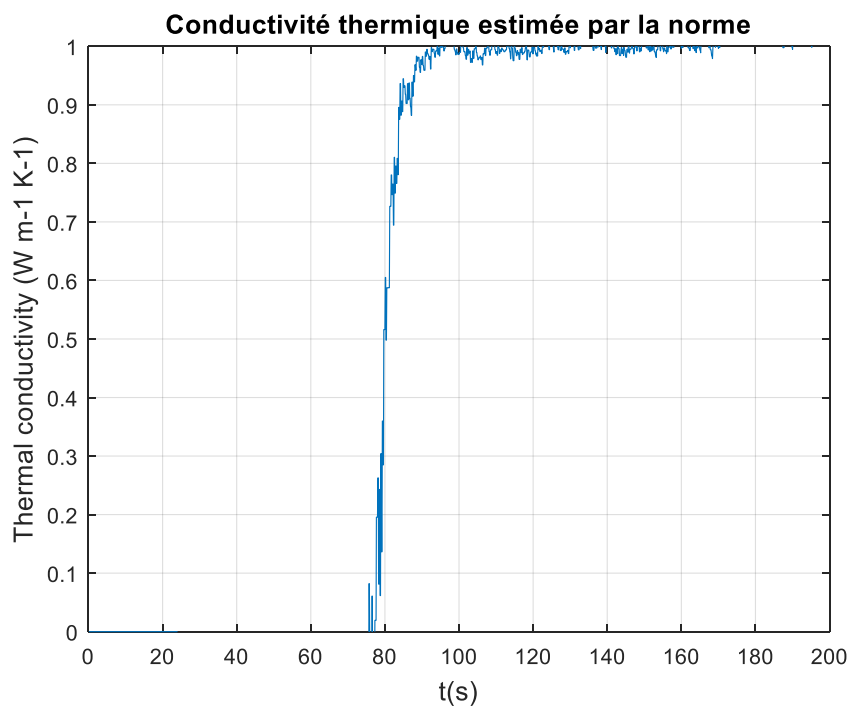


Figure 60: Figure 33 : Conductivité thermique estimée par la norme



### f.5. Traçage de courbe de résidu de température

Le résidu représente la différence entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites par le modèle. L'objectif est de minimiser ces résidus pour obtenir un ajustement optimal du modèle aux données.

$$\text{Residu} = T_{\text{exp}} - T_{\text{mod}} \quad (\text{V-10})$$

La valeur du résidu peut fournir plusieurs informations importantes concernant l'ajustement du modèle aux données :

- Si les résidus ont tendance à être positifs pour certaines observations et négatifs pour d'autres, cela peut indiquer une tendance systématique de sous-estimation ou de surestimation du modèle.
- Si les résidus sont généralement proches de zéro, le modèle prédit correctement les valeurs expérimentales dans une certaine mesure.
- Si certains résidus ont des valeurs absolues élevées, le modèle ne parvient pas à capturer certaines variations importantes ou des comportements spécifiques des données. Cela peut être dû à une mauvaise spécification du modèle ou à des valeurs aberrantes dans les données.

La *figure 61* donne les courbes de variation de la température expérimentale, la température modélisée et les résidus.

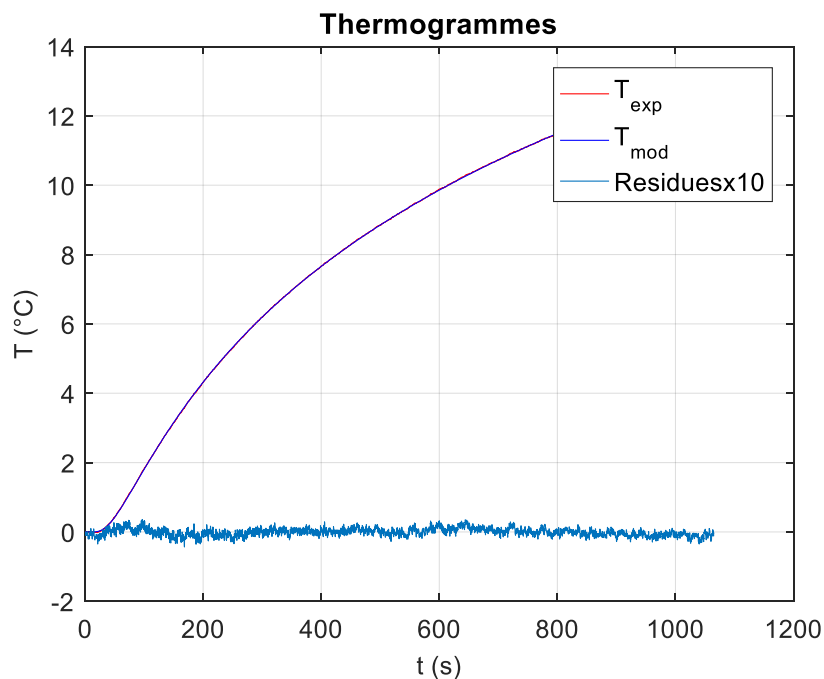


Figure 61: Thermogrammes expérimental, modélisé et résidu

### f.6. Traçage des courbes de sensibilités réduites de la température $T_t$

La sensibilité réduite est une mesure permettant d'évaluer l'importance relative des paramètres dans un modèle. Elle aide à identifier les paramètres les plus influents. La sensibilité réduite de la température par rapport à la conductivité thermique, la capacité thermique volumique, et la résistance de contact se calcule par :

$$\lambda_s \frac{\partial T(t)}{\partial \lambda_s}, \rho C_p \frac{\partial T(t)}{\partial (\rho C_p)}, R_c \frac{\partial T(t)}{\partial R_c} \quad (V-11)$$

La sensibilité réduite élevée indique que de petites variations de paramètre par rapport à sa valeur initiale ont un impact significatif sur les résultats du modèle. Une valeur égale à zéro signifie que cet impact est limité.

La figure 62 représente les sensibilités réduites de la conductivité thermique estimée, la capacité thermique volumique estimée et la résistance de contact entre les deux éprouvettes testées.

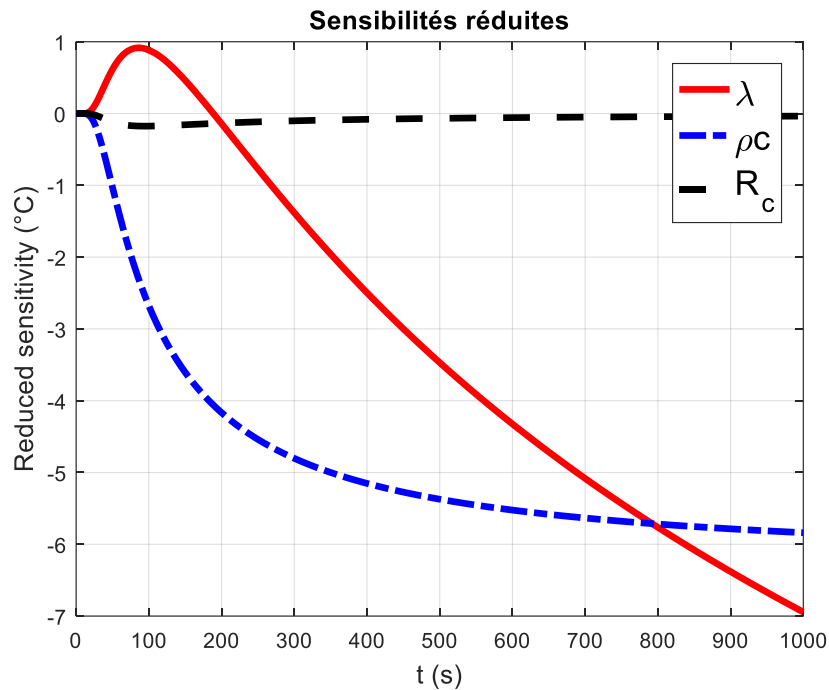
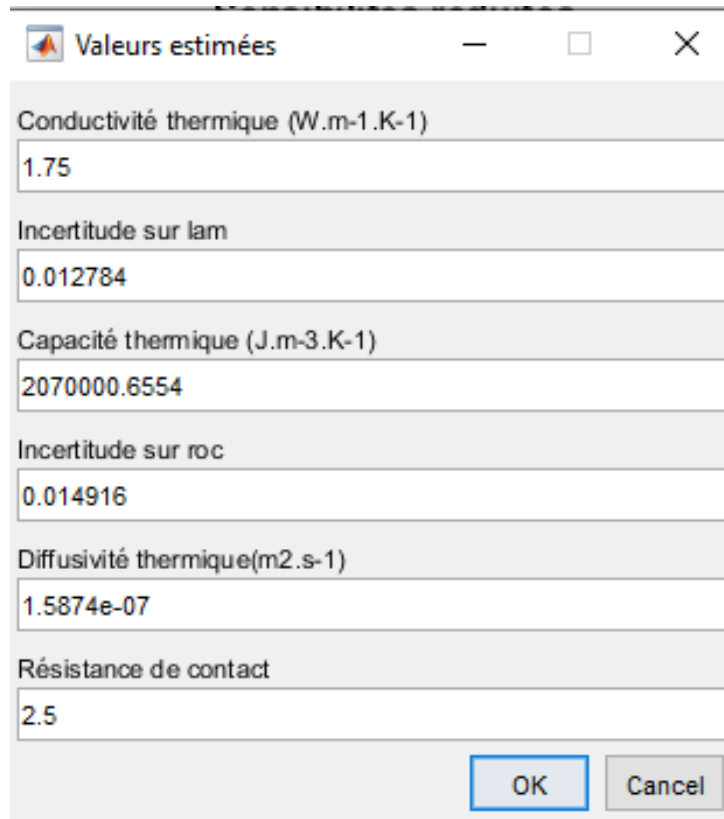


Figure 62: Sensibilités réduites de la température par rapport à la conductivité thermique, la capacité thermique estimées et la résistance de contact.

### f.7. Estimations de $\lambda_s$ , $\rho C_p$ et $R_c$

L'interface illustrée par la figure 63 présente les résultats finaux, notamment la conductivité thermique et la diffusivité thermique du matériau testé, ainsi que la résistance de contact entre les deux éprouvettes utilisées pour la mesure.



The screenshot shows a window titled "Valeurs estimées" with the following fields and values:

Propriété	Valeur
Conductivité thermique (W.m-1.K-1)	1.75
Incertitude sur lam	0.012784
Capacité thermique (J.m-3.K-1)	2070000.6554
Incertitude sur roc	0.014916
Diffusivité thermique(m2.s-1)	1.5874e-07
Résistance de contact	2.5

Buttons: OK, Cancel

Figure 63: Interface pour afficher les valeurs estimées

## V.2.DÉTERMINATION DE PROPRIÉTÉS RADIATIVES DE PAVAGES

L'étude menée dans le paragraphe V.1.1 du chapitre IV permet d'affirmer que l'albédo impacte fortement la température de surface de revêtements de sol et la température de l'air. Divers capteurs sont utilisés afin de déterminer sa valeur, tels que l'albédomètre, le pyranomètre et le radiomètre solaire (Cf. Paragraphe II.1.1). Ils ne sont pas facilement accessibles sur le marché malgache et leur conception nécessite une solide compréhension de l'électronique. Une autre méthode basée sur les images OLI a été développée par plusieurs études afin de le calculer à l'échelle locale (Cf. Paragraphe II.1.1). Dans cette étude, nous avons utilisé Mesurim 2 pour estimer l'albédo de surface de chaque pavage destiné à l'expérimentation. C'est un logiciel dédié à la détermination de l'albédo de surface par analyse numérique d'images.



Figure 64: Image JPEG de pavés de déchets plastiques et le papier blanc

Le traitement repose sur le contraste de luminance sur le cliché entre l'échantillon à tester et le matériau de référence. On impose comme étalon un papier de qualité de couleur blanche, présentant une surface mate et dépolie, dont l'albédo varie de 0,6 à 0,7. Les images JPEG (*figure 64*) de surface pavée au-dessus de laquelle est disposé l'étalon sont obtenues avec un appareil photo (téléphone, caméra, webcam). Ensuite, on importe cette image dans Mesurim 2. Enfin, la valeur de l'albédo est obtenue en cliquant sur la surface à mesurer. Il est important de noter que la précision de la mesure dépend de la qualité de l'image, de la calibration de l'appareil photo et de la méthode de mesure utilisée.

La *figure 65* représente une fenêtre de ce logiciel qui contient l'image des pavés de déchets plastiques et de papier blanc.



Figure 65: Fenêtre de logiciel Mesurim 2

## CONCLUSION

Ce chapitre consiste à présenter les différents matériels et méthode utilisés pour déterminer les propriétés thermiques et radiatives de quatre pavages locaux. Nous avons conçu un dispositif afin de mesurer la conductivité thermique, la capacité thermique volumique et la diffusivité thermique de ces matériaux à l'aide de la méthode du fil chaud parallèle. Les modèles utilisés sont basés sur la méthode des quadripôles et la norme ISO 8894–2. Ce dispositif est fabriqué à partir de composants locaux à l'exception du thermocouple qui est un produit commandé à l'étranger. Il consiste à relever de données expérimentales. Le programme développé sous MATLAB permet de traiter ces données afin d'estimer tout le paramètre. Nous avons présenté aussi une méthode pour mesurer l'albédo d'une surface par analyse numérique de l'image en utilisant le logiciel Mesurim 2. Il est à noter qu'il suffit d'importer une image de matériau avec l'étalon prise à l'environnement naturel dans ce logiciel. Le chapitre qui suit est dédié à la présentation de la mesure sur terrain.

## CHAPITRES VI : EXPÉRIMENTATION IN SITU

### INTRODUCTION

Afin d'évaluer le comportement thermique de pavages, des expérimentations ont été menées dans un environnement naturel. Les pavages qui ont déjà fait l'objet de mesure de conductivité thermique sont exposés au rayonnement solaire. Ils ont été installés dans une plate-forme horizontale. Avant de plonger dans les détails de l'expérimentation, une analyse climatique préliminaire sera effectuée pour mieux comprendre les conditions environnementales du site. Les différents matériels pour mesurer les conditions climatiques, la température de surface de chaque pavage, la température de l'air et l'humidité relative de l'air à 1 m au-dessus de ce matériau sont développés dans ce présent chapitre.

#### VI.1. SITE D'ÉTUDE

L'impact de comportement thermique du pavage sur le microclimat urbain dépend fortement de la géographie, du climat et des caractéristiques locales de la zone étudiée (Cf. [Paragraphe IV.1.1](#)). L'étude est menée sur un site situé dans la commune de Talatamaty (18.83 S, 47.45 W) au nord-ouest de la ville d'Antananarivo. Les matériaux à tester sont disposés sur une plate-forme exposée en plein soleil de dimensions 10 m × 4 m. Les quelques arbres et bâtiments environnants dont la hauteur ne dépasse pas 15 m, par les ombres qu'ils projettent, ne produisent pas d'effet de "masque" à aucun moment de la journée sur la plate-forme. Par ailleurs, le trafic est très réduit au niveau des ruelles les plus proches. Pour toutes les raisons mentionnées ci-dessus, le choix de ce site est pertinent pour mettre en exergue l'impact du pavage.



Figure 66: Image satellite du site ([Google Earth Pro](#))

### VI.1.1. Analyse climatique

Antananarivo dispose d'un climat tropical d'altitude, caractérisé par l'alternance d'une saison chaude et pluvieuse (été) de novembre à avril, avec plus fortes précipitations en décembre et janvier et une saison fraîche et sèche (hiver) de mai à octobre, avec les plus faibles précipitations en septembre et octobre.

#### a. Température

La *figure 67* représente l'histogramme la température moyenne mensuelle d'Antananarivo. Toutes les données exploitées proviennent du site de la NASA «Power Climate data access ». Elles rassemblent les données de cinq dernières années (2017-2022).

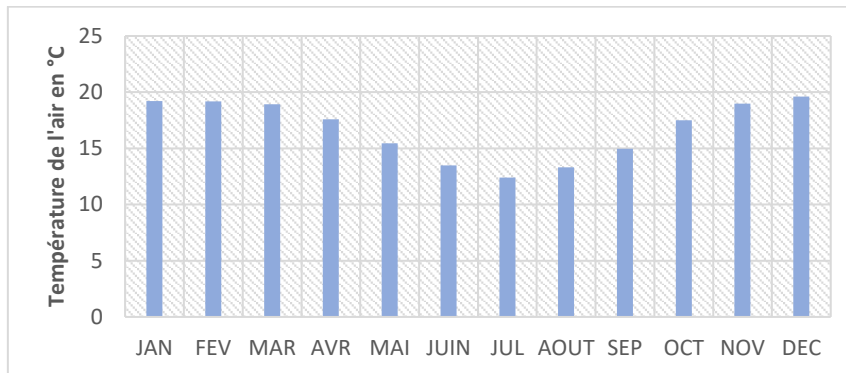


Figure 67: Température journalière moyenne mensuelle

La température moyenne annuelle varie autour de 17.0 °C. Cette moyenne englobe les variations saisonnières qui apportent des changements significatifs à différentes périodes de l'année. Les valeurs les plus élevées sont relevées de décembre à mars, en pleine saison de pluie. Celui-ci est le mois le plus chaud de l'année. Pendant les mois plus frais juin à août, la température moyenne, baisse jusqu'à 12.4 °C.

#### b. Précipitation

La *figure 69* représente l'histogramme de la précipitation mensuelle d'Antananarivo.

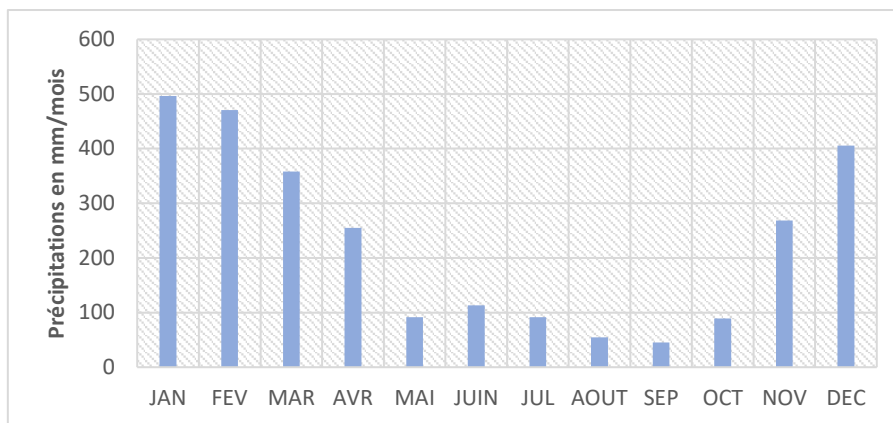


Figure 68: Précipitation moyenne mensuelle

Le cumul des précipitations de novembre à avril, période couvrant la saison chaude, dépasse les 80% des précipitations mensuelles. Pendant la saison sèche, de mai à octobre, elles sont relativement faibles.

### c. Humidité relative

Même pendant une partie de la saison sèche, de mai à août, les valeurs de l'humidité relative restent élevées, supérieures à 85% (Cf. *figure 68*). Pendant les mois plus chauds de l'année en décembre, elle tend à diminuer, avec une valeur minimale moyenne d'environ 79 %. Il se traduit par une atmosphère plus sèche et plus confortable, offrant une sensation de fraîcheur et de légèreté

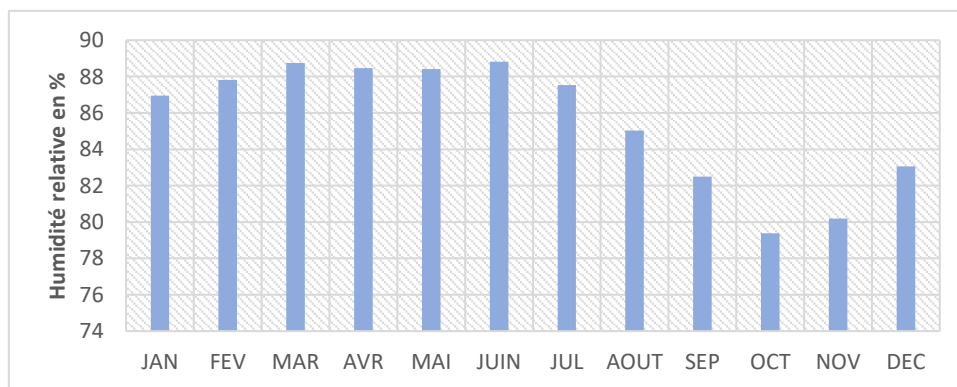


Figure 69: Humidité relative journalière moyenne mensuelle

La moyenne annuelle de l'humidité relative tourne généralement autour de 86 %. Elle varie peu au cours de l'année. Elle est maximale au cours des mois les plus frais, avec une valeur moyenne d'environ 89 %. Cela crée une atmosphère tropicale où l'air peut paraître humide et lourd. Pendant les mois plus chauds, elle tend à diminuer, avec une valeur minimale moyenne approximativement 79 %. Il se traduit par une atmosphère plus sèche et plus confortable, offrant une sensation de fraîcheur et de légèreté.



#### d. Irradiation solaire

LES irradiations solaires journalières moyennes mensuelles s'échelonnent de 3,2 kWh/m<sup>2</sup>/jour à 5,5 kWh/m<sup>2</sup>/jour. La fin de la saison sèche, septembre-octobre, et le début de la saison chaude et pluvieuse, novembre-décembre, connaissent les plus forts rayonnements solaires (Cf. *Figure 70*)

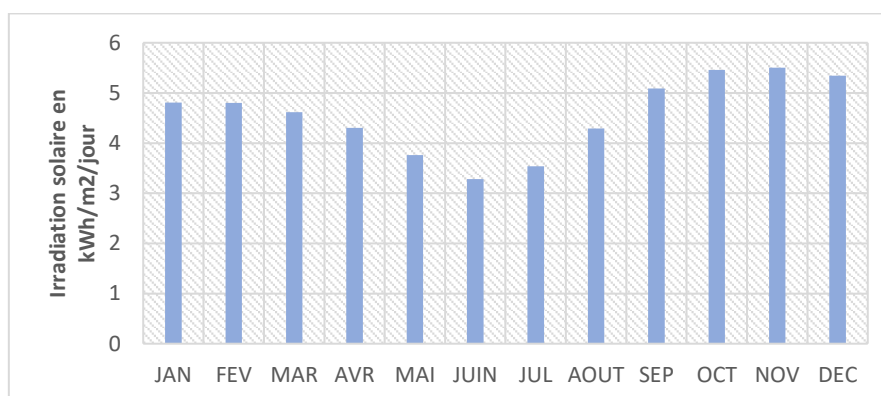


Figure 70: Irradiation solaire journalière moyenne mensuelle

#### e. Vitesse du vent

La figure 71 représente l'histogramme de la vitesse du vent d'Antananarivo.

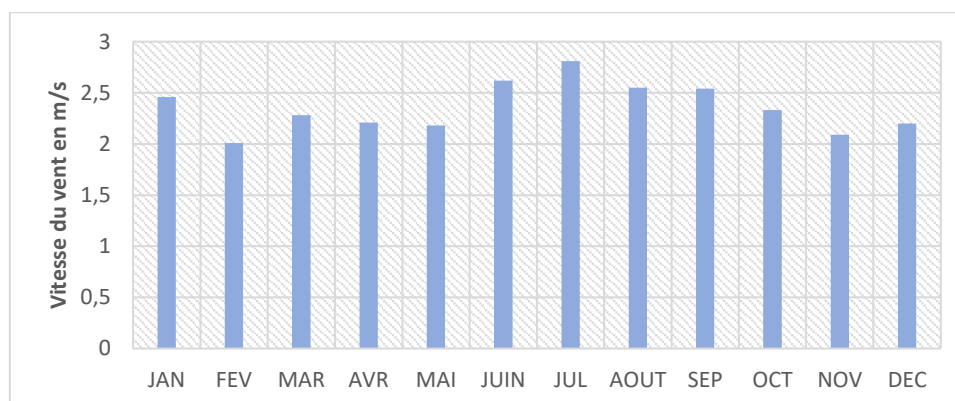


Figure 71: Vitesse moyenne mensuelle du vent d'Antananarivo.

C'est pendant une majeure partie de la saison sèche que la vitesse du vent dépasse les 2,5 m/s, avec un maximum de 2.80 m/s (*figure 71*). Durant la saison des pluies, les valeurs notoires sont souvent associées à des événements météorologiques tels que les tempêtes tropicales ou les systèmes de mousson.

## **VI.2. MATÉRIAUX DE PAVAGES**

De nos jours, les pavés ne se résument plus à des blocs de pierre glissants, inégaux et inconfortables. Dans certains pays, ils doivent répondre à des normes et satisfaire à des ensembles d'exigences techniques suivant qu'ils sont destinés à des voies piétonnes ou à la circulation. Dans le cadre de cette étude, nous avons orienté notre choix sur les matériaux de pavage disponibles localement. Ils ont déjà fait l'objet de mesure de conductivité thermique (Cf.Paragraphe V.1).

### **VI.2.1. Pavés de déchets plastiques**

Les pavés de déchets plastiques sont fabriqués en mélangeant des déchets plastiques recyclés avec des additifs et des liants pour créer une pâte homogène. Ces derniers assurent la liaison des matières premières. Les liants les plus couramment utilisés sont les adhésifs à base de polyuréthane ou de caoutchouc. Des pigments peuvent être ajoutés au mélange pour donner une couleur uniforme et esthétique aux pavés. Les agents de remplissage, tels que le sable et la poussière de pierre, peuvent être ajoutés pour renforcer la résistance et la stabilité des pavés. Ceux-ci sont des matériaux résistants aux intempéries indiqués pour les trottoirs, les pavages des allées, les entrées de garage et les autres projets d'aménagement paysager.

Les avantages des pavés de déchets plastiques sont nombreux. Tout d'abord, la quantité de déchets plastiques envoyés dans les décharges et les océans se trouve réduit par le recyclage de ce produit fossile, contribuant ainsi à préserver l'environnement. De plus, LES PDP ne nécessitent que peu d'entretien (IBGE, 2011a)

### **VI.3. Pavés en terre cuite**

Les pavés en terre cuite sont des pavés de forme et dimensions adaptées, utilisés pour le revêtement extérieur. Ils sont fabriqués à partir de l'argile. Selon la norme NF EN 1344, leur épaisseur doit supérieure ou égale à 30 mm pour une pose sur un lit de sable stabilisé ou un lit de mortier et 40 mm pour une pose sur un lit de sable souple. Pour les pavés qui sont posés sur un lit de sable souple, le rapport de la longueur à l'épaisseur ne peut dépasser 6. Les méthodes des différents essais traitement mécanique et chimique pour modifier l'aspect sont décrites dans la norme NF EN 1344. Ils ne doivent pas être confondus avec les briques ordinaires employées dans la fabrication des murs. Les pavés en terre cuite sont principalement utilisés comme éléments modulaires pour le pavage extérieur tels que les trottoirs, les piétonniers, les places

publiques, les allées, les voiries carrossables et les parkings. Ce sont de matériaux durables et résistent bien aux intempéries, au gel et aux rayons UV. Leur apparence naturelle et rustique assure la beauté de paysage. De plus, ils sont disponibles dans une variété de couleurs, de formes et de tailles, offrant une grande flexibilité de design. Leur aspect antidérapant les rend plus sûrs pour les zones piétonnes ou les allées de voitures (IBGE, 2011a).

#### **VI.3.1. Pavés de travertin**

Ce sont des pavés en pierre naturelle fabriqués à partir de travertin. Celui-ci est une roche sédimentaire qui est souvent utilisée dans les projets de construction en raison de leur beauté naturelle et de leur durabilité. Ils sont très populaires pour les allées, les entrées de garage et les projets d'aménagement urbain en raison de leur apparence élégante. Les pavés de travertin sont également disponibles dans une gamme de couleurs allant du beige clair au brun foncé, avec des veines et des motifs naturels qui ajoutent une beauté supplémentaire à la pierre. Ils sont résistants aux intempéries, aux taches, aux rayures et à la chaleur (IBGE, 2011c). Ces matériaux sont durables et nécessitent peu d'entretien.

#### **VI.3.2. Pavés de béton**

Les pavés de béton sont élaborés en utilisant de ciment Portland, de gravier, de sable et de l'eau. Ils sont une alternative moins onéreuse et de plus en plus courante. Un vaste choix de formes, de couleurs et de finitions offre de nombreuses possibilités d'utilisation sur l'aménagement de l'espace public. Ils peuvent être fabriqués avec des profils fonctionnels et décoratifs qui ne doivent pas être compris dans leurs dimensions. La norme NF EN 1338 (2004) recommande que sa longueur hors-tout divisée par son épaisseur doit être inférieure ou égale à quatre. La méthode d'essai pour la détermination de leurs caractéristiques physiques et mécaniques est citée dans cette précédente norme. Ces pavages sont disponibles dans une variété de couleurs et de textures, offrant une grande flexibilité en matière de design et d'aménagement paysager. Ils sont très résistants, durables, faciles à nettoyer et à entretenir (IBGE, 2011b).

### **VI.3. PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX**

#### **VI.3.1. Mise en œuvre de pavages dans le site**

Les quatre pavages de dimensions 100 cm × 100 cm × 3 cm ont été disposés sur une plateforme horizontale (*figure 72*). Sa structure est représentée par la figure suivante :



Figure 72: Structure de pavage

### **a.1. Sol support**

C'est la surface de sol en place terrassée et nivelée, éventuellement traitée, sur laquelle repose la structure des revêtements du sol. Il doit être stable et creusé en pente pour l'évacuation des eaux.

### **a.2. Couche d'assise**

La couche d'assise assure la résistance mécanique nécessaire pour reprendre les charges verticales. Elle assure la répartition des pressions sur le sol support afin de réduire les déformations à ce niveau dans les limites admissibles. Les matériaux utilisés dans la couche d'assise sont la grave concassée non traitée.

### **a.3. Lit de pose**

Le lit de pose est défini comme une couche épaisse de quelques centimètres dont le rôle est d'une part de compenser les petites inégalités de la couche d'assise et de l'épaisseur des pavés et d'autre part de permettre une insertion des pavés afin de bien les maintenir en place. Le lit de pose utilisé est le sable. Les étapes de base pour l'installation des pavés sont représentées par le diagramme de la figure suivante :

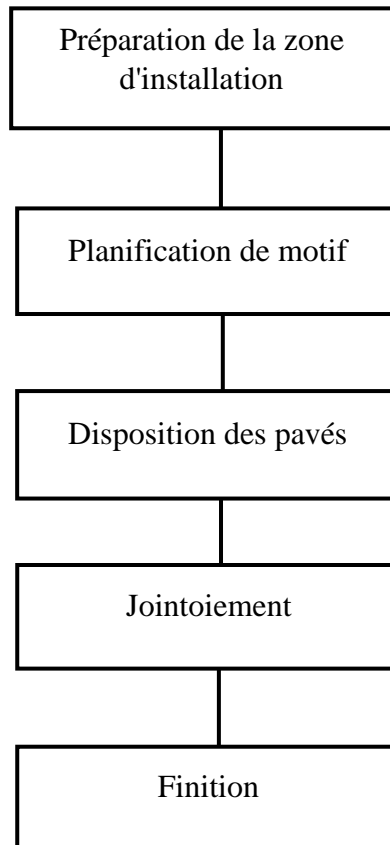


Figure 73: Diagramme de mise en œuvre de pavage

Tout d'abord, la zone d'installation est préparée en nivelant et en compactant le sol. Il est recommandé d'ajouter une couche de sable pour créer une base solide et stable. Ensuite, le motif souhaité est planifié en disposant les pavés sur la surface pour obtenir un design à la fois esthétique et fonctionnel. Les pavés sont disposés en suivant le motif choisi, en veillant à les aligner correctement et à maintenir des espacements réguliers pour les joints. Les espaces entre les pavés sont ensuite remplis de sable fin afin de créer des joints solides et stables. Enfin, un rouleau est utilisé pour compacter les pavés, assurant ainsi leur bonne adhérence au sol et le tassement des joints.



Figure 74: Disposition de pavages

### **VI.3.2. Collecte de données expérimentales**

La détermination expérimentale de l'impact de revêtements de sol sur le microclimat urbain s'effectue par la mesure de la température de surface, la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent, le rayonnement solaire au moyen de divers capteurs. Ceux-ci sont reliés à une centrale d'acquisition et à un microcontrôleur permettant l'enregistrement des données. Les capteurs de température numériques DS18B20 ont été sélectionnés pour relever la température de surface de chaque pavage. La température de l'air et l'humidité relative à une hauteur de 1 m a été enregistrée par les capteurs DHT11. Ces capteurs sont connectés à l'Arduino. Toutes les données obtenues sont enregistrées dans une carte micro-SD via le module carte micro-SD pour chaque 10 min. Une mini station météorologique est placée sur le site expérimental pour recueillir les conditions climatiques telles que la température de l'air ambiant, l'humidité relative et la vitesse du vent. On ne dispose pas de pyranomètre ou d'autre capteurs pour mesurer le rayonnement solaire. En effet, on utilise le modèle de Perrin de Brichambeau afin de l'estimer.

#### **a. Matériels**

##### **a.1. Capteurs de température**

Les capteurs sont les éléments indispensables à la mesure des températures. Un capteur est un dispositif qui transforme l'état d'une grandeur physique observée en une grandeur utilisable. Notre travail porte sur l'étude des transferts thermiques. Comme les sollicitations peuvent être de nature aléatoire en conditions réelles, les mesures simultanées de la température et du flux de chaleur sont possibles par l'utilisation des sondes de température ou des thermocouples et de capteur de flux. Pour notre cas, seulement les températures en surfaces de pavage et de la température de l'air à hauteur de 1 m sont relevées. En effet, on ne dispose pas de fluxmètre

pour mesurer les bilans fluxmétriques. Les mesures de températures ont été réalisées à l'aide de sondes de température de type transistor DS18B20 pour les températures de surface et avec un DHT11 pour la température de l'air.

#### **i. Capteur DHT11**

Le capteur numérique de température et d'humidité DHT11 est un capteur composite qui contient une sortie de signal numérique étalonnée de la température et de l'humidité. Il est doté d'une technologie de collecte de modules numériques dédiée et d'une technologie de détection de la température et de l'humidité, qui lui permet de garantir une fiabilité élevée et une excellente stabilité à long terme.

Ce capteur comprend un composant de mesure d'humidité de type résistif et un composant de mesure de température NTC, et se connecte à un microcontrôleur 8 bits haute performance, offrant une excellente qualité, une réponse rapide, une capacité anti-ingérence et une rentabilité élevée. Chaque élément DHT11 est strictement calibré en laboratoire, ce qui est extrêmement précis lors du calibrage de l'humidité et de la température. Les coefficients d'étalonnage sont stockés sous forme de programmes dans la mémoire OTP, qui sont utilisés par le processus de détection de signal interne du capteur. L'interface série monofil rend l'intégration du système rapide et facile. Sa petite taille, sa faible consommation électrique et sa transmission des signaux jusqu'à 20 mètres en font le meilleur choix du DHT11 pour diverses applications, y compris les plus exigeantes. On peut l'utiliser dans les HVAC, séchoir, équipement d'essai et d'inspection, biens de consommation courante, automobile, contrôle automatique, enregistreurs de données, stations météorologiques, appareils électroménagers, régulateur d'humidité, appareils de mesure et de contrôle de l'humidité, médicaux et autres. Le composant est un boîtier de couleur bleu avec une rangée emballée avec quatre rangées de broches, ce qui rend la connexion très pratique. Ses spécifications techniques sont données sur le tableau suivant :

Tableau 10: Spécifications techniques de DHT11

Source de courant	3 – 5.5 V
Plage de mesure température	0 °C à +50 °C
Précision de la mesure de température	± 2 °C
Résolution « d'affichage » température	0.1 °C
Plage de mesure humidité relative	20 % à 100 %
Précision de mesure de l'humidité	±4 %
Résolution « d'affichage » humidité	1 %

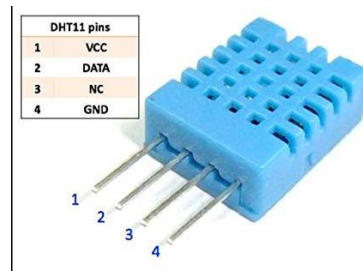


Figure 75: Capteur de température ambiante et d'humidité DHT11

## ii. Capteur DS18B20

Il existe plusieurs types de sonde de température. Tous sont utilisés pour une gamme précise allant de quelques degrés à quelques milliers de degrés. Nous avons utilisé le type DS18B20 étanche. Le choix a été dicté par leur existence sur le marché et de leur avantage. En effet, l'avantage de ce capteur est sa fiabilité, son faible encombrement et sa facilité de mise en œuvre. Le capteur DS18B20 du fabricant Maxim (anciennement Dallas Semi-conducteur) est déjà pré-câblé et étanche ; pratique pour mesurer une température dans un endroit éloigné ou dans un environnement humide. C'est un capteur de température numérique intégrant tout le nécessaire requis pour faire la mesure : capteur analogique, convertisseur analogique/numérique, électronique de communication et alimentation. Il communique via un bus 1-Wire et possède une résolution numérique de 12 bits (programmable) avec une plage de mesure de  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La précision analogique de ce capteur est de  $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (entre  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) directement à partir du convertisseur analogique/numérique, ce qui le rend très intéressant pour une utilisation normale. Le DS18B20 est utilisable avec des tensions de 3,0 à 5,5 V. Il est composé de trois fils : un fil de masse (fil noir), un fil d'alimentation (fil rouge) et un fil de données (fil jaune). Un seul composant externe est nécessaire pour faire fonctionner un bus 1-Wire : une simple résistance de 4,7 kohms en résistance de tirage à l'alimentation sur la broche de données.





Figure 76: Sondes de température DS18B20.

### **a.2. Central d'acquisition des données**

Les capteurs DS18B20 et DHT11 fonctionnent parfaitement avec des microcontrôleurs dotés d'une simple broche numérique. Les mesures in situ sont donc commandées à l'aide d'une centrale d'acquisition ou microcontrôleur de mesure autonome formée par les éléments suivants :

- Une carte Arduino MEGA (et son câble USB),
- Une résistance de 4,7 kohms, code couleur : jaune – violet – rouge,
- Un module RTC (Real Time Clock),
- Un module micro-SD,
- Un écran LCD,
- Une plaque d'essai,
- Des fils pour câbler le montage.

La rapidité et la facilité de branchement permettent de mettre en place le dispositif expérimental dans un temps relativement court. Le microcontrôleur est autonome et permet la lecture des températures en temps réel directement sur l'écran d'affichage. Cependant, les données relevées sont enregistrées dans une carte micro-SD par l'intermédiaire du module micro-SD et récupérées à la fin des mesures.

Les capteurs sont contrôlés par la carte Arduino MEGA, dans laquelle tous les programmes de commande sont enregistrés. Le module RTC est une horloge numérique autonome permettant d'implémenter précisément le temps réel (date et heure) relatif à chaque valeur de température captée par les capteurs DS18B20 et DHT 11.



Figure 77: (a) Module micro-SD ; (b) Module RTC ; (c) Carte Arduino MEGA.

### a.3. Station Météo

La Mini Station Météo SM 018 est utilisée pour relever les conditions climatiques du site d'étude. Elle est composée d'une station météo, d'un anémomètre et pluviomètre.



Figure 78: Mini Station Météo SM-018

Cet ensemble permet de recevoir et d'afficher les éléments dans le tableau suivant :

Tableau 11: Paramètres mesurés par Mini Station Météo SM-018

Grandeurs	Unité
Température intérieure et extérieure	°C
Humidité relative	%
Prévisions météo (ensoleillé, nuageux, pluvieux, orageux)	-
Vitesse du vent	km/h
Direction du vent dans 16 directions.	-
Hauteur des précipitations	mm
Indice de UV	-
Point de rosée, température ressentie	°C
Indice de chaleur	-

## b. Calendrier de mesures

Les expérimentations sont menées pendant deux périodes distinctes. La première série ont été réalisées en hiver. Les données de prévisions météorologiques d'Antananarivo nous informent que le mois d'août est parmi les trois mois dont la température de l'air ambiant est la plus basse (*Figure 67*). Les mesures in situ ont duré 3 jours consécutifs. La deuxième série a été effectuée en été. Elle dure également 3 jours pendant le mois de décembre pendant lequel cette température est la plus élevée (*Figure 67*).

Tableau 12: Calendrier de mesures

Tâches	Durée	Période
1 <sup>ère</sup> série d'expérimentation	3 jours	11 août 2022 – 13 août 2022
2 <sup>ème</sup> série d'expérimentation	3 jours	17 décembre 2022 – 19 décembre 2022

## c. Installations des dispositifs de mesure

### c.1. Mesure des conditions climatiques

Les conditions climatiques du site sont relevées en utilisant la Mini Station Météo SM 018 (*Figure 79*). Afin d'obtenir les meilleurs résultats, le fabricant de ce dispositif préconise qu'elle doit être placée à une surface horizontale avant de plonger dans les détails de l'expérimentation, une analyse climatique préliminaire a été effectuée pour mieux comprendre les conditions environnementales du site



Figure 79: Installation de la SM 018 sur la plate-forme

Tableau 13: Valeurs moyennes de conditions climatiques journalières.

Série	Date	Température de l'air (°C)	Humidité relative (%)	Vitesse du vent (m/s)	Rayonnement solaire (W/m <sup>2</sup> )
1 <sup>ère</sup> série	11/08/2022	13.53	48	7.61	240
	12/08/2022	14.35	55	6.57	243
	13/08/2022	13.16	59	5.32	230
2 <sup>ème</sup> série	17/12/2022	21.81	47	2.24	408
	18/12/2022	22.85	42	2.13	490
	19/12/2022	22.67	43	1.83	454

### c.2. Mesure de températures de surface

Les capteurs de température DS18B20 sont utilisés pour les mesures de températures de surface de chaque pavage (*Figure 80*). Le calibrage est le préalable à leur mise en œuvre. Nous avons réalisé une vérification à la température de la glace fondante (0 °C). La sonde de température est plongée dans le mélange glace concassée et eau du robinet. Nous relevons la valeur indiquée lorsque l'indicateur se stabilise après 2 ou 3 min. on applique la même procédure pour une deuxième vérification à l'eau bouillante (100 °C).

La température affichée par l'écran LCD qui correspond à la glace fondante (0 °C) est de 1.4 °C. Celle de l'eau bouillante (100 °C) est de 96.5°C. La figure suivante représente sa courbe de variation.

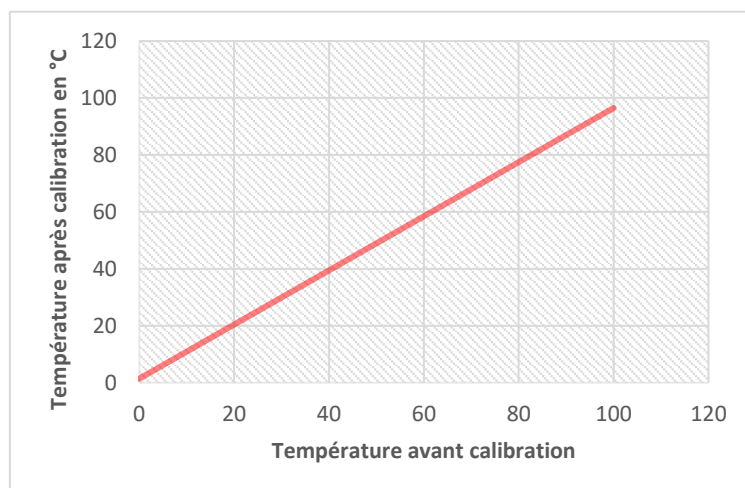


Figure 80: Calibration du capteur DS18B20

La courbe de variation de la température après la calibration en fonction de la température avant la calibration est une droite, exprimée par l'équation :

$$T_{ap} = 0.95T_{av} + 1.4 \quad (VI-1)$$

L'équation (VI-1) exprime la valeur de température de surface mesurée par le DS18B20 dans le code programmé sous Arduino. Il est à noter qu'il a sa propre équation spécifique.

Après calibration, le capteur est fixé contre la surface de revêtements de sol comme indiqué la *figure 81*. Il est recommandé de protéger l'extrémité du capteur en recouvrant sa tête. Cette mesure vise à éviter l'impact du rayonnement infrarouge provenant de l'environnement et du rayonnement solaire. Pour assurer cette protection, la silicone est utilisée pour l'isolation et le carton pour la fixation.



Figure 81: Installation du capteur DS18B20

Les températures de surface des pavages utilisés dans l'expérimentation ont été mesurées à l'aide de 4 capteurs DS18B20. Ceux-ci sont connectés à la centrale d'acquisition de données via des fils.

Les capteurs utilisés durant l'expérimentation sont nommés capteur 1, capteur 2, capteur 3 et capteur 4. Ils ont mesuré respectivement la température de surface de pavés de déchets plastiques, de pavés en terre cuite, de pavés de travertin et de pavés de béton.

### **c.3. Mesure de température de l'air à 1 m au-dessus de chaque pavage**

Quatre capteurs DHT11 ont été utilisés pour mesurer les températures de l'air à une hauteur de 1 m au-dessus de la surface de chaque pavage. Afin de les protéger ces capteurs contre le rayonnement solaire et la pluie, il est recommandé de les abriter. Dans notre cas, nous avons fabriqué quatre petites casquettes pour assurer cette protection et préserver leurs performances face à une exposition prolongée à une lumière intense et aux ultraviolets.

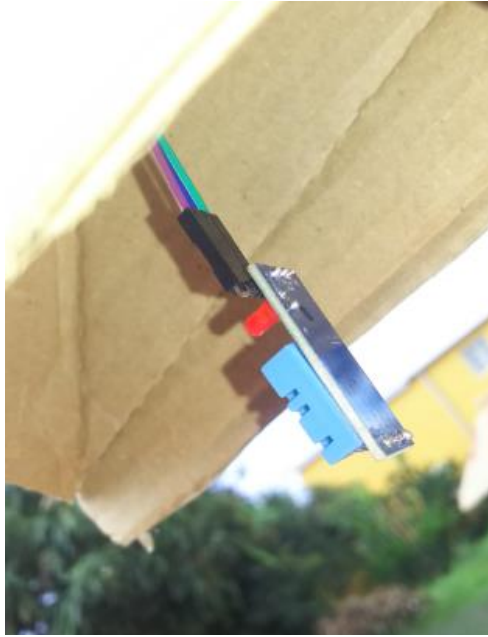


Figure 82: Installation du DHT11

Les capteurs utilisés durant les expérimentations sont notés dht1, tht2, dht3 et dht4. Ils relèvent respectivement la température de l'air à 1 m au-dessus de pavés de déchets plastiques, de pavés en terre cuite, de pavés de travertin et de pavés de béton.

#### **d. Estimation du rayonnement solaire**

Il est à noter que l'on ne peut pas relever le rayonnement solaire à l'aide de la Mini Station Météo SM 018 (Cf. [Paragraphe VI.3.2.a3](#)). Ainsi, l'utilisation de modèles de simulation reste pratiquement l'un des seuls moyens pour pallier à ce problème. Nous avons réalisé un outil informatique, permettant le calcul de l'éclairement solaire (Cf. *Figure 111*). Les estimations ont été effectuées à l'aide du modèle de « Perrin de Brichambaut ». Il suffit d'intégrer les données relatives au site telles que la latitude, la longitude, l'altitude, l'état du ciel ainsi que les conditions climatiques du site.

## CONCLUSION

Ce chapitre développe les différentes étapes pendant la réalisation des expérimentations in situ. Après l'analyse climatique du site d'étude, les expérimentations sont menées durant deux saisons distinctes. La première série a été réalisée durant l'hiver dès 11 à 13 août 2022. La deuxième série en été effectuée le 17 à 19 décembre 2022. Les matériaux à tester sont disposés sur une plate-forme exposée en plein soleil où il y a quelques arbres et bâtiments, mais ne produisent pas l'effet de "masque" à aucun moment de la journée. Le trafic est très réduit au niveau des ruelles les plus proches. Des capteurs sont utilisés pour mesurer les différents paramètres. Ils sont commandés par le microcontrôleur Arduino. Les données expérimentales sont enregistrées dans un module SD card lié avec ce dernier. Avant la mesure, nous avons calibré quelques capteurs afin d'obtenir des valeurs précises. Il est à noter que ces capteurs doivent être protégés du milieu extérieur. Le rayonnement solaire pendant l'expérimentation a été estimé à l'aide du modèle de Perrin de Brichambeau. Les données collectées rassemblent la température de surface de chaque pavage, la température de l'air, l'humidité relative de l'air à 1 m au-dessus de pavages ainsi que les conditions climatiques pendant le jour d'expérimentation. Le chapitre suivant présentera les résultats de ces expérimentations.

# CHAPITRES VII : RÉSULTATS DE L'EXPÉRIMENTATION

## INTRODUCTION

Les résultats de nos expérimentations fournissent des informations importantes sur notre travail. Cette expérience est menée dans le but de déterminer l'influence de comportement thermique de pavages sur le confort thermique. Les données recueillies nous permettent maintenant de mieux comprendre l'impact de cette variable et d'en tirer des conclusions significatives. Nous allons présenter les résultats de la mesure des propriétés thermiques et radiatives de nos pavages. Les données expérimentales obtenues pendant la mesure in situ sont analysées. Il est nécessaire de prendre en considération l'effet de conditions climatiques, à savoir le rayonnement solaire, la vitesse du vent, l'humidité relatives sur la température de de l'air et la température de surface de nos matériaux. Ce chapitre se propose de présenter et d'analyser ces résultats de manière détaillée afin de partager nos découvertes avec le plus grand nombre possible.

### VII.1. PROPRIÉTÉS THERMIQUES DE PAVAGES

Le dispositif et le protocole de mesure ont été décrits dans le chapitre V du [paragraphe V.1](#). Les données enregistrées durant l'expérimentation ont été traitées dans le programme développé sous MATLAB. Les résultats obtenus suivant les deux modèles, quadripôle et norme ISO 8894–2, sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau 14: Propriétés thermiques de pavages

Types de pavages	Quadripôle			Norme
	$\lambda_s$ (W/m K)	$10^{-6} \times \rho_s C_{Ps}$ (J/m <sup>3</sup> K)	$10^7 \times a_s$ (m <sup>2</sup> /s)	$\lambda_s$ (W/m K)
Pavés de déchets plastiques (PDP)	0.72	1.90	3.78	0.50
Pavés en terre cuite (PTC)	0.90	1.74	5.15	0.70
Pavés de travertin (PT)	2.17	2.13	10.20	1.92
Pavés de béton (PB)	1.75	2.07	8.45	1.58



Le modèle normal (ISO 8894–2) conduit à des valeurs inférieures à celles du modèle quadripolaire. Cette différence pourrait s’expliquer par le fait que le rayon de fil chauffant est négligé dans le calcul utilisant cette norme (Cf. [Paragraphe V.1.1](#)). La conductivité thermique, la diffusivité thermique et la capacité thermique volumique les plus élevées sont celles des PT. Ils sont suivis de près par les PB. On peut dès lors affirmer que ces deux types de pavé absorbent et stockent plus la chaleur que les PTC et PDP. Cette capacité caractérise par ailleurs les matériaux lourds et compacts. Les masses volumiques calculées sont cohérentes avec ces assertions.

Tableau 15: Masse volumique et chaleur massique de pavages

Types de pavages	Capacité thermique volumique (J/m <sup>3</sup> K) ×10 <sup>6</sup>	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Chaleur massique (J/kg K)
Pavés de déchets plastiques (PDP)	1.90	1900	1000
Pavés en terre cuite (PTC)	1.74	1900	920
Pavés de travertin (PT)	2.13	2370	900
Pavés de béton (PB)	2.07	2300	900

Bien que de masse volumique égale, les PTC absorberaient moins de chaleur que les PDP avec une capacité thermique volumique plus faible. Les valeurs obtenues sont généralement inférieures à celles des données de la littérature (Cf. *Tableau 3*). Les techniques de fabrication ainsi que les caractéristiques des matières premières pourraient être à l’origine de ce fait.

La méthode du fil chaud soit une méthode précise et sensible pour mesurer la conductivité thermique d'un matériau, elle peut être affectée par des facteurs tels que la géométrie, la température, les vibrations. Des erreurs peuvent survenir si la géométrie du fil chaud n'est pas correctement prise en compte. La méthode du fil chaud est affectée par la température ambiante. Ainsi, les changements de température peuvent influencer la résistance électrique du fil chaud, ce qui altère les mesures. Les vibrations affectent aussi la précision des mesures, car elles peuvent déplacer la position du fil chaud dans le matériau testé, ce qui peut fausser les mesures.

## VII.2. PROPRIÉTÉS RADIATIVES DE PAVAGES

L'utilisation de logiciel Mesurim 2 nous a permis de déterminer les albédos de nos pavages (Cf. [Paragraphe V.2](#)). Leurs courbes de variation pendant une journée sont représentées par la figure suivante :

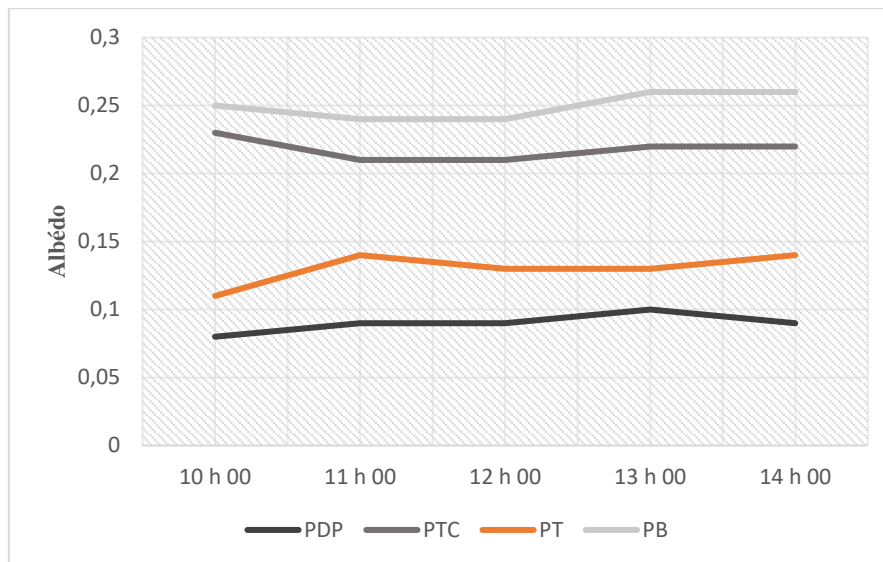


Figure 83: Variation journalière de l'albédo de chaque pavage

Les valeurs de l'albédo de chaque type de pavé connaissent des fluctuations au cours de la journée. Ces variations pourraient être attribuées à des passages nuageux ou des éclaircies intermittentes occasionnant un changement de la luminosité qui peut affecter les images. Cependant, ces fluctuations s'avèrent très faibles. On peut alors par la suite adopter des valeurs moyennes (Cf. *Tableau 16*) sans qu'il y ait des écarts significatifs avec les valeurs réelles. On peut avancer une catégorisation des produits eu égard aux valeurs trouvées. D'une part, avec respectivement 0.09 et 0.14, les PDP ET PT sont regroupés dans la catégorie des produits à faible pouvoir réfléchissant, G1. D'autre part, nous rassemblons les PTC et PB, avec des albédos très proches, présentant un écart relatif de 15%, respectivement 0.22 et 0.26, dans la classe des matériaux à forts facteurs de réflexion dénommée G2. Leurs couleurs plus claires sont probablement à l'origine de cette tendance. Les éléments de G1 réfléchissent environ la moitié de l'énergie solaire que le second dans les conditions identiques d'ensoleillement.

Tableau 16: Valeur moyenne de l'albédo de pavage

Types de pavages	Albédo
Pavés de déchets plastiques (PDP)	0.09
Pavés en terre cuite (PTC)	0.22
Pavés de travertin (PT)	0.14
Pavés de béton (PB)	0.26

Il est important de noter que l'albédo peut varier en fonction de la composition des matières premières utilisées et des techniques de fabrication. Pour les mesures en laboratoire, plusieurs références font état de valeurs d'albédo supérieures à celles déterminées in situ pour un matériau de même nature (Cf. *Tableau de l'ANNEXE 5*). En comparant nos résultats avec ceux de la littérature, nous pouvons affirmer qu'il y a une bonne concordance et ce, quelles que soient les méthodes mise en œuvre.

### **VII.3. VARIATION HORAIRE DES TEMPÉRATURES DE SURFACE DE PAVAGES**

La journée-type de point de vue climatique est une journée qui est caractérisée par les conditions climatiques moyennes d'une région à une période donnée. Ces conditions peuvent inclure le rayonnement solaire, la vitesse du vent, l'humidité relative et la température de l'air. Les journées-types sont souvent utilisées pour décrire les conditions climatiques dans une région donnée et pour aider à prédire les conditions météorologiques futures. Dans cette étude. Les expérimentations ont été menées le 13 août 2022, une journée-type de la saison sèche où les températures sont les plus basses, et le 18 décembre 2022, en pleine saison chaude. Chaque type de pavé est soumis aux mêmes conditions climatiques. Les courbes des *figures 84 et 85* représentent l'évolution de températures superficielles des pavés en fonction du temps au cours de ces journées.

Dans l'ensemble, les courbes présentent la même allure. Pendant ces deux journées, les températures de surface de l'élément G1 sont supérieures à celles de G2. Ce qui est conforme à la hiérarchisation de groupe vis-à-vis de l'albédo (Cf. *Paragraphe VII.2*). Dans chaque groupe, les deux courbes sont très proches jusqu'à se superposer à certains moments de la journée.

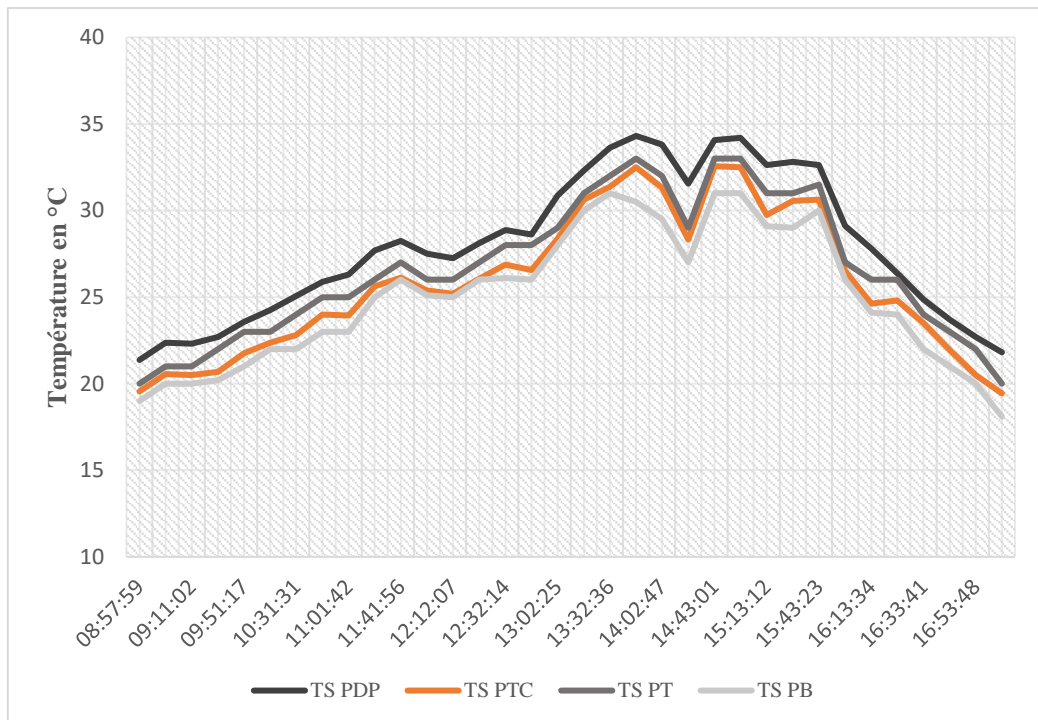


Figure 84: Variation journalière des températures de surface de pavés le 13 août 2022

Les températures de surface restent basses dans la matinée. Elles augmentent progressivement jusqu'à midi pour atteindre leurs maximums vers 15 h 30. Tout au long de la journée, les PDP enregistrent les températures les plus élevées, suivis, dans l'ordre, par les PT, puis les PTC et en dernier les PB.

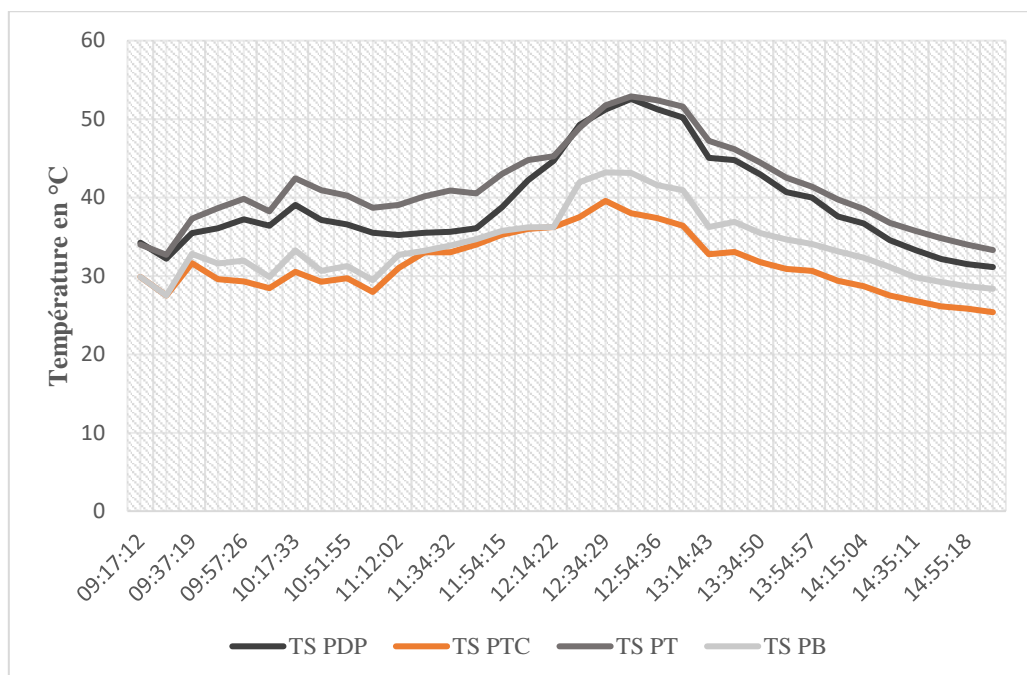


Figure 85: Variation journalière des températures de surface de pavages le 18 décembre 2022.

La température de surface de PB dépasse celle de PTC. Cette tendance est également constatée entre PT et PDP. La température de ces deux pavés tourne autour de 45 °C pendant une période plus d'une heure [12 h 14, 13 h 24]. Elle peut atteindre 40 °C pour le PB entre l'intervalle [12 h 24, 13 h 04]. Pour le PTC, la valeur égale à 36 °C est remarquée durant cette même période.

#### VII.4. TEMPÉRATURES DE SURFACE ET TEMPÉRATURE DE L'AIR A 1 M AU-DESSUS DE PAVAGES

La *figure 86* montre la température de surface de chaque pavage et la température de l'air à 1 m au-dessus de leur surface pendant les deux séries d'expérimentation effectuées en été et hiver 2022, sur trois journées successives chacune.

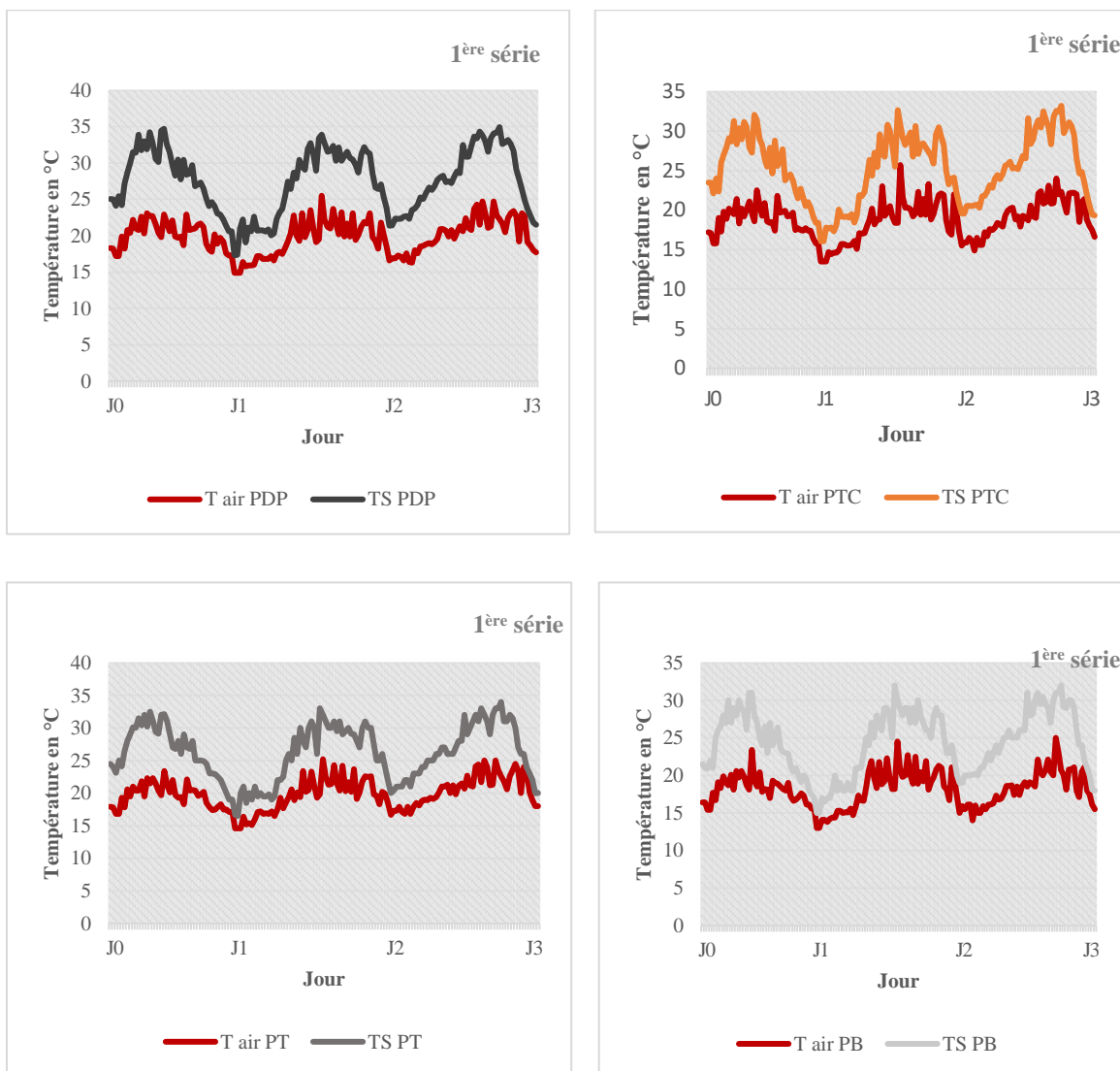


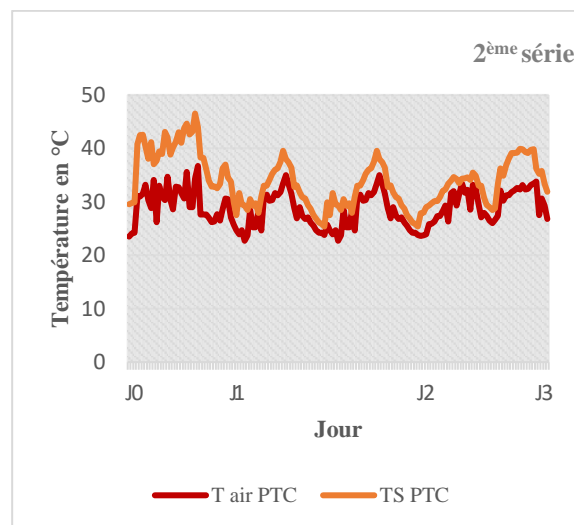
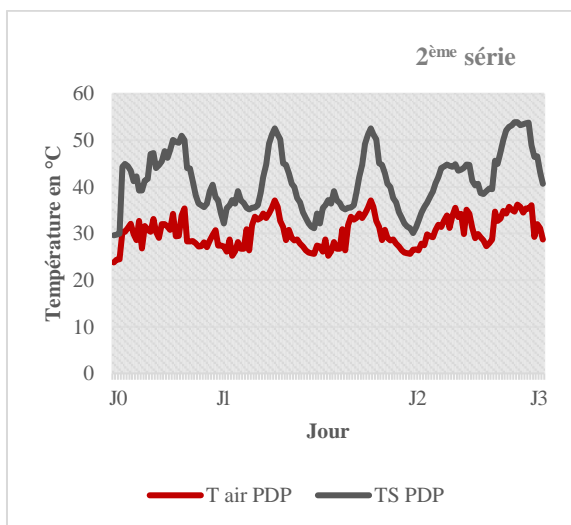
Figure 86: Variation de températures de surface et températures de l'air à 1 m au-dessus de chaque pavage durant la première série d'expérimentation

Les profils de températures de surface élevées des pavés se répercutent sur ceux de l'air à un mètre au-dessus du sol. Au-dessus de la surface de pavés du groupe G1, nous constatons que les températures de l'air sont supérieures à celles des G2 (*Tableau 17*). Par ailleurs, chaque groupe accuse des écarts relatifs des moyennes quasi similaires, supérieurs à ceux du groupe G2.

Tableau 17: Valeur moyenne, maximale et minimale de la température de surface et la température de l'air pendant la première série.

Pavages	Température de surface en °C			Température de l'air en °C			Ecart relatif Moyenne	Relations entre Ts et Tair
	Moyenne	Min	Max	Moyenne	Min	Max		
PDP	27.59	17.31	34.94	19.94	14.90	25.50	27%	Tair =73%TS
PTC	25.32	16.06	33.19	18.79	13.50	25.70	23%	Tair =77%TS
PT	26.26	16.50	34.00	19.89	14.60	25.20	26%	Tair =74%TS
PB	24.43	15.00	32.00	18.21	13.00	25.00	22%	Tair =78%TS

Les écarts relatifs comparables conduisent à des températures de l'air quasiment proportionnelles aux températures de surface. Ces dernières étant plus élevées pour le G1, il en résulte des températures de l'air notablement plus importantes au-dessus des pavés PDP et PT comparativement aux éléments du groupe G2.



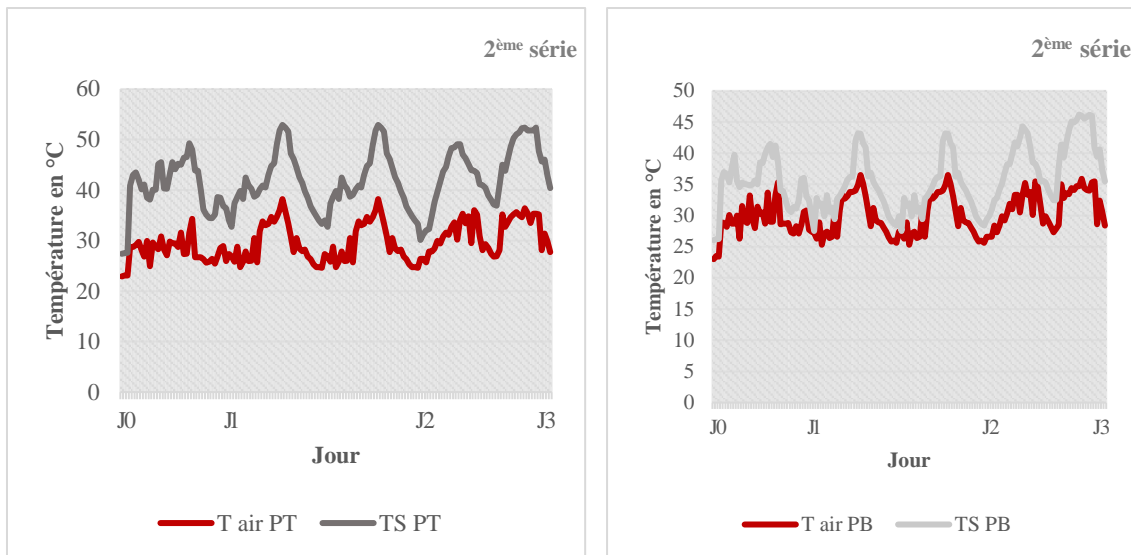


Figure 87: Variation de températures de surface et températures de l'air à 1 m au-dessus de chaque pavage durant la deuxième série d'expérimentation.

Tableau 18: Valeur moyenne de la température de surface et la température de l'air pendant la deuxième série

Pavages	Température de surface en °C			Température de l'air en °C			Ecart relatif Moyenne	Relation entre Ts et Tair
	Moyenne	Min	Max	Moyenne	Min	Max		
PDP	41.33	29.62	53.88	32.33	23.80	37.10	31%	Tair =69% TS
PTC	33.96	25.37	46.50	28.78	22.70	36.70	21%	Tair =79% TS
PT	41.88	27.37	52.88	31.65	22.90	38.20	28%	Tair =72% TS
PB	35.74	26.06	46.19	30.07	23.00	36.50	21%	Tair =79% TS

Le coefficient de proportionnalité de pavés des températures moyennes du G1 tourne autour de 70%, celui de G2 nettement plus relevé, 79%. On pourrait s'attendre à des températures de l'air plus conséquentes, ce qui est loin d'être vérifié. Ceci montre une fois de plus la forte influence des températures de surface, donc de l'albédo.

## VII.5. INFLUENCE DE FACTEURS CLIMATIQUES SUR LA TEMPÉRATURE DE L'AIR A 1 M AU-DESSUS DE CHAQUE PAVAGE

### VII.5.1. Rayonnement solaire et vitesse du vent

Le rayonnement solaire est l'une des sources d'énergie qui influence la balance énergétique au niveau de la surface de revêtements de sol (Cf. [Paragraphe IV.1.1](#)). Ainsi, il est important d'examiner son effet sur la température de surface pour mieux comprendre les paramètres qui influencent les variations de cette dernière. La vitesse du vent est un facteur important qui peut influencer la température de l'air au-dessus de la surface de pavage (Cf. [Paragraphe IV.1.1](#)). Le vent peut avoir des effets différents selon sa vitesse. Dans cette analyse, nous allons examiner de plus près comment la vitesse du vent affecte la température de surface de pavage.

Les *figures 88 à 91* présentent les courbes surfaciques qui illustrent l'impact du rayonnement solaire et de la vitesse du vent sur la température de l'air à 1 mètre au-dessus de chaque pavage pendant la journée du 13 août 2022.

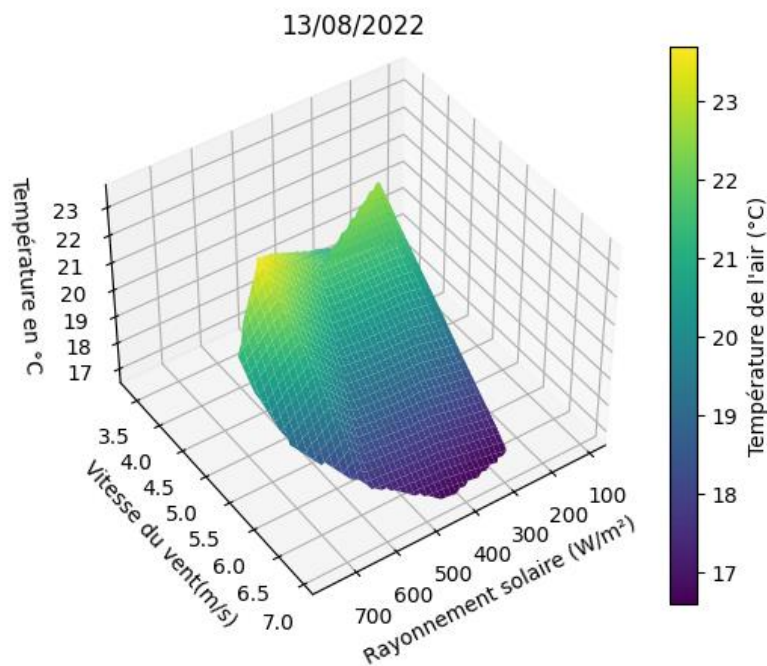


Figure 88: Influence du rayonnement solaire et la vitesse du vent sur la température de l'air à 1 m au-dessus de PDP en hiver



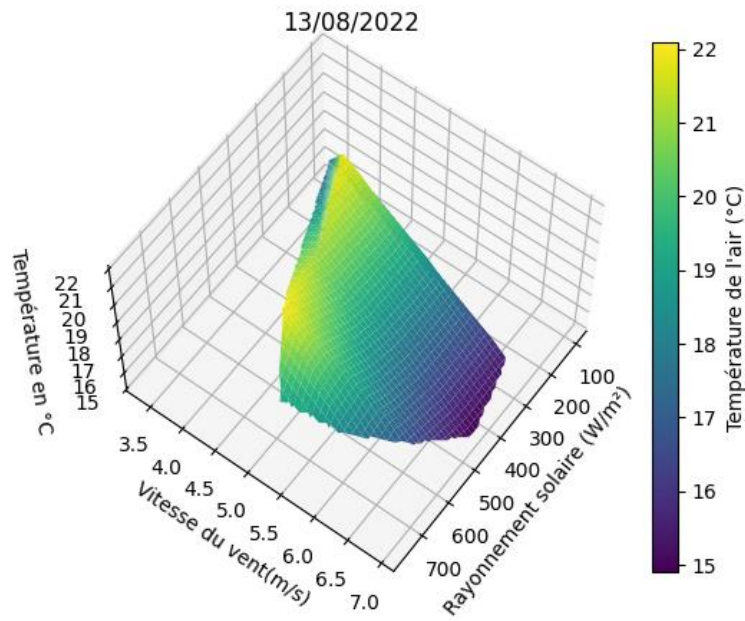


Figure 89: Influence du rayonnement solaire et la vitesse du vent sur la température de l'air à 1 m au-dessus de PTC en hiver

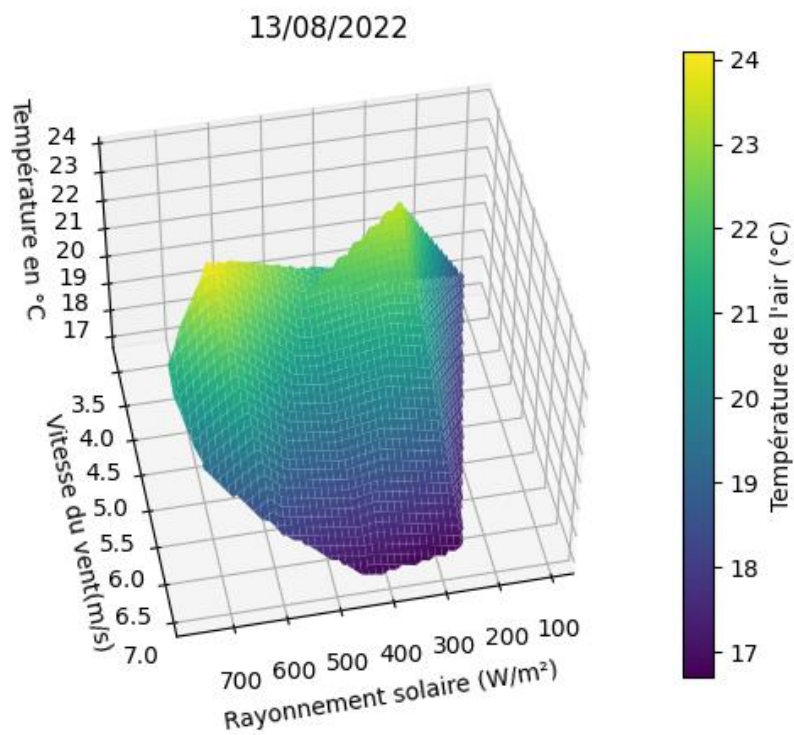


Figure 90: Influence du rayonnement solaire et la vitesse du vent sur la température de l'air à 1 m au-dessus de PT en hiver

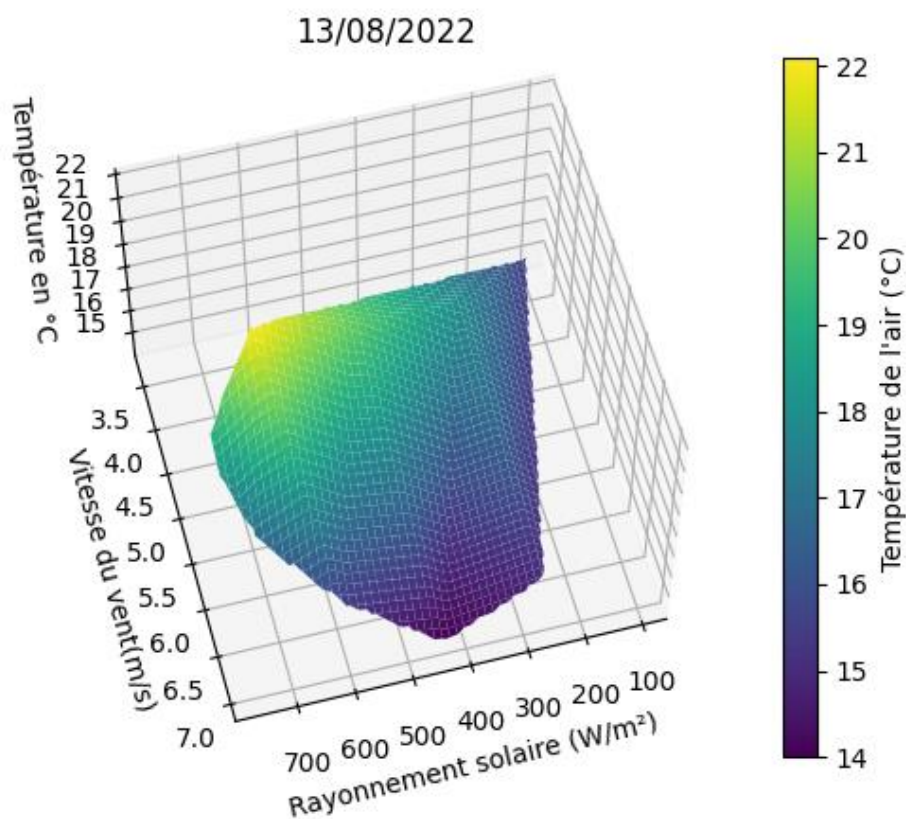


Figure 91: Influence du rayonnement solaire et la vitesse du vent sur la température de l'air à 1 m au-dessus de PB en hiver

Le tableau 19 donne des exemples de couples de valeurs des paramètres rayonnement solaire et vitesse du vent avec divers qualificatifs pour étayer l'analyse de nos résultats.

Tableau 19: Exemples de couples de valeurs des paramètres rayonnement solaire et vitesse du vent

Rayonnement solaire et vitesse du vent ( $V_V$ )			Température (°C)			
			PDP	PTC	PT	PB
Rayonnement faible	$V_V$ faible	(300 W/m <sup>2</sup> , 3.5 m/s)	22.86	21.40	23.30	21.40
	$V_V$ élevée	(300 W/m <sup>2</sup> , 6 m/s)	21.57	20.40	22.10	20.40
Rayonnement fort	$V_V$ faible	(700 W/m <sup>2</sup> , 3.5 m/s)	23.50	21.90	23.90	21.90
	$V_V$ élevée	(700 W/m <sup>2</sup> , 6 m/s)	22.21	20.90	22.70	20.90

La température de l'air la plus basse est enregistrée lorsque le rayonnement solaire est faible et la vitesse du vent est élevée. En revanche, une faible vitesse de vent couplée à un rayonnement solaire élevé conduit à un maximum de température. Entre deux points ayant la même abscisse, dont le rayonnement solaire identique, pour les deux vitesses de vent en ordonnée pris comme exemple, la différence de température est de 0.6 °C pour les PB, 0.5 °C pour les PTC et PT, et 0.64 °C pour les PDP. Ainsi, les PDP sont les plus influencés par la vitesse du vent. En choisissant deux autres points avec une même vitesse du vent, correspondant à des rayonnements égaux à 300 W/m<sup>2</sup> et 700 W/m<sup>2</sup>, nous obtenons des écarts de température variant de 1 °C à 1.5 °C. Il est à noter que les PTC présentent l'écart maximal, ce qui indique qu'ils sont les plus sensibles au rayonnement solaire. En comparant ces deux écarts, nous pouvons conclure que le rayonnement solaire a une influence plus importante sur la température de l'air que la vitesse du vent.

Afin d'analyser cette influence pendant la journée de 19 décembre 2022, les figures 92 à 95 sont obtenues.

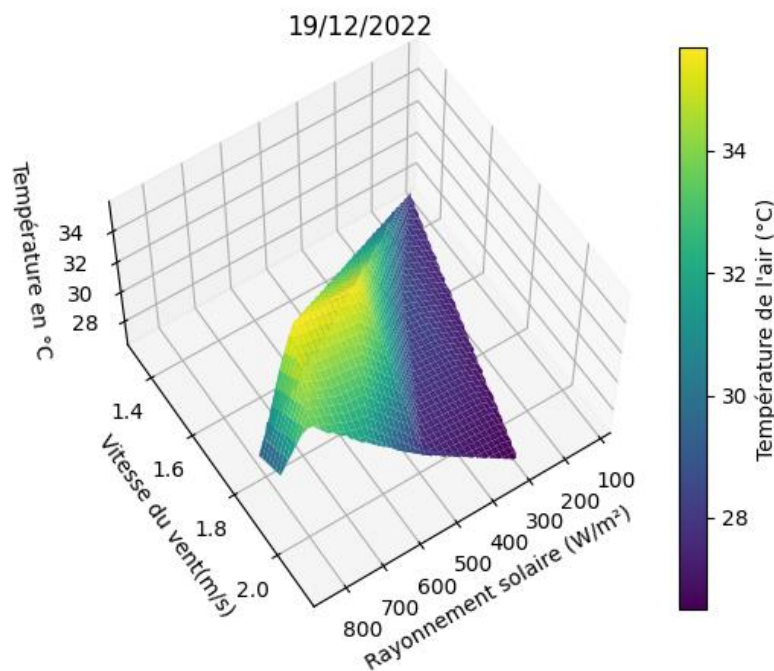


Figure 92: Influence du rayonnement solaire et la vitesse du vent sur la température de l'air à 1 m au-dessus de PDP en été

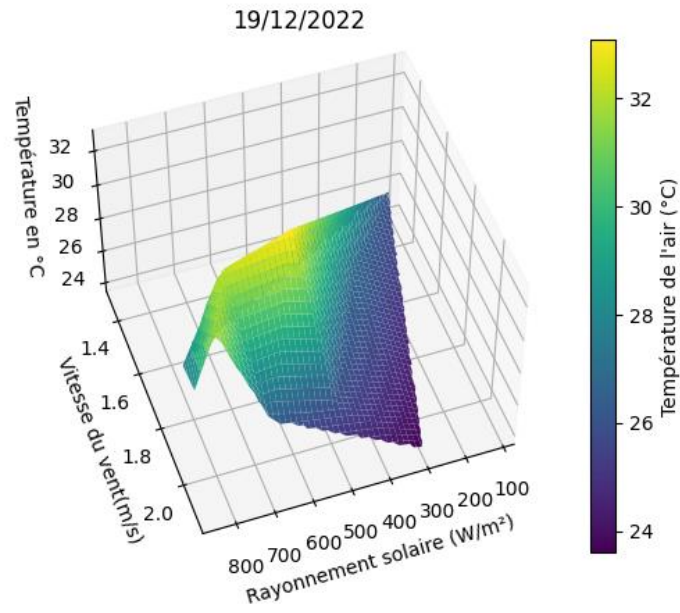


Figure 93: Influence du rayonnement solaire et la vitesse du vent sur la température de l'air à 1 m au-dessus de PTC en été

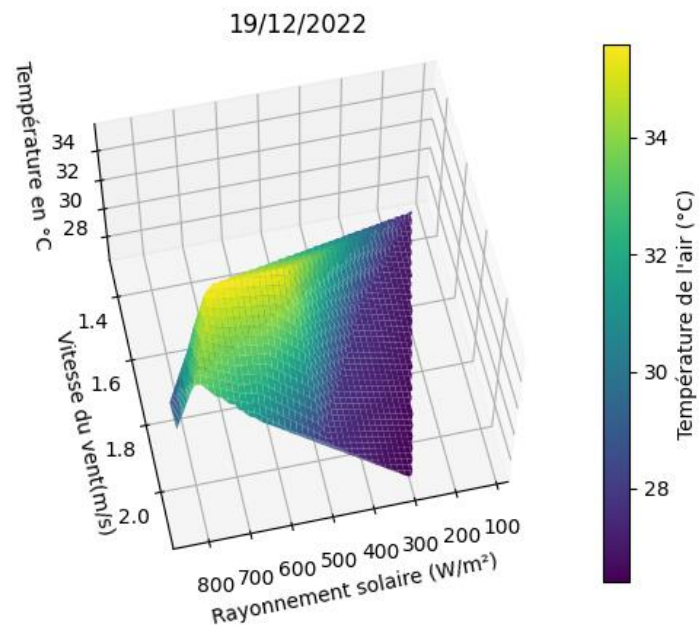


Figure 94: Influence du rayonnement solaire et la vitesse du vent sur la température de l'air à 1 m au-dessus de PT en été

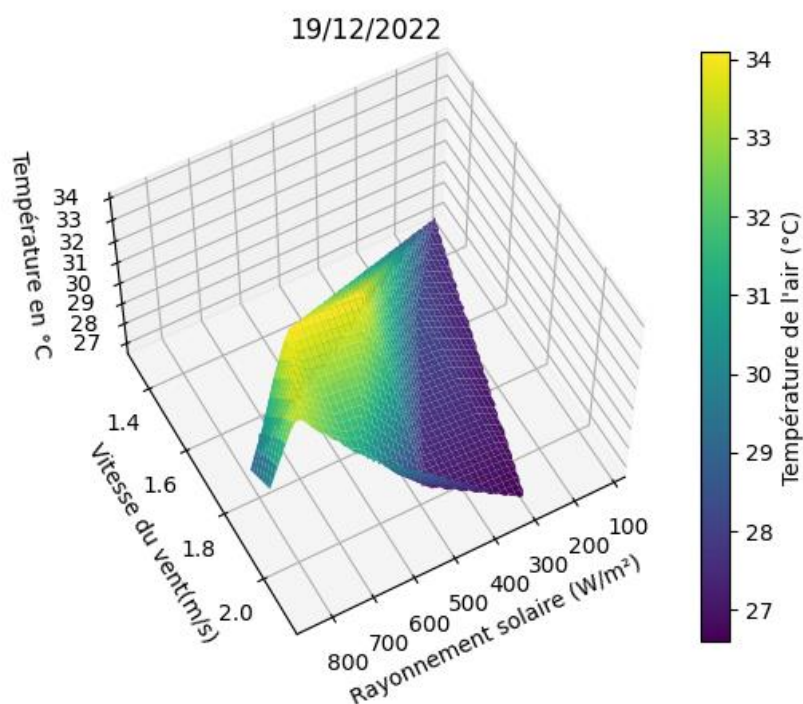


Figure 95: Influence du rayonnement solaire et la vitesse du vent sur la température de l'air à 1 m au-dessus de PB en été

Tableau 20: Exemples de couples de valeurs des paramètres rayonnement solaire et vitesse du vent

Rayonnement solaire et vitesse du vent ( $V_v$ )			Température (°C)			
			PDP	PTC	PT	PB
Rayonnement faible	$V_v$ faible	(200 W/m <sup>2</sup> , 1.41m/s)	34.70	32.20	34.65	33.40
	$V_v$ élevée	(200 W/m <sup>2</sup> , 2.11 m/s)	33.20	30.85	33.20	32.05
Rayonnement fort	$V_v$ faible	(800 W/m <sup>2</sup> , 1.41 m/s)	35.50	32.90	35.40	33.90
	$V_v$ élevée	(800 W/m <sup>2</sup> , 2.11 m/s)	34.00	31.55	33.95	32.55

Avec les données faisant office d'exemples (Cf. *Tableau 20*), à vitesse de vent égale puis à rayonnement identique, les différences de températures atteignent respectivement 1,5 °C et 0,8 °C.

## VII.5.2. Rayonnement solaire et humidité relative de l'air à 1 m au-dessus de chaque pavage

L'humidité relative de l'air est un facteur important qui peut avoir un impact significatif sur la température de l'air au-dessus de pavages (Cf. Paragraphe VII.1.1). Nous représentons sur la *figure 96 à 99*, les différentes courbes qui illustrent l'influence celle-ci et le rayonnement solaire sur la température de l'air pendant la journée de 13 août 2022.

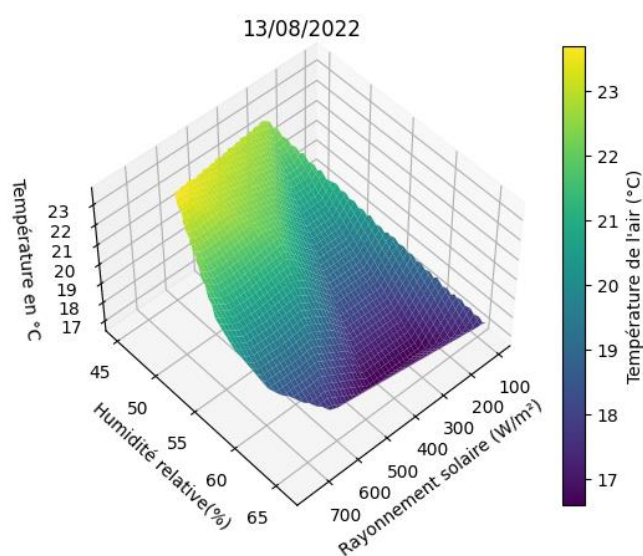


Figure 96: Influence du rayonnement solaire et de l'humidité relative sur la température de l'air à 1 m au-dessus de PDP

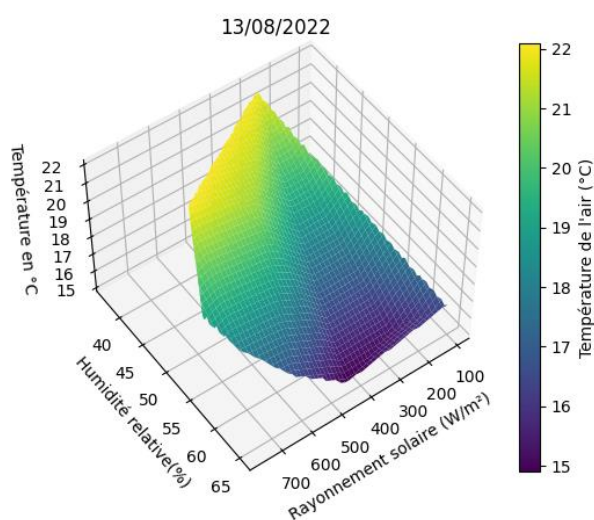


Figure 97: Influence du rayonnement solaire et l'humidité relative sur la température de l'air à 1 m au-dessus de PTC

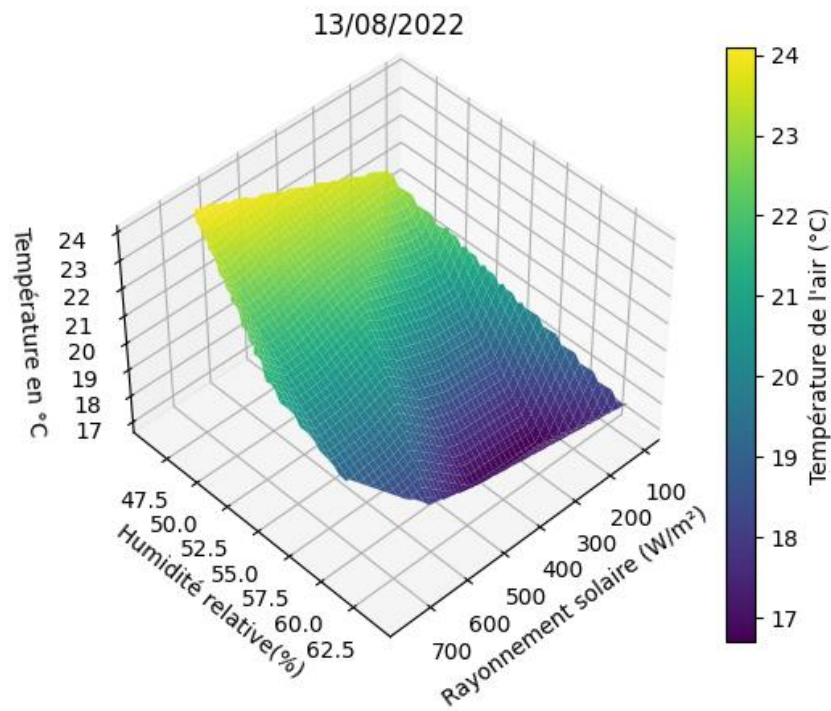


Figure 98: Influence du rayonnement solaire et l'humidité relative sur la température de l'air à 1 m au-dessus de PT

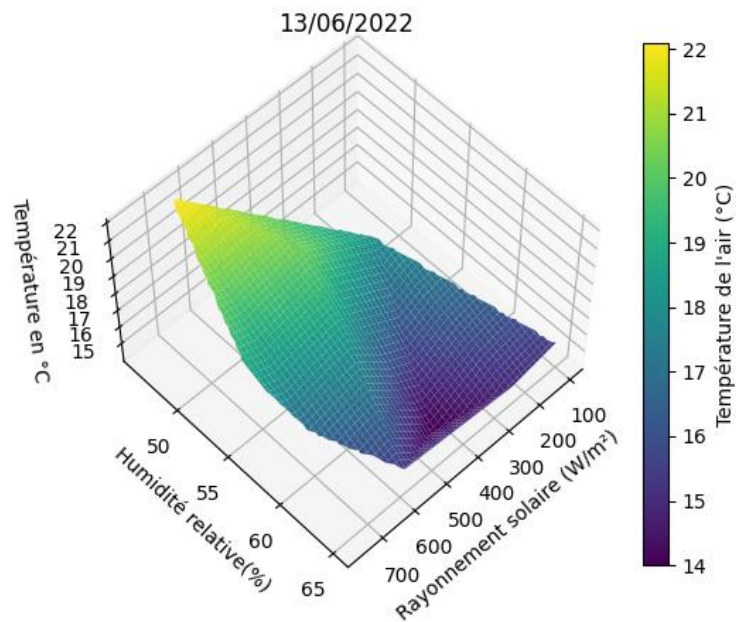


Figure 99: Influence du rayonnement solaire et l'humidité relative sur la température de l'air à 1 m au-dessus de PB

Tableau 21: Exemples de couples de valeurs des paramètres rayonnement solaire et humidité relative

Rayonnement solaire et Humidité Relative ( $V_V$ )			Température (°C)			
			PDP	PTC	PT	PB
Rayonnement faible	HR faible	(200 W/m <sup>2</sup> , 45%),	22.90	21.35	23.35	21.45
	HR élevée	(200 W/m <sup>2</sup> , 60%),	21.61	20.35	22.15	20.45
Rayonnement fort	HR faible	(500 W/m <sup>2</sup> , 45%),	23.50	21.90	23.90	21.90
	HR élevée	(500 W/m <sup>2</sup> , 60%),	22.21	20.90	22.70	20.90

La température de l'air atteint son maximum lorsque l'humidité relative est faible et le rayonnement solaire est élevé. Cependant, elle est s'atténue lorsque ce dernier est plus faible et l'humidité relative élevée. En traçant une ligne horizontale sur une valeur du rayonnement solaire, nous observons une différence de température d'environ 0.7 °C entre les deux valeurs d'humidité pour chaque type de pavage. L'écart de température atteint 1.2 °C lorsque nous fixons la valeur de l'humidité et faisons varier le rayonnement solaire entre deux points. Il convient de souligner que le rayonnement solaire a une influence plus importante que l'humidité relative sur la température de l'air.

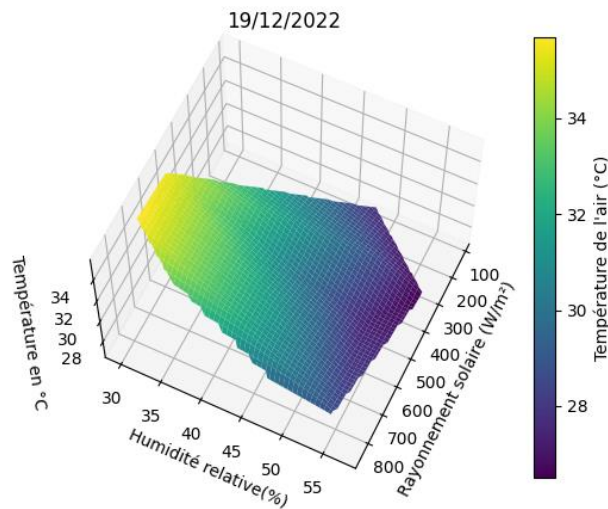


Figure 100: Influence du rayonnement solaire et de l'humidité relative sur la température de l'air à 1 m au-dessus de PDP

Les différentes figures suivantes montrent les différentes courbes pour la période estivale.



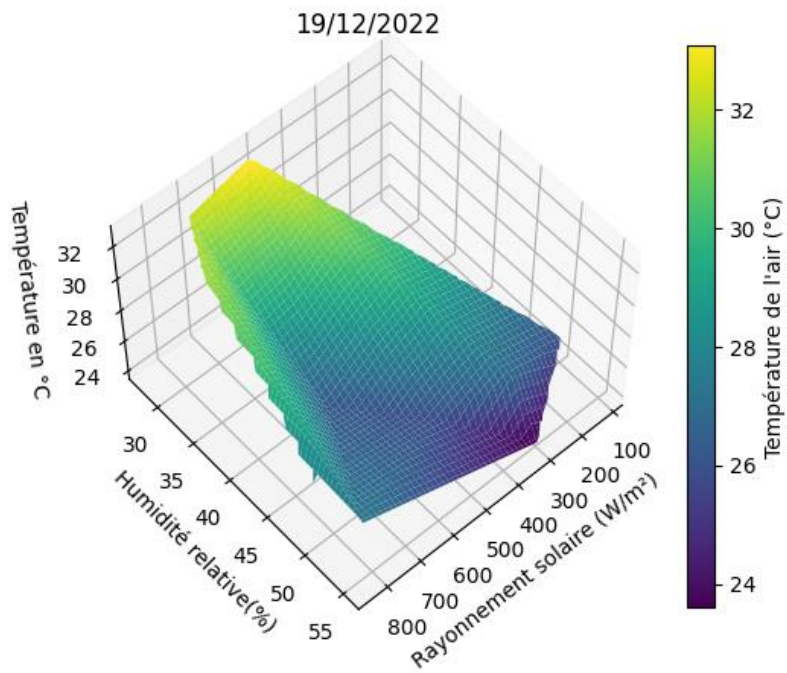


Figure 101: Influence du rayonnement solaire et l'humidité relative sur la température de l'air à 1 m au-dessus de PTC

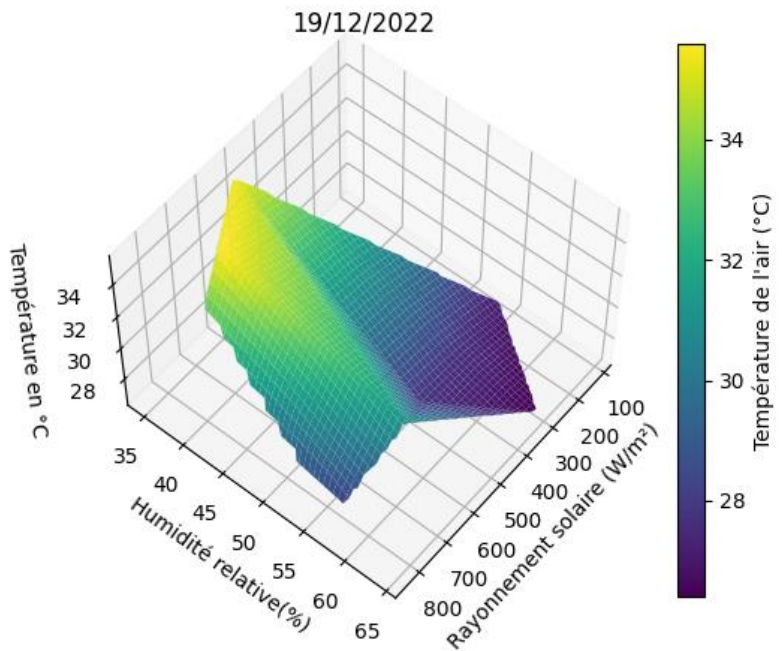


Figure 102: Influence du rayonnement solaire et l'humidité relative sur la température de l'air à 1 m au-dessus de PT

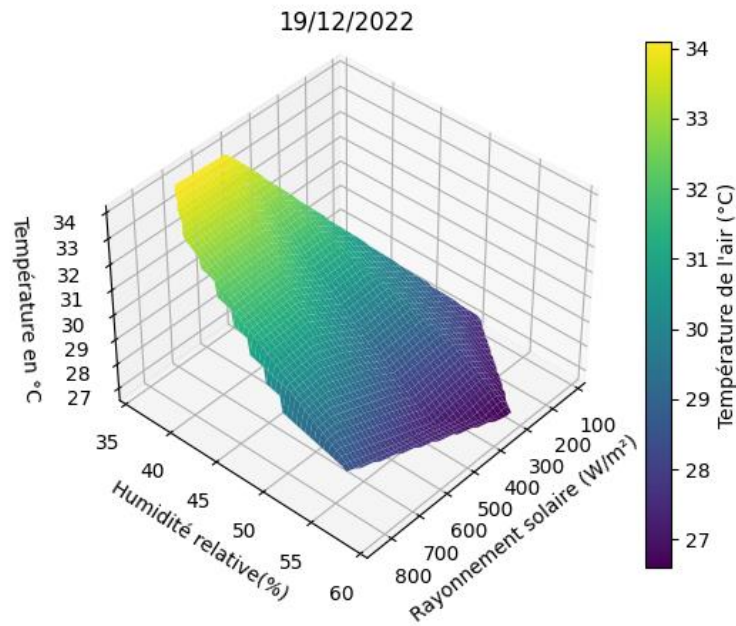


Figure 103: Influence du rayonnement solaire et l’humidité relative sur la température de l'air à 1 m au-dessus de PB

Tableau 22: Exemples de couples de valeurs des paramètres rayonnement solaire et vitesse du vent

Rayonnement solaire et Humidité Relative ( $V_v$ )			Température (°C)			
			PDP	PTC	PT	PB
Rayonnement faible	HR faible	(200 W/m <sup>2</sup> , 35%),	34.75	32.25	34.70	33.45
	HR élevée	(200 W/m <sup>2</sup> , 55%),	33.25	30.90	33.25	32.10
Rayonnement fort	HR faible	(600 W/m <sup>2</sup> , 35%),	35.50	32.90	35.40	33.90
	HR élevée	(600 W/m <sup>2</sup> , 55%),	34.00	31.55	33.95	32.55

L'influence de l'humidité relative est similaire à celle de la période hivernale pour tous les pavages. Cela signifie que l'humidité relative influence la température de l'air, indépendamment de la saison. En résumé, la température croît lorsque le rayonnement augmente. En revanche, elle diminue lorsque la vitesse du vent et l’humidité relative s’élèvent.

## VII.6. ÉVALUATION DE LA TEMPÉRATURE PHYSIOLOGIQUE ÉQUIVALENTE (PET)

Afin d'évaluer le confort thermique au niveau de pavages, nous avons utilisé l'indice PET, comme indiqué dans le [paragraphe III.3.2.d](#). Il est à noter que la vitesse du vent, le rayonnement solaire, la température de l'air et humidité relative sont pris en compte dans ce concept (Cf. *Équation III-16*). Le tableau suivant donne la durée journalière du confort thermique au niveau de chaque pavage pendant le 13 août et 18 décembre 2022. Nous avons compilé les différentes valeurs obtenues pour déterminer les durées des niveaux de confort (Cf. *Tableaux 23*). Nous pensons que les niveaux du confort « Légèrement chaud » et « Légèrement froid » sont relativement acceptables. Notre analyse se base sur le regroupement de ces trois niveaux. Une durée de 10 h a été choisie pour faciliter la comparaison.

Tableau 23: Durée du confort au niveau de chaque pavage

Niveau du confort thermique	Durée journalière (h)							
	PDP		PTC		PT		PB	
	Hiver	Été	Hiver	Été	Hiver	Été	Hiver	Été
Légèrement froid	5	0	5	0	5	0	6	0
Confortable	5	0	5	1	5	0	4	0
Légèrement chaud	0	5	0	6	0	4	0	6
<b>Durée totale</b>	<b>10</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>7</b>	<b>10</b>	<b>4</b>	<b>10</b>	<b>6</b>
Chaud	0	5	0	3	0	6	0	4
Très chaud	0	0	0	0	0	0	0	0

Nous constatons que la durée de confort thermique au niveau de chaque pavage est similaire pendant une journée hivernale. En été, les PTC engendrent un certain niveau de confort significatif autant que les PB. Les PDP et les PT provoquent plus de cinq heures de confort thermique "chaud" au cours d'une journée estivale.

## VII.7. INTENSITÉ D'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN

L'intensité de l'îlot de chaleur urbain fait référence à la différence de température entre les zones urbaines et leurs zones environnantes (Cf. [Paragraphe III.2.3](#)). Dans le cas de notre étude, nous avons choisi le modèle représenté par *équation III-12* afin de la déterminer. Il est à noter que cette grandeur varie en fonction de la nébulosité, la vitesse du vent, la température de l'air ainsi l'humidité spécifique. Le *tableau 24* donne les valeurs moyennes journalières pendant le 13 août et 18 décembre 2022. Plus les valeurs sont élevées, plus il y a une importance différence de température entre la zone d'étude et les zones rurales environnantes.

Tableau 24: Intensité de l'ICU dans le site expérimental

Date	Intensité de l'ICU (°C)			
	PDP	PTC	PT	PB
13/06/2022	1.12	1.02	1.13	1.05
19/12/2022	1.93	1.75	1.95	1.80

Ce tableau montre que les intensités de l'ICU en été sont plus fortes que celles de l'hiver. Elles sont presque identiques pour chaque type de pavage pour la même saison.

## CONCLUSION

Ce chapitre a pour objectif de présenter les différents résultats de l'expérimentation. Les propriétés thermiques de pavages ont été mesurées pour chaque type de pavage en utilisant la méthode de fil chaud parallèle. Les résultats montrent que le modèle quadripolaire conduit à des valeurs en concordance avec la littérature par rapport à celles de la norme ISO 8894–2. La conductivité thermique, la diffusivité thermique et la capacité thermique volumique les plus élevées sont celles des PT. Ils sont suivis de près par les PB. L'utilisation de logiciel Mesurim 2 nous a permis de déterminer l'albédo de chaque matériau. On peut regrouper ces pavages en deux catégories. Les produits à faible pouvoir réfléchissant sont constitués par les PDP et les PT avec une valeur d'albédo respectivement 0.08 et 0.14. Les PTC et les PB sont les matériaux à fort facteurs de réflexion solaire, respectivement 0.22 et 0.26. Nous avons remarqué que les températures de surface de l'élément PT et PDP sont supérieures à celles de PTC et PB quelle que soit la saison. Les températures de l'air sont proportionnelles aux températures de surface. Parmi les facteurs climatiques, le rayonnement solaire est le plus influent à la température. Une augmentation de ce dernier provoque une augmentation de la température. En revanche, la température diminue lorsque la vitesse du vent et l'humidité relative s'élèvent. En évaluant le

confort au niveau de chaque pavage selon l'indice PET, nous avons observé que les pavés en terre cuite sont les plus indiqués dans notre site d'étude.

## **CHAPITRES VIII : OUTIL DE SIMULATION**

### **INTRODUCTION**

Les expérimentations in situ se limitent sur une étude de quelques types de pavages. Afin de tester plusieurs scénarios, un outil de simulation a été développé. Cette simulation a pour but de faire des prédictions et d'étendre l'étude à d'autres sites, autres zones climatiques et autres matériaux. D'abord, nous avons modélisé le comportement thermique de pavage à travers l'indicateur "température de surface" en prenant en compte les propriétés thermiques des matériaux utilisés. Il s'agit de la conductivité thermique, la chaleur massique, la masse volumique et l'albédo. Ensuite, nous avons intégré les paramètres climatiques dans notre modèle de simulation, à savoir la température de l'air à différentes élévations, la hauteur, l'humidité relative et le rayonnement solaire. Ces paramètres ont été obtenus à partir de données météorologiques dans la zone géographique considérée. En utilisant ces données, nous avons simulé le comportement thermique du pavage en fonction des variations climatiques. Ainsi, nous avons simulé différents scénarios, tels que la variation de la température de surface de pavage et la température de l'air à différentes hauteurs au fil du temps. Enfin, nous avons analysé les résultats de la simulation pour comprendre comment les matériaux de pavage réagissent aux variations climatiques et comment les paramètres climatiques affectent la température du pavage. Cette analyse peut nous aider à prendre des décisions éclairées sur le choix des matériaux de pavage et la mise en place de mesures d'adaptation au changement climatique. Cette présente section se focalise sur le développement de ce modèle.

### **VIII.1. MODÉLISATION**

#### **VIII.1.1. Prédiction de la température**

La phase expérimentale de nos travaux d'investigation nous a permis de réunir d'une part, des données climatiques et, d'autre part, plusieurs caractéristiques thermiques des matériaux testés ainsi que l'indicateur température de surface (Cf. [Paragraphe V.3.2](#)). L'ensemble de ces données empiriques sont utilisées pour le développement des modèles mathématiques. Ces derniers serviront à faire des simulations d'impacts sur le microclimat urbain de revêtements de sol en fonction de la nature des matériaux mis en œuvre.

### a. Analyse de régression

Le modèle mathématique de la prédiction de la température basée sur l'expérimentation a été développé en utilisant la méthode de régression linéaire multiple. Les modèles linéaires sont obtenus à travers l'équation VIII-1 :

$$y_i = \beta_0 + \sum_J^P \beta_J X_{i,j} + \varepsilon_i \quad (\text{VIII-1})$$

$y_i$  : variables réponses

$X_{i,j}$  : variables indépendantes

$\beta$  : coefficient inconnu

$\varepsilon_i$  : zero erreur moyen

D'après la balance thermique au niveau de RSE du [paragraphe III.1.4](#), les paramètres qui influencent leur température sont la vitesse du vent, le rayonnement solaire, l'humidité relative, l'albédo, la conductivité thermique, la chaleur spécifique et la masse volumique. La diffusivité thermique est utilisée dans le modèle pour représenter ces trois derniers afin de réduire le nombre de paramètres. Nous avons pris donc la température de surface et la température de l'air à 1 m au-dessus de la surface de pavage comme variables dépendantes (variables réponses). Les variables indépendantes rassemblent l'heure légale, la hauteur par rapport au sol et les différents paramètres précédents.

Le coefficient de performance  $R^2$  fournit une certaine indication sur la qualité de l'ajustement du modèle, indiquant la précision avec laquelle la ligne de régression s'adapte aux données réelles. Il est mathématiquement défini par :

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (\text{VIII-2})$$

SSR : Somme des carrés du modèle

SST : Somme totale des carrés des écarts

SSE : Somme résiduelle des carrés

$$SSR = \sum_i (\hat{y}_i - \bar{y})^2$$

$$SST = \sum_i (y_i - \bar{y})^2$$

$$SSE = \sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2$$

$\bar{y}$  : valeur moyenne des valeurs observées

$\hat{y}_i$  : valeur modélisée de la valeur actuelle  $y_i$

Il est à noter que le meilleur modèle est considéré comme étant celui qui contient le plus grand coefficient de performance. Afin de faciliter la résolution de l'équation VIII-1, nous nous focalisons sur le Machine Learning.

## b. Machine Learning

Le Machine Learning ou apprentissage automatique en français est une branche de l'intelligence artificielle qui permet aux systèmes informatiques d'apprendre et de s'améliorer automatiquement à partir des données, sans être explicitement programmés pour effectuer une tâche donnée. Les algorithmes du Machine Learning analysent les données d'entrée, trouvent des modèles et des relations dans les données, puis les utilisent pour prendre des décisions ou pour effectuer des prévisions sur de nouvelles données. Dans cette étude, elle consiste à développer un modèle mathématique à partir de données expérimentales.

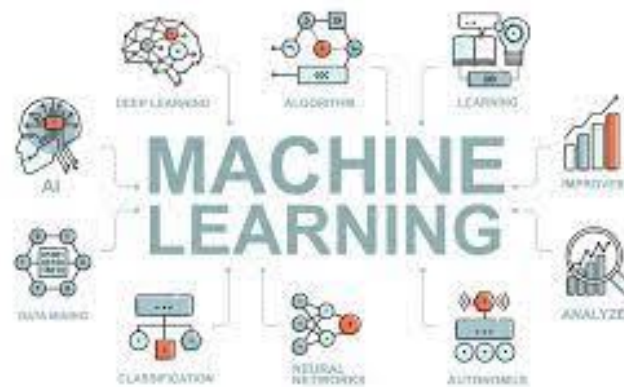


Figure 104: Domaines d'application Machine Learning

Il existe trois techniques d'apprentissages, à savoir l'apprentissage supervisé, l'apprentissage non supervisé et l'apprentissage par renforcement en Machine Learning. Ces méthodes sont fortement inspirées de la façon dont nous, les êtres humains, apprenons à faire des choses. L'apprentissage SUPERVISÉ a été retenu dans cette étude. C'est un paradigme d'apprentissage le plus populaire en apprentissage automatique et en apprentissage profond (Deep Learning). Il consiste à superviser l'apprentissage de la machine en lui montrant des exemples de la tâche qu'elle doit réaliser, généralement sous forme de données. Il est important de souligner que l'abondance de données contribue à améliorer les résultats et les performances des systèmes d'apprentissage.



L'apprentissage SUPERVISÉ a pour but d'apprendre à la machine à prédire une donnée spécifique, identifiée comme étant la variable  $y$ , en fonction d'autres données qui sont les variables annotées globalement ( $X$ ).

La modélisation suit les trois étapes fondamentales suivantes :

- L'analyse de données
- L'entraînement de données
- La modélisation

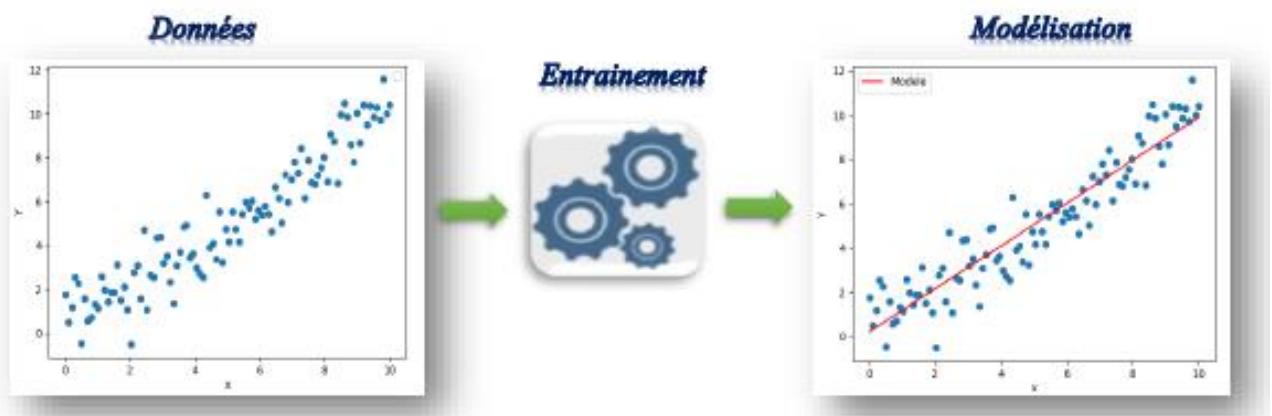


Figure 105: Différentes étapes de la modélisation

### a.1. Analyses des données

En ML, tout démarre d'un Dataset qui contient nos données. Dans l'apprentissage supervisé, le Dataset contient les questions ( $X$ ), et les réponses ( $y$ ) au problème que la machine doit résoudre. L'analyse consiste à l'identification de «  $y$  », de nombre de lignes et de colonnes qui lui sont assignés, respectivement 2143 et 8 dans notre cas. Cette étape nous aide aussi à connaître les valeurs manquantes dans les données et le type des variables. Les résultats obtenus pendant les périodes du 11 au 13 août 2022 et du 17 au 19 décembre 2022 sont les données servant à l'apprentissage SUPERVISÉ. Elles sont enregistrées dans un fichier de format "xlsx".

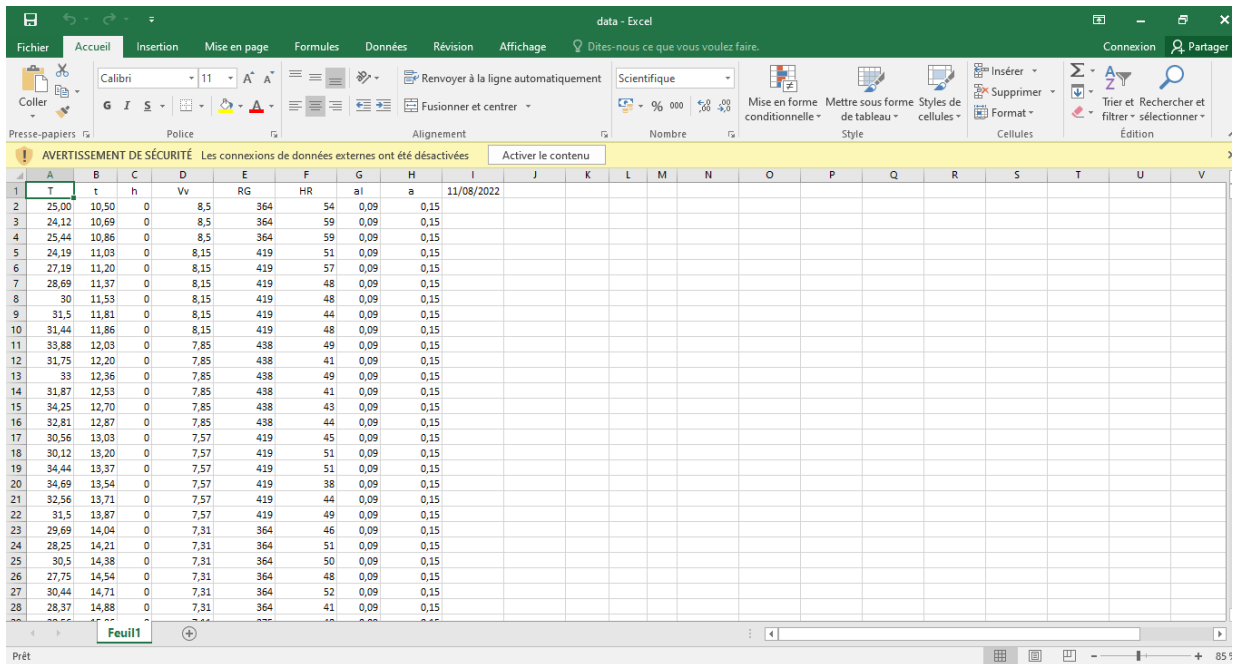


Figure 106: Feuille Excel de Dataset

### a.2. Entraînement de données

La phase d'entraînement est une étape de prétraitement des données réparties aléatoirement en deux groupes. Le premier en contient 20% qui servent dans la modélisation appelée « test ». Leur rôle est d'entraîner le modèle. Les 80% constituant le second groupe, réservées dans le traitement de modèle appelés « train ». Leur fonction consiste à évaluer la performance du modèle. L'objectif est de transformer les données pour le mettre dans un format propice au Machine Learning.

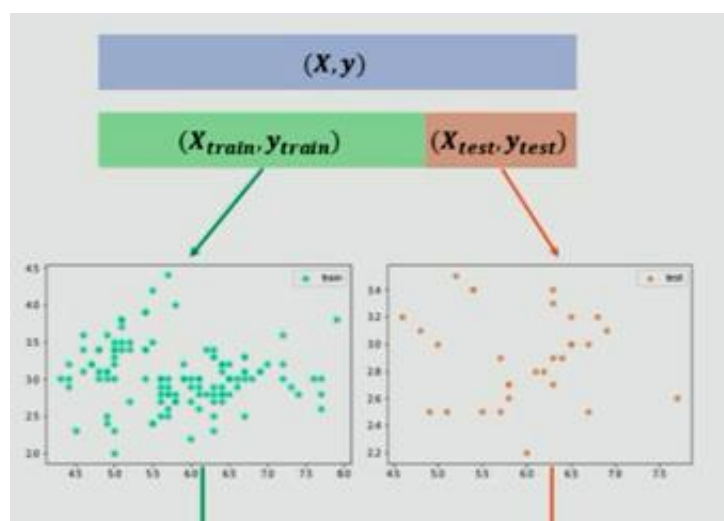


Figure 107: Étape de traitement de données

### a.3. Modélisation

Le modèle mathématique que nous avons créé est linéaire. Une fois que le modèle a été entraîné, il est évalué en utilisant l'ensemble de validation. Sa performance est mesurée en utilisant le coefficient de performance de l'équation VIII-2. Si elle est jugée insuffisante, il est nécessaire d'apporter des améliorations. Cela peut inclure l'utilisation de techniques de régularisation, le changement des paramètres du modèle, ou encore la sélection de caractéristiques pour réduire le nombre de variables en entrée. L'ensemble du processus est itératif, avec des ajustements successifs jusqu'à ce que le modèle atteigne une performance jugée satisfaisante.

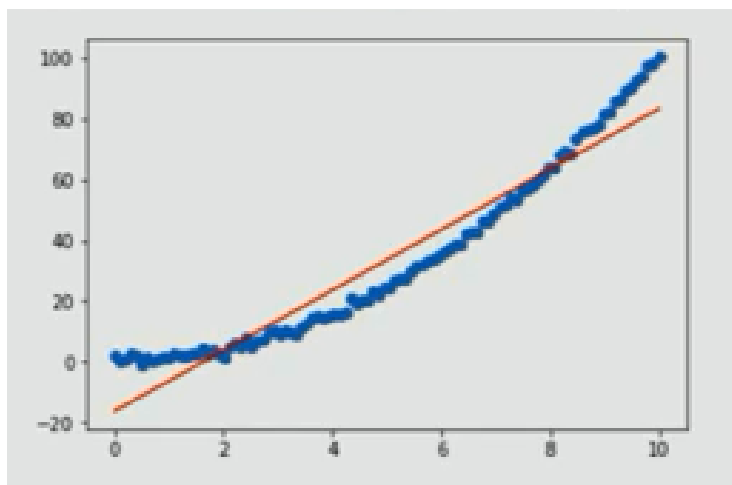


Figure 108: Courbe de modélisation

### a.4. Environnement de programmation

Nous avons choisi le langage de programmation **Python**. Il est un langage standard, et plus avantageux spécialement dans le Machine Learning. D'une part, il dispose de bibliothèques populaires telles que scikit-learn, TensorFlow et Keras, qui offrent une grande variété d'algorithmes d'apprentissage automatique pour la prédiction et la modélisation des données. Dans notre travail, nous avons utilisé **Scikit-Learn**. Ces bibliothèques sont largement utilisées et disposent d'une documentation abondante et de nombreux exemples de code. Python est doté aussi de bibliothèques puissantes pour le traitement et l'analyse des données, notamment NumPy et pandas. Il nous permet de manipuler et de préparer les données de manière efficace avant de les utiliser pour la prédiction de la température. Python est installable soit :

- Avec Anaconda : il est très simple, toutes les bibliothèques utilisées dans Machine Learning sont déjà y intégrer.
- Installation manuelle : le principe est de l'installer selon la version de notre choix. Les bibliothèques sont installées en utilisant la commande « pip install nom du module »

Après la collecte des données et leur préparation, l'organigramme de calcul est représenté par la figure :

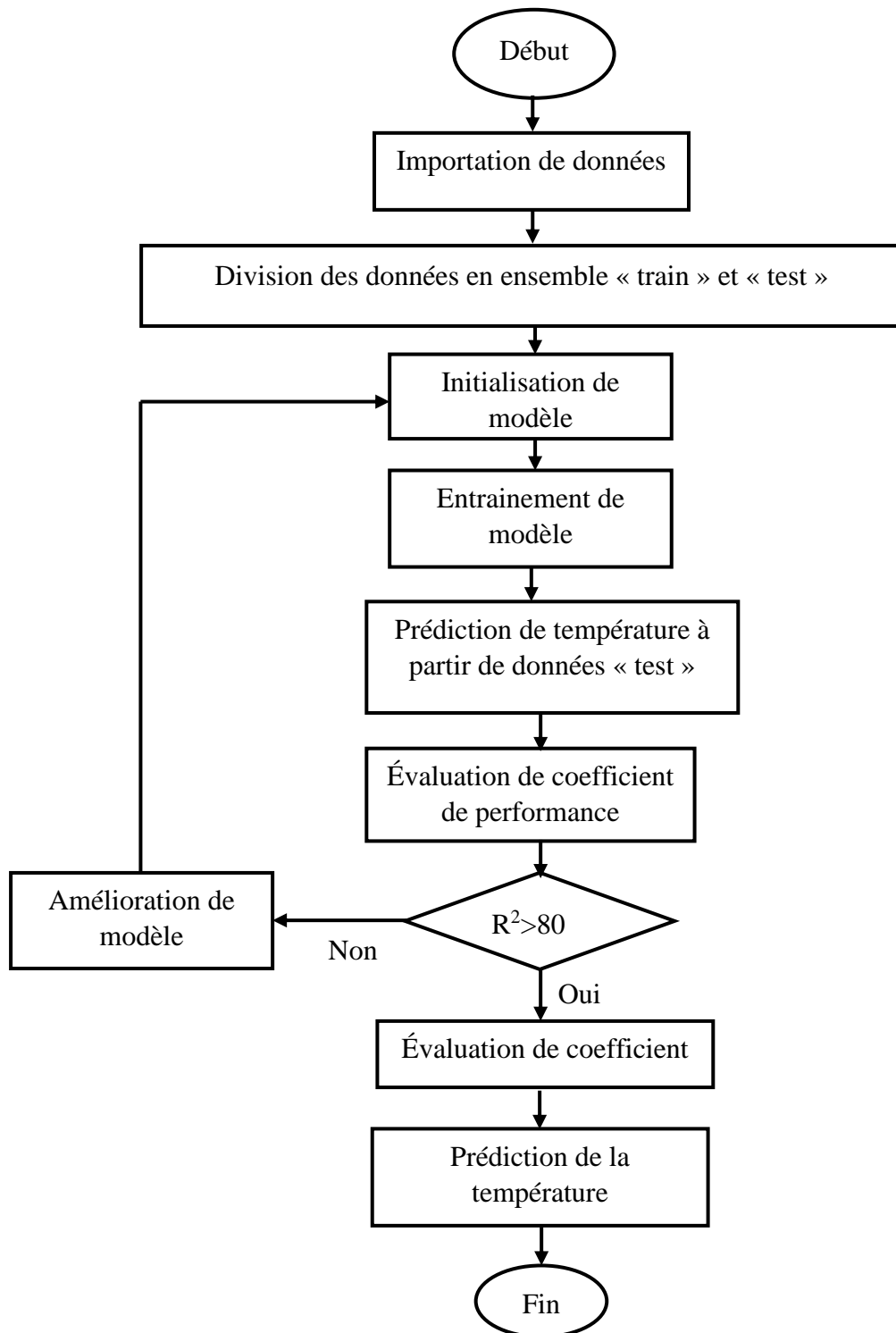


Figure 109: Organigramme de différentes étapes de la modélisation

Le modèle « **LinearRegression ()** » a été utilisé pour prédire la température. La commande « **fit ()** » permet d'entraîner ce modèle sur les données X et y. Afin d'évaluer le modèle (Cf.

Paragraphe VIII.1.1.a), la commande « `score ()` » a été utilisée. La « `predict ()` » sert à la prédiction. Les coefficients et la constante ont été évalués par les commandes « `coef_` » et « `intercept_` ».

Après l'exécution de code de calcul (Cf. ANNEXE 12), les valeurs données par le *tableau 25* suivant ont été obtenues.

Tableau 25: Coefficient de chaque paramètre

Paramètres	Coefficient $\beta_i$
Heure légale	0.02
Hauteur	-7.72
Vitesse du vent	-1.41
Rayonnement solaire global	0.096
Humidité relative	-0.02
Albédo	-21.48
Diffusivité thermique	2514361.47
Constante	53.50

Le modèle mathématique de température de pavage est donc donné par l'équation VIII-3 :

$$T = \beta_1 HL + \beta_2 h + \beta_3 V_v + \beta_4 R_G + \beta_5 HR + \beta_6 \rho + \beta_7 a + \beta_0 \quad (\text{VIII-3})$$

Le coefficient négatif signifie qu'une augmentation de la valeur d'un paramètre correspondance diminue la température. En revanche, le coefficient positif augmente cette dernière.

### VIII.1.2. Analyse de sensibilité du modèle

Afin d'identifier les paramètres les plus influents de notre modèle, on utilise l'analyse de sensibilité réduite. La méthode de décomposition de Sobol est appliquée dans cette étude. Elle fournit des indices de sensibilité réduite qui indiquent l'importance relative de chaque

paramètre, en tenant compte des interactions avec d'autres paramètres. L'indice de sensibilité réduite le plus couramment utilisé sont les indices de premier ordre (S1), qui mesurent l'effet direct d'un paramètre sur la variance de la sortie.

Pour faciliter l'analyse de sensibilité, nous avons utilisé les bibliothèques SALib (Sensitivity Analysis Library) en Python. Ils fournissent des implémentations de la méthode de décomposition de Sobol. Le calcul se résume dans les différentes étapes suivantes :

- Choix de paramètres
- Génération des échantillons Sobol
- Évaluation des températures prédites pour chaque combinaison de paramètres
- Analyse de sensibilité réduite avec la méthode de décomposition de Sobol
- Affichage des indices de sensibilité réduite pour chaque paramètre

La ligne de code utilisée pour ce calcul est développée dans l'[ANNEXE 12](#). Le *tableau 26* donne les différentes valeurs des indices de sensibilité réduite.

Tableau 26: Indices de sensibilité réduite de différents paramètres

Paramètres	Indices de sensibilité réduite
Heure légale	0.013
Hauteur	0.10
Vitesse du vent	0.12
Rayonnement solaire global	0.21
Humidité relative	0.11
Albédo	0.43
Diffusivité thermique	0.017

L'indice de sensibilité réduite de l'albédo est le plus élevé, ayant pour valeur égale à 0.43. Cela indique que ce paramètre contribue à environ 43% de la variance totale de la température. En revanche, l'heure légale et la diffusivité thermique présentent des indices très faibles. Les trois autres possèdent un indice de sensibilité quasiment similaire.

### VIII.1.3. Prédiction de la température de revêtements de sol non étudiés

Pour les revêtements de sol qui n'ont pas été étudiés au cours de l'expérimentation, tels que l'asphalte et le béton de ciment, nous avons utilisé le modèle mathématique développé par [Tina \(2013\)](#).

#### **VIII.1.4. Évaluation de l'intensité d'ICU**

L'étude bibliographique précédent nous informe que les revêtements de sol affectent fortement le microclimat urbain. Afin d'évaluer leur impact sur l'îlot de chaleur urbain, nous avons utilisé l'équation III-12 du [paragraphe III.2.3](#). Il est à rappeler que l'intensité d'ICU varie en fonction de la nébulosité (N), la vitesse du vent ( $V_v$ ), la température (T) et l'humidité spécifique (q). La température T dépend de propriétés thermiques de revêtements de sol ainsi que les conditions climatiques.

#### **VIII.1.5. Évaluation du confort thermique**

L'indice du confort PET a été utilisé pour évaluer le confort thermique de chaque pavage. Pour le calcul, nous avons utilisé l'équation III-16 du [paragraphe III.3.2](#). Il est à noter que cet indice varie en fonction de l'humidité relative de l'air, la température de l'air, la vitesse du vent et le rayonnement global.

### **VIII.2. SIMULATION**

#### **VII.2.1. Mise en œuvre de l'outil**

Les modèles précédemment développés ont été intégrés dans notre outil de simulation. Nous avons conçu plusieurs interfaces permettant de saisir les données d'entrée requises et de visualiser les résultats de la simulation. Grâce à cet outil, nous sommes en mesure de simuler une large gamme de scénarii bâtis sur le tandem nature de matériaux de pavage et conditions climatiques de divers sites. Le but est de proposer des solutions pour un confort extérieur optimal en fonction du type d'environnement urbain afin d'anticiper la formation d'îlot de chaleur. Il est spécifiquement conçu pour étudier les espaces publics tels que les jardins, les cours, les rues et les avenues à l'échelle micro, sans prendre en compte les bâtiments. Par conséquent, les impacts de la chaleur anthropique ont été négligés. Il en est de même, de la végétation et de l'ombrage. L'outil conçu doit tenir compte des éléments suivants :

- Le rayonnement solaire réfléchi à la surface de pavages
- La perte d'énergie par convection entre cette surface et l'air ambiant
- L'échange d'énergie par conduction entre les pavés.

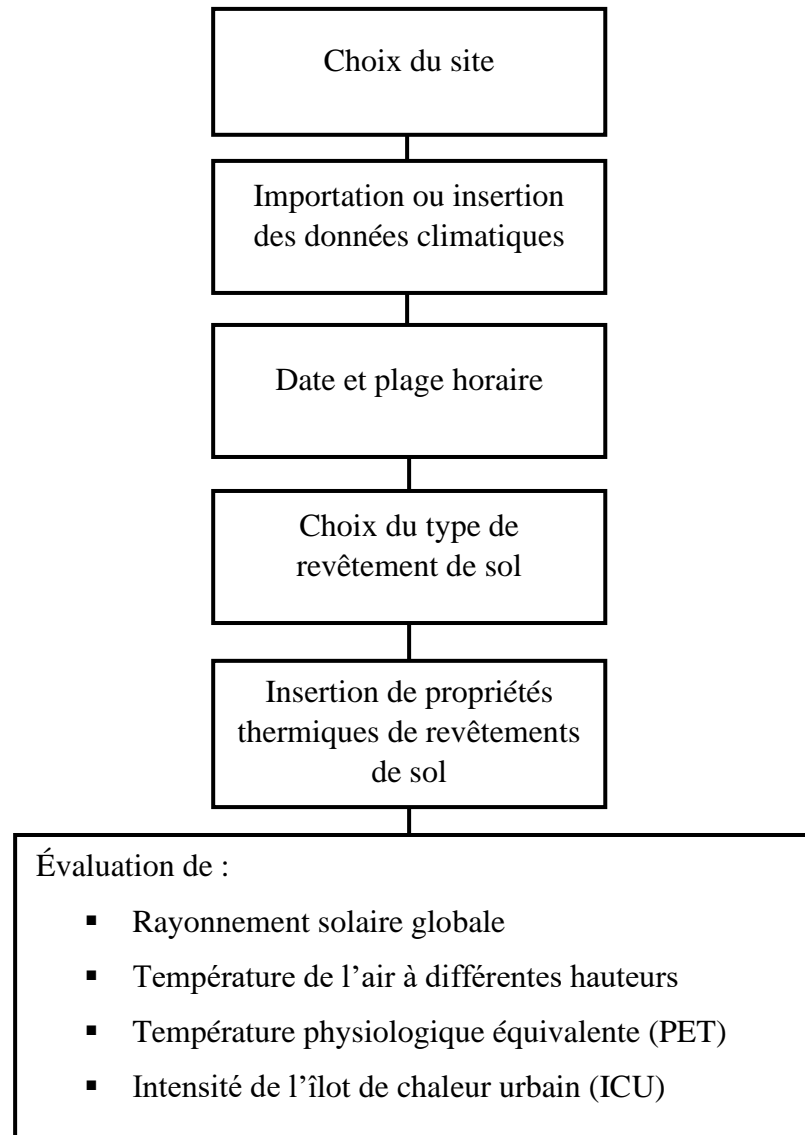


Figure 110: Différentes étapes de l'utilisation de l'outil

## VII.2.2. Présentation de l'outil

Une fois que notre outil, appelé " I-PATHCLIM ", est lancé, la fenêtre représentée dans *la figure 111* s'affiche en premier. À partir de cette fenêtre, il est possible de calculer les différentes sorties en utilisant les modèles développés dans le [paragraphe VIII.1.1](#). Il vous suffit d'entrer les données spécifiques au site, les données climatiques, la date et l'heure locale, ainsi que de sélectionner les revêtements de sol à utiliser.



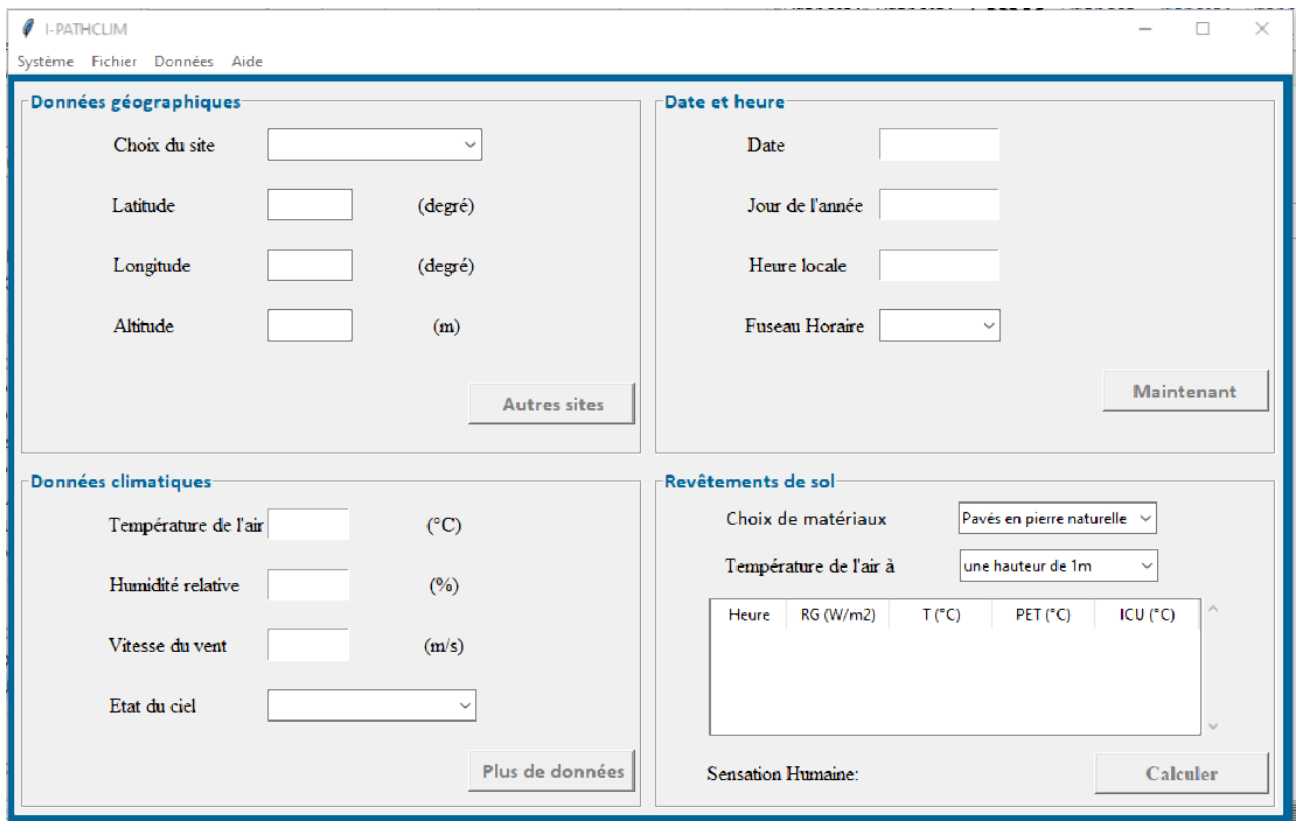
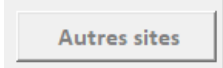


Figure 111: Interface de l'outil I-PATHCLIM

#### a. Choix du site

La *figure 112* présente l'interface permettant de sélectionner l'emplacement du projet. Les données géographiques de six grandes villes de Madagascar, à savoir Antananarivo, Fianarantsoa, Toliara, Toamasina, Mahajanga et Antsiranana, sont déjà intégrées dans l'outil. Pour les autres sites, il suffit d'insérer les coordonnées correspondantes. De plus, en cliquant sur le bouton , il est possible de naviguer sur le site de la NASA (*figure 113*) afin de télécharger les données géographiques et climatiques.

**Données géographiques**

Choix du site

Latitude  (degré)

Longitude  (degré)

Altitude  (m)

[Autres sites](#)

Figure 112: Interface pour l'insertion de données géographiques

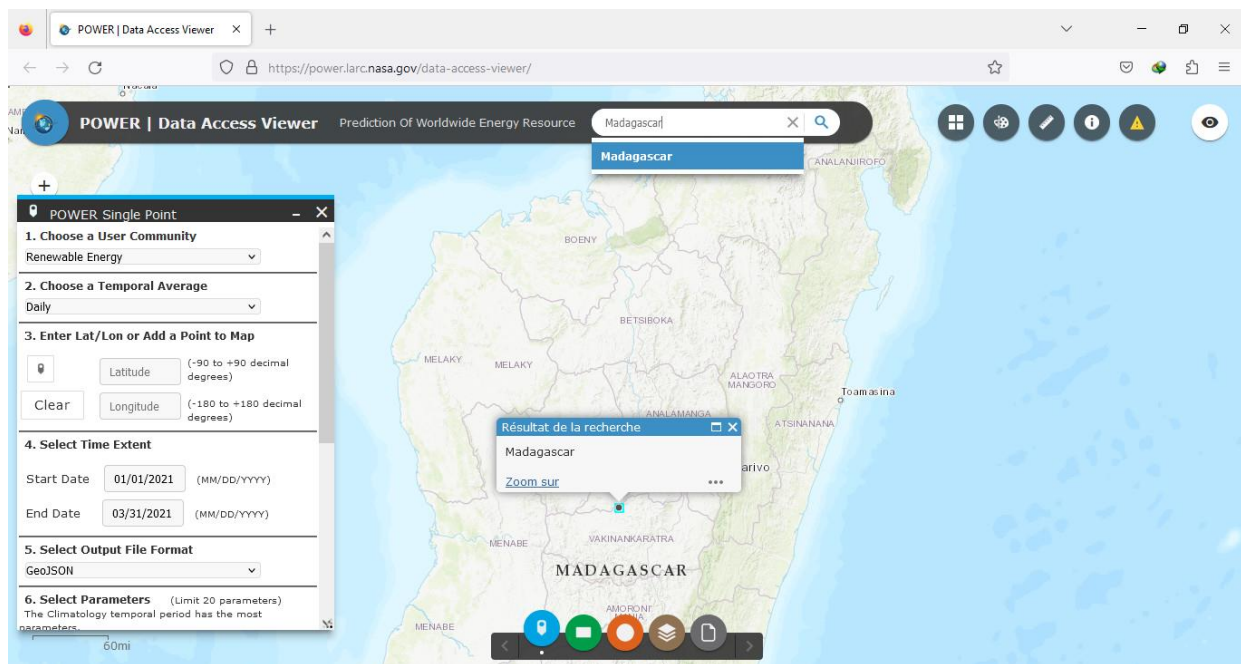


Figure 113: Fenêtre du navigateur avec le site « POWER Data Access Viewer »

### b. Insertion de données climatiques

Il y a deux options pour l'insertion des données climatiques. La première consiste à les saisir manuellement. La deuxième option consiste à importer des données climatiques depuis un fichier Excel par le biais du menu [Fichier](#). On peut également accéder aux données depuis un site de la NASA, plus précisément le « POWER Data Access Viewer », en cliquant sur le

bouton [Plus de données](#).

L'état du ciel est évalué selon cinq échelles allant de « ciel serein » à « couvert ». Ce dernier est utilisé pour l'estimation du rayonnement solaire global (Cf. Paragraphe VI.3.2. d).

**Données climatiques**

Température de l'air  (°C)

Humidité relative  (%)

Vitesse du vent  (m/s)

Etat du ciel

**Plus de données**

Figure 114: Interface pour l'insertion de données climatiques

### c. Insertion de la date et l'heure locale

La date et l'heure locale saisies dans l'interface montré par la *figure 115* peuvent être actualisées au moyen du bouton . Comme pour les autres éléments d'information, il est possible de les obtenir à l'aide d'un fichier Excel contenant les données climatiques.

**Date et heure**

Date

Jour de l'année

Heure locale

Fuseau Horaire

**Maintenant**

Figure 115: Interface pour l'insertion de la date et l'heure locale

#### d. Choix de revêtements de sol

Le choix de revêtements de sol porte sur cinq types de matériaux : les pavés en pierre naturelle, les pavés en terre cuite, les pavés autobloquants de déchets plastiques, l'asphalte et le béton de ciment. La sélection est effectuée au niveau de l'interface de la *figure 116*.

Heure	RG (W/m <sup>2</sup> )	T (°C)	PET (°C)	ICU (°C)
-------	------------------------	--------	----------	----------

Figure 116: Interface pour le choix de revêtements de sol

Après cette opération, la fenêtre affiche les différentes caractéristiques thermiques et radiatives correspondantes (*Figure 117-122*). Les valeurs par défaut sont celles obtenues lors de la mesure (Cf. Paragraphe VII.1 et VII.2).

Albédo	0.14	
Conductivité thermique	2.17	W/m K
Chaleur massique	900	J/kg K
Masse volumique	2370	kg/m <sup>3</sup>

Figure 117: Fenêtre pour insérer les propriétés thermiques de pavés en pierre naturelle

The screenshot shows a software window titled "Propriétés thermiques de pavés de déchet...". It contains four input fields for thermal properties, each with a unit label to its right. At the bottom center is an "OK" button.

Propriété	Valeur	Unité
Albédo	0.09	
Conductivité thermique	0.72	W/m K
Chaleur massique	1000	J/kg K
Masse volumique	1900	kg/m <sup>3</sup>

Figure 118: Fenêtre pour insérer les propriétés thermiques de pavés autobloquants

The screenshot shows a software window titled "Propriétés thermiques de pavés en terre c...". It contains four input fields for thermal properties, each with a unit label to its right. At the bottom center is an "OK" button.

Propriété	Valeur	Unité
Albédo	0.22	
Conductivité thermique	0.9	W/m K
Chaleur massique	920	J/kg K
Masse volumique	1900	kg/m <sup>3</sup>

Figure 119: Fenêtre pour insérer les propriétés thermiques de pavés en terre cuite

Propriétés thermiques de pavés de béton

Albédo	<input type="text" value="0.26"/>	
Conductivité thermique	<input type="text" value="1.75"/>	W/m K
Chaleur massique	<input type="text" value="900"/>	J/kg K
Masse volumique	<input type="text" value="2300"/>	kg/m <sup>3</sup>

OK

Figure 120: Fenêtre pour insérer les propriétés thermiques de pavés de béton

Propriétés thermiques d'asphalte

Albédo	<input type="text" value="0.09"/>	
Conductivité thermique	<input type="text" value="0.4"/>	W/m K
Chaleur massique	<input type="text" value="1100"/>	J/kg K
Masse volumique	<input type="text" value="2200"/>	kg/m <sup>3</sup>

OK

Figure 121: Fenêtre pour insérer les propriétés thermiques de l'asphalte

Propriétés thermiques de béton de ciment

Albédo

Conductivité thermique  W/m K

Chaleur massique  J/kg K

Masse volumique  kg/m<sup>3</sup>

Figure 122: Fenêtre pour insérer les propriétés thermiques de béton de ciment

#### e. Affichage des résultats de calculs

L'exécution des calculs enclenchée avec le bouton  , conduit à un groupe de résultats affichés dans le tableau de la *figure 123*. Ces sorties sont le rayonnement solaire global (RG), la température de l'air à différentes hauteurs (T), l'indice de température physiologique équivalente (PET) et l'intensité de l'îlot de chaleur (ICU). Ils peuvent être exportés vers une feuille Excel en utilisant le menu  . Rappelons que l'ICU et la PET mesurent respectivement la différence de température entre le milieu urbain avec son milieu environnant et le niveau du confort thermique. Le type de sensation humaine correspondant à la valeur de cette dernière est également affichée dans ce tableau.

Heure	RG (W/m <sup>2</sup> )	T (°C)	PET (°C)	ICU (°C)

Sensation Humaine:

Figure 123: Tableau d'affichage des résultats

### VII.2.3. Validation de l'outil

Les données climatiques du 12 août 2022 ont été utilisées pour prédire la température de l'air à une hauteur de 1 mètre. Ces prédictions ont été comparées aux valeurs expérimentales obtenues lors de cette journée. Dans le cadre de cette validation, les pavés en béton ont été sélectionnés comme revêtements de sol.

Le *tableau 27* présente les écarts relatifs (en %) calculés à partir des valeurs fournies par l'outil et celles obtenues à partir des données expérimentales.

Tableau 27: Comparaison de résultats expérimentaux et résultats de simulation

Heures	Température expérimentale (°C)	Température prédite (°C)	Écart relatif
08 :00	13	12,3	5%
09 :00	14,4	13,5	6%
10 :00	15,9	14,5	9%
11 :00	21,9	20	9%
12 :00	22,3	20,5	8%
13 :00	19,8	18	9%
14 :00	18,9	17,5	7%
15 :00	19,8	18,3	8%
16 :00	18,1	16,5	9%
17 :00	17,1	15,5	9%

Généralement, un écart relatif inférieur à 10% est considéré comme acceptable dans de nombreux domaines scientifiques et techniques (Billoux et al., 2016). Dans le cas présent, les écarts relatifs varient entre 5% et 9%. Ces valeurs indiquent que les températures prédites par l'outil sont généralement proches des températures expérimentales, avec une légère différence. Sur la base de ces résultats, il est possible de considérer que l'outil présente une précision raisonnable dans la prédiction des températures.



## CONCLUSION

Ce chapitre consiste au développement du modèle mathématique pour prédire la température de surface de pavages et la température de l'air à différentes hauteurs de leur surface ainsi que la conception de l'outil de simulation. La méthode d'apprentissage supervisé a été sélectionnée afin d'analyser les données expérimentales. Le modèle est obtenu en utilisant ces données et on l'intègre dans le programme de simulation numérique. PYTHON a été choisi comme langage de programmation. Les entrants comprennent les propriétés thermiques et radiatives de revêtements de sol et les conditions climatiques. Ces dernières peuvent être importées dans l'outil en utilisant des données en fichier Excel ou en saisissant les valeurs dans l'interface. Les sortants rassemblent la température de l'air, la température physiologique équivalente et l'intensité de l'îlot de chaleur urbain. Après l'analyse de sensibilité de modèle, il est remarqué que l'albédo est le paramètre le plus influent au changement de température. En comparant les résultats obtenus pendant l'expérimentation et ceux de la simulation, nous avons obtenu un écart relatif qui varie de 5 % à 9 %. Notre dernier chapitre se focalise sur l'application de cet outil au cas de milieux urbains de Madagascar.

# CHAPITRE IX : APPLICATION DE L'OUTIL AU CAS DES MILIEUX URBAINS DE MADAGASCAR

## INTRODUCTION

L'outil validé est prévu à simuler une large gamme de scénarii pour lesquels une approche expérimentale in situ s'avèrerait coûteuse en temps et moyens. Dans ce volet d'étude, nous mettons l'accent sur des configurations locales où les quatre types de revêtements de sol sont exposés aux trois principales zones climatiques de Madagascar, à savoir tropicale d'altitude des hauts plateaux, tropicale humide de la côte Est et tropicale sèche de la côte Ouest. C'est dans cette optique que nous nous focalisons sur les sept grands centres urbains de Madagascar, Antananarivo, Antsirabe, Fianarantsoa, Toliara, Toamasina, Mahajanga et Antsiranana. Par ailleurs, pour couvrir les deux saisons nettes que connaît la Grande Ile, les dates du 15 juin et du 15 décembre 2023 ont été sélectionnées pour évaluer la performance de ces pavages. Nous abordons de plus l'étude de l'influence de l'albédo et de la diffusivité thermique sur la température de surface, la température de l'air et la température physiologique équivalente.

### IX.1. SIMULATION DANS LES TROIS GRANDES ZONES CLIMATIQUES DE MADAGASCAR

Les résultats des simulations sont exploités pour générer les courbes des *figures 124 à 137*. Elles illustrent l'évolution de la température de l'air, la température physiologique équivalente à 1 m au-dessus de chaque type de pavage, ainsi que l'intensité de l'îlot de chaleur urbain.

#### IX.1.1. Température de l'air à 1 m

Quels que soient les cas de figures, les températures les plus faibles émanent des PTC. L'écart par rapport aux PB s'avère relativement faible. Les températures d'air générées par les PDP et les PT sont similaires et plus élevées. On retrouve ainsi, à travers leurs comportements thermiques, la catégorisation en deux groupes des quatre pavés, actée dans le volet expérimental. Ces températures de l'air se répercutent avec la température physiologique équivalente (Cf. ANNEXE 13).

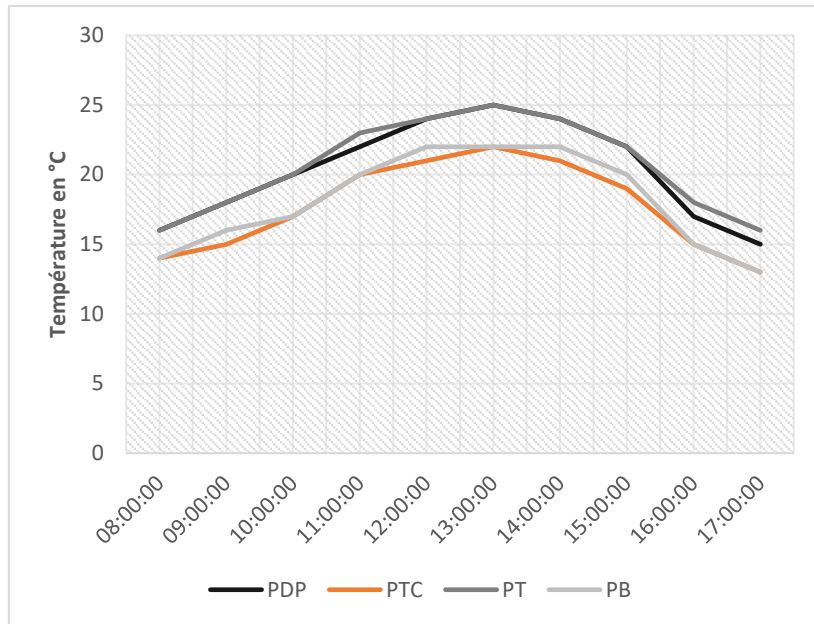


Figure 124: Évolution de températures de l'air prédites dans un espace public dans la ville d'Antananarivo le 15 juin 2023

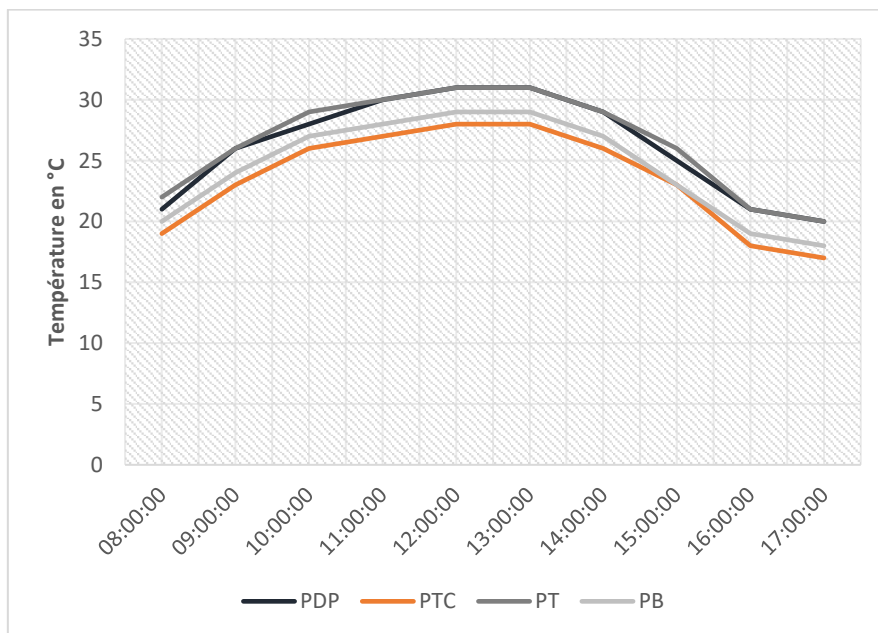


Figure 125: Évolution de températures de l'air prédites dans un espace public de la ville d'Antananarivo pendant la journée de 15 décembre 2023

Tableau 28: Températures de l'air maximales et minimales dans un espace public de la ville d'Antananarivo

Groupe	Température minimale (°C)		Température maximale (°C)		Écart relatif entre les températures maximales
	Hiver	Été	Hiver	Été	
G1	13	17	24	30	20%
G2	16	20	22	28	21%

Les plages horaires de valeurs maximales se situent entre 12 h 00 et 14 h 00. Les écarts relatifs entre les deux saisons sont notables, environ 20 % quels que soient les groupes.

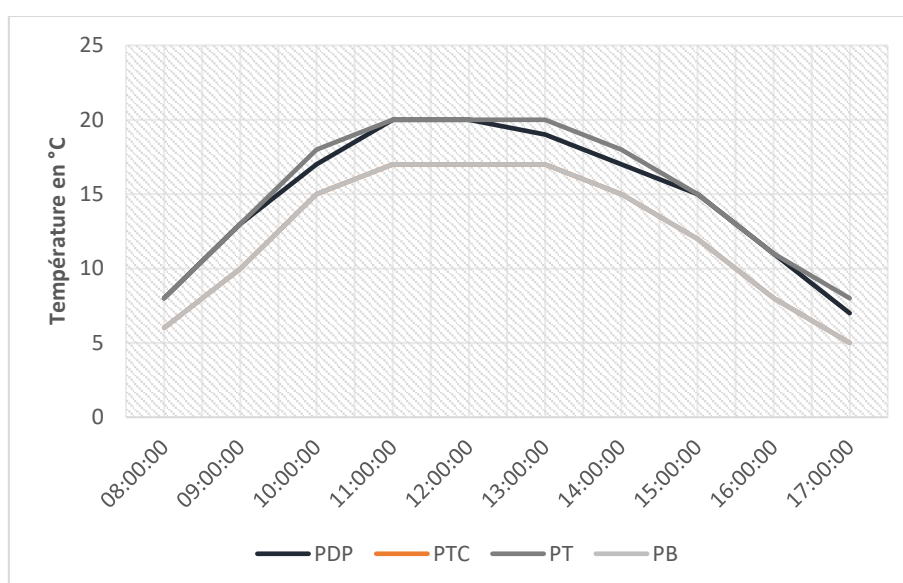


Figure 126: Évolution de températures de l'air prédites dans un espace public de la ville d'Antsirabe pendant la journée de 15 juin 2023

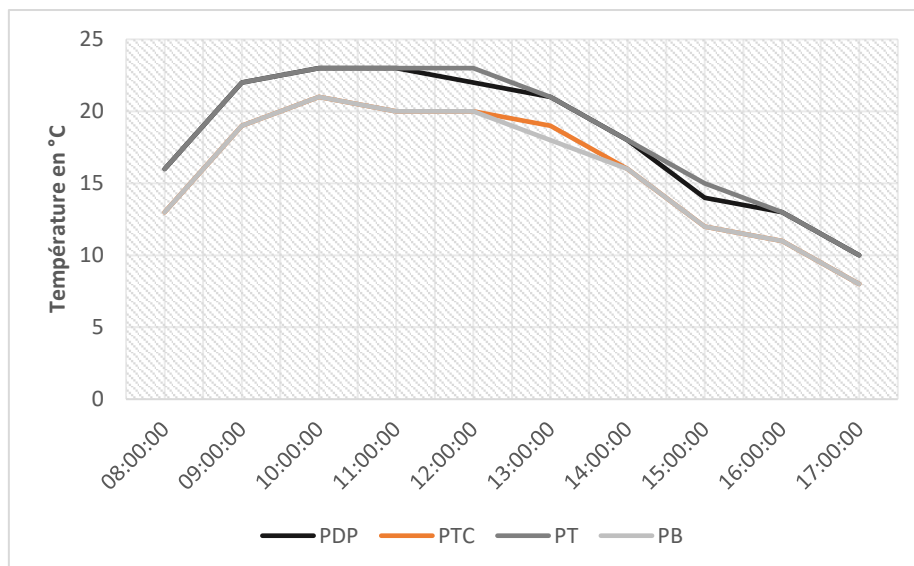


Figure 127: Évolution de températures de l'air prédites dans un espace public de la ville d'Antsirabe pendant la journée de 15 décembre 2023

Tableau 29: Températures de l'air maximales et minimales dans un espace public de la ville d'Antsirabe

Groupe	Température minimale (°C)		Température maximale (°C)		Écart relatif entre les températures maximales
	Hiver	Été	Hiver	Été	
G1	8	10	20	23	13%
G2	5	8	17	20	15%

La température maximale n'excède pas 23 °C en hiver. Cette valeur est enregistrée au cours de 11 h 00 à 13 h 00. En été, elle tourne autour de 20 °C dans l'intervalle [10 h 00, 12 h 00]. L'écart relatif de G1 est inférieur à celui de G2.

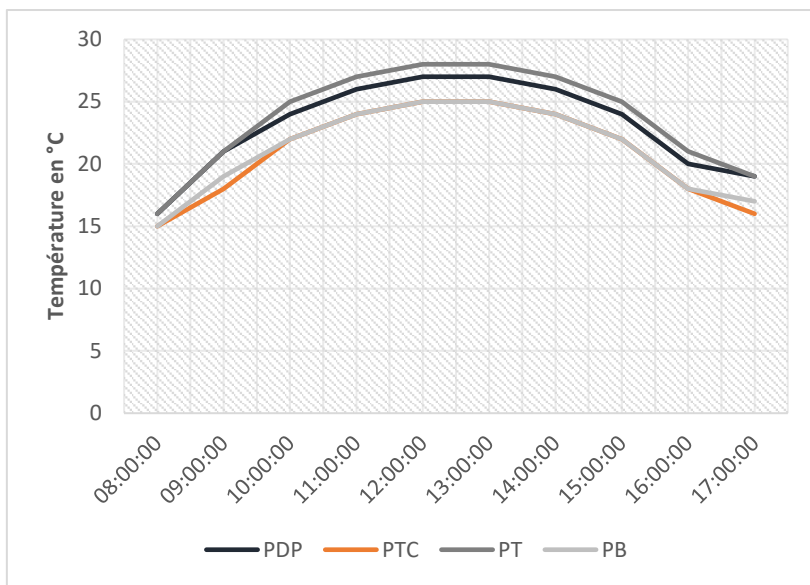


Figure 128: Évolution de températures de l'air prédites dans un espace public de la ville de Fianarantsoa pendant la journée de 15 juin 2023

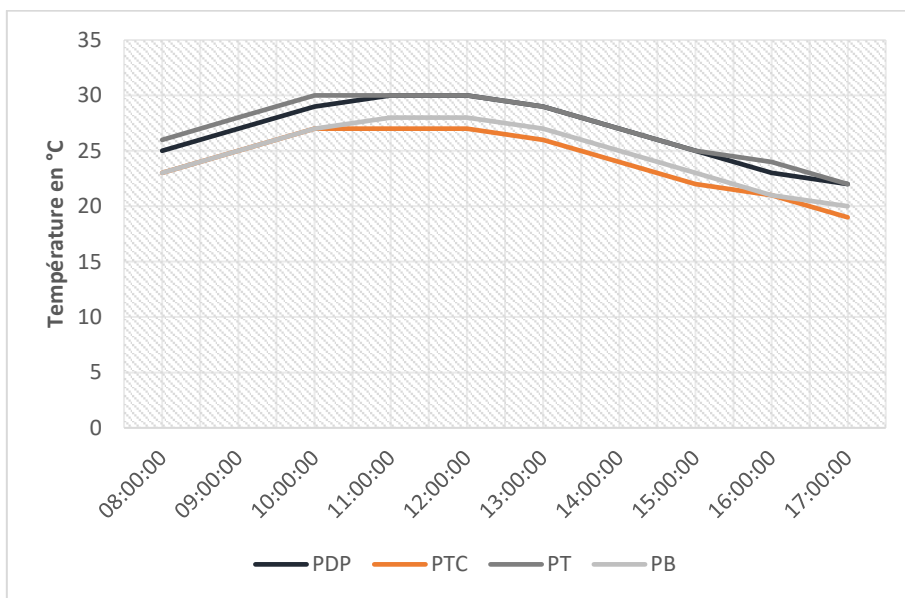


Figure 129: Évolution de températures de l'air prédites dans un espace public de la ville de Fianarantsoa pendant la journée de 15 décembre 2023

Tableau 30: Températures de l'air maximales et minimales dans un espace public de la ville de Fianarantsoa

Groupe	Température minimale (°C)		Température maximale (°C)		Écart relatif entre les températures maximales
	Hiver	Été	Hiver	Été	
G1	16	22	28	30	7%
G2	15	19	25	27	7%

Pour la ville de Fianarantsoa, l'écart relatif entre la température maximale estivale et hivernale est identique pour les deux groupes. Ces températures sont relevées entre les plages horaires de [12 h 00, 13 h 00] en hiver et [10 h 00, 12 h 00] en été.



Figure 130: Évolution de températures de l'air prédites dans un espace public de la ville de Toliara pendant la journée de 15 juin 2023

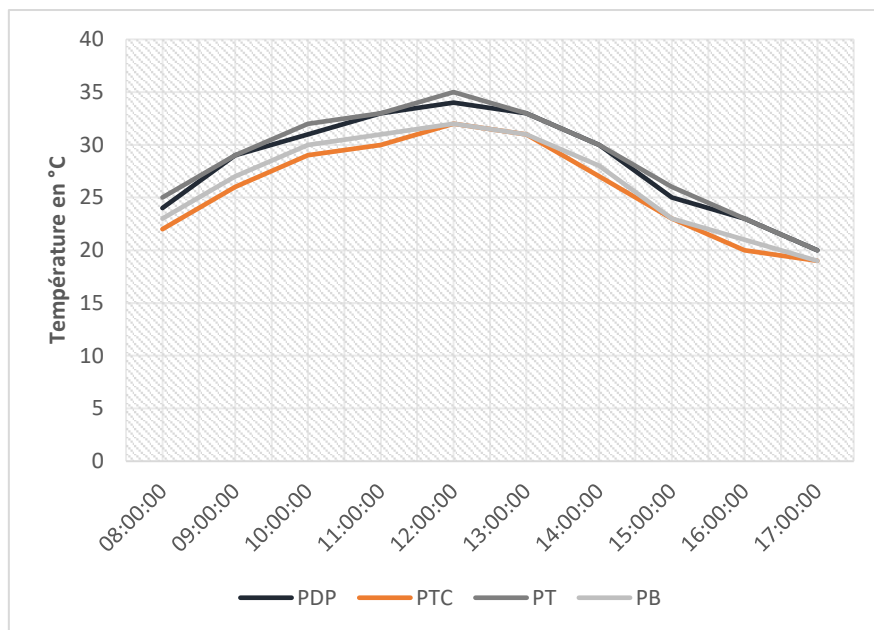


Figure 131: Évolution de températures de l'air prédites dans un espace public de la ville de Toliara pendant la journée de 15 décembre 2023

Tableau 31: Températures de l'air maximales et minimales dans un espace public de la ville de Toliara

Groupe	Température minimale (°C)		Température maximale (°C)		Écart relatif entre les températures maximales
	Hiver	Été	Hiver	Été	
G1	22	20	28	33	16 %
G2	20	19	26	31	15 %

La température maximale hivernale est égale à 33 °C pour G1 tandis que 31 °C pour G2 entre 10 h 00 et 12 h 00. L'écart relatif entre les températures maximales de deux saisons est quasiment identique pour les deux groupes.



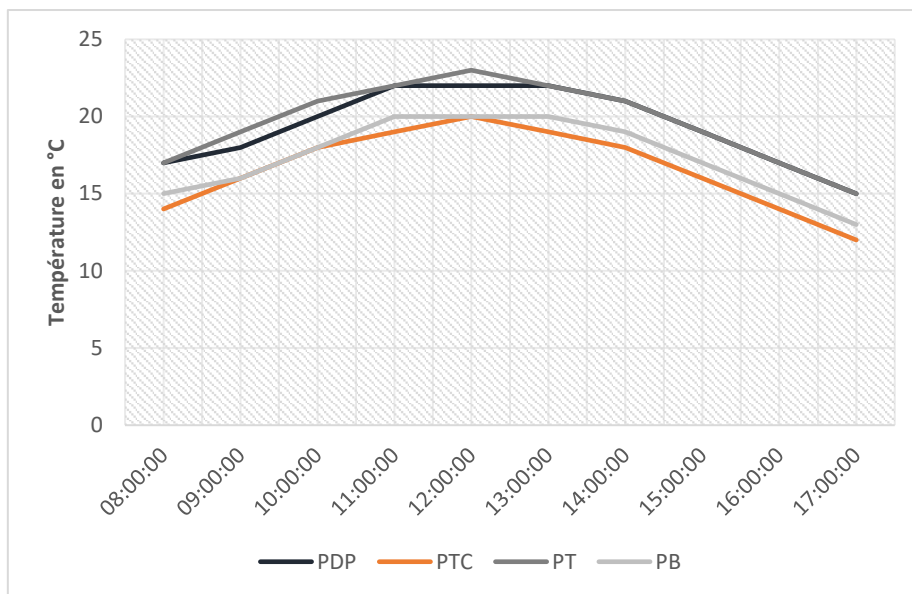


Figure 132: Évolution de températures de l'air prédites dans un espace public de la ville de Toamasina pendant la journée de 15 juin 2023



Figure 133: Évolution de températures de l'air prédites dans un espace public de la ville de Toamasina le 15 décembre 2023

Tableau 32: Évolution de températures de l'air maximales et minimales dans un espace public de la ville de Toamasina

Groupe	Température minimale (°C)		Température maximale (°C)		Écart relatif entre les températures maximales
	Hiver	Été	Hiver	Été	
G1	15	18.5	22	30	27%
G2	12	17	20	26	23%

L'écart relatif le plus élevé est obtenu pour G1. En été, Leur température maximale tourne autour de 30 °C, soit une différence de 4 °C par rapport à celle de G2. Ces valeurs sont enregistrées dans l'intervalle du temps [10 h 00, 12 h 00].

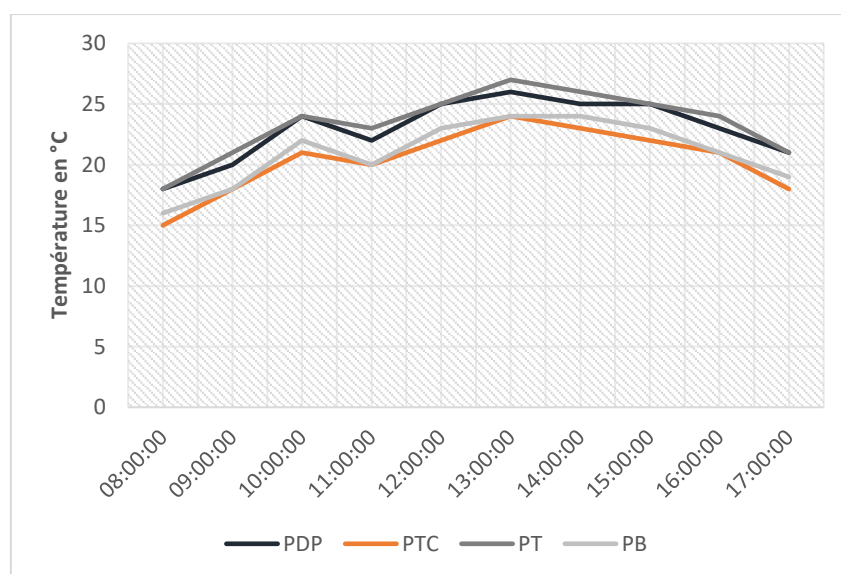


Figure 134: Évolution de températures de l'air prédites dans un espace public de la ville de Mahajanga pendant la journée de 15 juin 2023

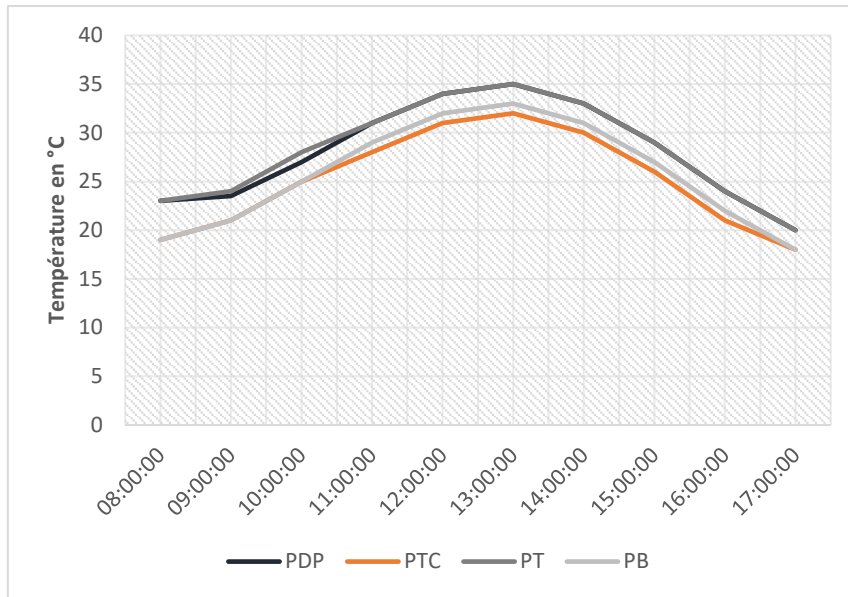


Figure 135: Evolution de températures de l'air prédites dans un espace public de la ville de Mahajanga pendant la journée de 15 décembre 2023

Tableau 33: Températures de l'air maximales et minimales dans un espace public de la ville de Mahajanga

Groupe	Température minimale (°C)		Température maximale (°C)		Écart relatif entre les températures maximales
	Hiver	Été	Hiver	Été	
G1	18	20	25	33	24%
G2	16	18	23	31	26%

Les plages horaires de valeurs maximales se situent entre 12 h 00 et 14 h 00. En été, la température maximale atteint la valeur de 33 °C contre seulement 25 °C en hiver. Il est à noter que les écarts relatifs entre ces deux saisons sont très élevés.

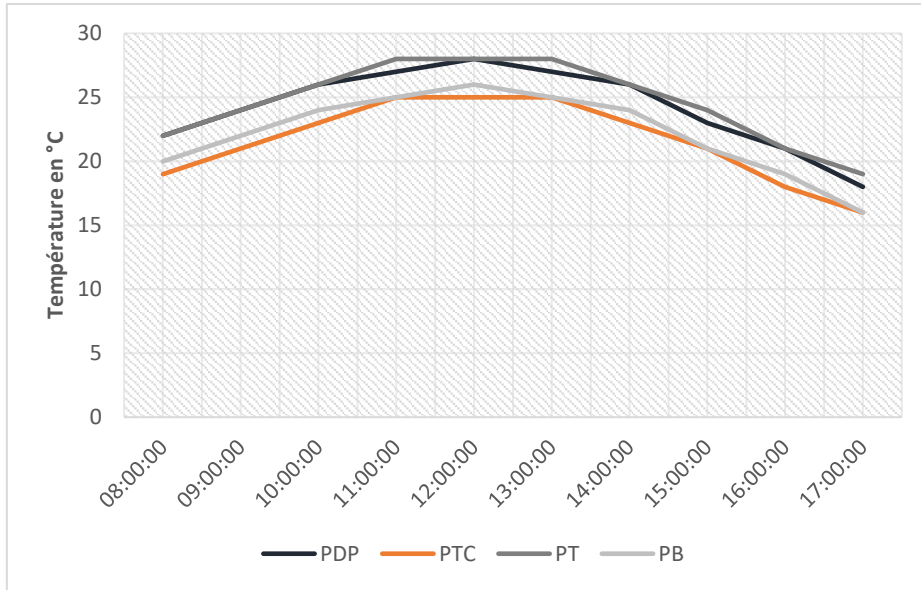


Figure 136: Evolution de températures de l'air prédites dans un espace public de la ville d'Antsirana pendant la journée de 15 juin 2023

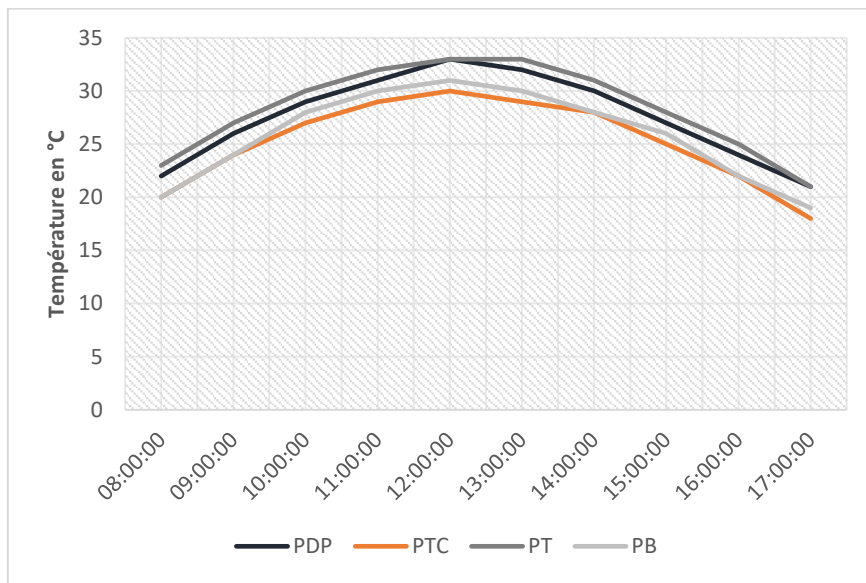


Figure 137: Évolution de températures de l'air prédites dans un espace public de la ville d'Antsirana pendant la journée de 15 décembre 2023

Tableau 34: Températures de l'air maximales et minimales dans un espace public de la ville d'Antsiranana

Groupe	Température minimale (°C)		Température maximale (°C)		Écart relatif entre les températures maximales
	Hiver	Été	Hiver	Été	
G1	19	21	28	31	10%
G2	19	18	25	30	17%

L'écart relatif de G1 est nettement supérieur que celui de G2. La valeur maximale de température tourne autour de l'intervalle du temps de [11 h 00, 13 h 00].

### IX.1.2. Température physiologique équivalente (PET)

L'évaluation de la température physiologique équivalente (PET) et les niveaux de confort thermique correspondants s'appuient sur la relation de l'équation III. 16 et les éléments du tableau 9 du paragraphe III.3.2, du chapitre III. Les données climatiques de 8 h 00 à 17 h 00, soit sur une durée totale de 10 heures, dès 15 juin et 15 décembre 2023, ont été choisies dans la simulation. Comme nous avons fait dans le paragraphe VII.6, les différentes valeurs obtenues ont été compilées pour déterminer les durées des niveaux de confort (Cf. Tableaux 35 à 41).

Tableau 35: Durée journalière du confort dans un espace public de la ville d'Antananarivo

Niveau du confort thermique	Durée journalière (h)							
	PDP		PTC		PT		PB	
	Hiver	Été	Hiver	Été	Hiver	Été	Hiver	Été
Légèrement froid	4	1	6	3	4	1	5	2
Confortable	3	2	4	2	3	2	5	2
Légèrement chaud	3	3	0	5	3	2	0	2
<b>Durée totale</b>	<b>10</b>	<b>6</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>6</b>
Chaud	0	4	0	0	0	5	0	4
Très chaud	0	0	0	0	0	0	0	0

Ce tableau nous montre qu'en hiver, les PTC procurent le meilleur confort thermique pour la ville d'Antananarivo suivi de PB. Le PT et le PDP possèdent la même durée de confort pendant deux journées estivales et hivernales. Ils provoquent de niveau « chaud » en été.

Tableau 36: Durée journalière du confort dans un espace public de la ville d'Antsirabe

Niveau du confort thermique	Durée journalière (h)							
	PDP		PTC		PT		PB	
	Hiver	Été	Hiver	Été	Hiver	Été	Hiver	Été
Froid	4	1	5	3	4	1	5	4
Légèrement froid	4	4	5	3	3	4	5	2
Confortable	2	5	0	4	3	5	0	4
Légèrement chaud	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Durée totale</b>	<b>6</b>	<b>9</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>9</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
Chaud	0	0	0	0	0	0	0	0
Très chaud	0	0	0	0	0	0	0	0

Dans la ville d'Antsirabe, tout le pavage engendre de niveau du confort « Froid » quelles que soient les saisons. Il est remarqué que les PDP et les PT offrent une durée élevée, environ six heures pour une journée d'hiver et neuf heures en été.

Tableau 37: Durée journalière du confort dans un espace public de la ville de Fianarantsoa

Niveau du confort thermique	Durée journalière (h)							
	PDP		PTC		PT		PB	
	Hiver	Été	Hiver	Été	Hiver	Été	Hiver	Été
Légèrement froid	2	1	4	2	2	1	4	2
Confortable	2	1	2	2	2	1	2	1
Légèrement chaud	6	2	4	2	6	2	4	3
<b>Durée totale</b>	<b>10</b>	<b>4</b>	<b>10</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>4</b>	<b>10</b>	<b>6</b>
Chaud	0	6	0	4	0	5	0	4
Très chaud	0	0	0	0	0	1	0	0

Tout le pavage cause une durée de confort quasiment similaire. Nous constatons que les PTC et les PB sont les plus adaptables dans la ville de Fianarantsoa. Il est à noter aussi que les PDP et les PT offrent de niveau confort tolérable.

Tableau 38: Durée journalière du confort dans un espace public de la ville de Toliara

Niveau du confort thermique	Durée journalière (h)							
	PDP		PTC		PT		PB	
	Hiver	Été	Hiver	Été	Hiver	Été	Hiver	Été
Légèrement froid	1	0	3	1	1	0	2	1
Confortable	3	2	2	3	3	1	2	3
Légèrement chaud	2	4	5	6	1	5	5	6
<b>Durée totale</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
Chaud	4	4	0	0	5	4	1	0
Très chaud	0	0	0	0	0	0	0	0

Pour la ville de Toliara, le confort thermique le plus significatif est enregistré au niveau de PTC et PB. Les deux autres provoquent de niveau presque « Légèrement chaud ».

Tableau 39: Durée journalière du confort dans un espace public de la ville de Toamasina

Niveau du confort thermique	Durée journalière (h)							
	PDP		PTC		PT		PB	
	Hiver	Été	Hiver	Été	Hiver	Été	Hiver	Été
Légèrement froid	7	2	10	3	7	2	10	3
Confortable	3	2	0	3	3	2	0	3
Légèrement chaud	0	6	0	4	0	6	0	4
<b>Durée totale</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>
Chaud	0	0	0	0	0	0	0	0
Très chaud	0	0	0	0	0	0	0	0

La durée du confort pour chaque pavage est identique pendant les deux journées estivales et hivernales. Nous remarquons que les PT et les PDP constituent les pavages les plus appropriés pour la ville de Toamasina puisqu'ils procurent de niveau « Confortable » durant cinq heures pour ces mêmes périodes. Les PTC et les PB n'engendrent que trois heures.



Tableau 40: Durée journalière du confort dans un espace public de la ville de Mahajanga

Niveau du confort thermique	Durée journalière (h)							
	PDP		PTC		PT		PB	
	Hiver	Été	Hiver	Été	Hiver	Été	Hiver	Été
Légèrement froid	3	2	4	2	3	2	4	2
Confortable	3	1	5	2	2	0	5	2
Légèrement chaud	4	2	1	2	5	3	1	2
<b>Durée totale</b>	<b>10</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>6</b>	<b>10</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>6</b>
Chaud	0	3	0	4	0	3	0	4
Très chaud	0	2	0	0	0	2	0	0

Les PB et les PTC offrent de meilleurs confort pour la ville de Mahajanga. En été, les PDP et les PT provoquent de niveau du confort « Très chaud » pendant deux heures.

Tableau 41: Durée journalière du confort dans un espace public de la ville d'Antsiranana

Niveau du confort thermique	Durée journalière (h)							
	PDP		PTC		PT		PB	
	Hiver	Été	Hiver	Été	Hiver	Été	Hiver	Été
Légèrement froid	8	3	10	4	8	3	10	4
Confortable	2	2	0	3	2	2	0	3
Légèrement chaud	0	5	0	3	0	5	0	3
<b>Durée totale</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>
Chaud	0	0	0	0	0	0	0	0
Très chaud	0	0	0	0	0	0	0	0

La durée du confort reste la même pendant l'été et l'hiver quels que soient les pavages. Il est observé que les PDP et les PT sont les plus habitués pour la ville d'Antsiranana, car ils causent un niveau « confortable » qui dure quatre heures durant ces périodes.

### IX.1.3. Intensité de l'ICU

L'intensité d'ICU au-dessus de chaque pavage appliqué dans les grandes villes de Madagascar est donnée par le *tableau 42*. Elle représente la différence de température entre le milieu urbain et sa périphérie. Comme nous avons mené dans la partie expérimentale du [paragraphe VII.2](#), l'équation III-12 a été utilisé afin d'obtenir ces valeurs. Plus celles-ci sont élevées, plus ces différences sont remarquables. Pour cet ensemble, nous remarquons qu'elle est quasiment identique pour tout le pavage pendant une même saison.

Tableau 42: Intensité de l'ICU au-dessus de chaque pavage

Ville	Date	Intensité de l'ICU (°C)			
		PDP	PTC	PT	PB
Antananarivo	15/06/2023	1.26	1.21	1.28	1.22
	15/12/2023	2.02	1.97	2.03	1.99
Antsirabe	15/06/2023	1.54	1.49	1.56	1.49
	15/12/2023	2.00	1.95	2.02	1.95
Fianarantsoa	15/06/2023	1.67	1.62	1.68	1.64
	15/12/2023	2.10	2.05	2.11	2.06
Toliara	15/06/2023	1.63	1.58	1.63	1.45
	15/12/2023	2.95	2.90	2.96	2.91
Toamasina	15/06/2023	1.22	1.17	1.23	1.18
	15/12/2023	2.74	2.69	2.75	2.70
Mahajanga	15/06/2023	0.94	0.89	0.95	0.91
	15/12/2023	1.05	1.00	1.07	1.02
Antsiranana	15/06/2023	0.34	0.39	0.32	0.38
	15/12/2023	0.58	0.53	0.60	0.54

Nous constatons que l'intensité de l'îlot de chaleur en été est supérieure à celle de l'hiver. Pour Antananarivo, elle atteint plus de 2 °C en été. La valeur la plus élevée est enregistrée dans la ville de Toliara, touchant le 3 °C. La valeur minimale est observée à Antsiranana. Cela peut s'expliquer par le fait que les vitesses du vent dans cette ville sont élevées, qui tourne autour de [4.41 m/s, 7.01 m/s]. Ceci favorise les pertes de chaleur par convection. Nous remarquons que les écarts entre l'intensité d'ICU au-dessus de chaque pavage sont faibles pour une même journée.

## IX.2. INFLUENCE DE L'ALBÉDO SUR LA TEMPÉRATURE DIURNE ET L'INTENSITE DE L'ICU

Dans la suite de notre étude, nous avons augmenté l'albédo de pavages précédemment analysés afin d'évaluer leur impact sur la température et le confort thermique. Plusieurs techniques existent pour atteindre cet objectif : incorporation de pigments dans le matériau conduisant à des colorations ou d'appliquer un revêtement rafraîchissant à la surface (Cf. [Paragraphe IV.1.1](#)). Dans sa revue, [Santamouris \(2013\)](#) a également suggéré plusieurs autres méthodes. Il est important de noter que la modification de l'albédo n'affecte pas les autres propriétés thermiques ([Synnefa et al., 2008](#)). Deux scénarios distincts ont été examinés pendant la simulation. Le premier scénario correspond à la valeur d'albédo mesurée lors de l'expérimentation. Dans le deuxième, nous avons augmenté cette valeur de 70 % (Cf. [Tableau 43](#)). Les résultats précédents montrent que Toliara engendre l'intensité d'ICU la plus significative. Ainsi, nous avons sélectionné cette ville afin d'étudier l'influence de l'albédo pendant la journée de 10 décembre 2023.

Tableau 43: Différentes valeurs d'albédo destinées à la simulation

Pavage	Albédo	
	Scénario 1	Scénario 2
PDP	0.09	0.15
PTC	0.22	0.37
PT	0.14	0.24
PB	0.26	0.44

### IX.2.1. Température de surface

Les figures 138 à 141 représentent les températures de surface de chaque pavage pour différentes valeurs d'albédo. Il est observé que ces deux grandeurs sont inversement proportionnelles durant toute la journée. Avec une augmentation relative de l'albédo de 70%, les températures de surface des PDP, PTC, PT et PB sont atténués respectivement de 5 %, 10 %, 6 % et 16 %.

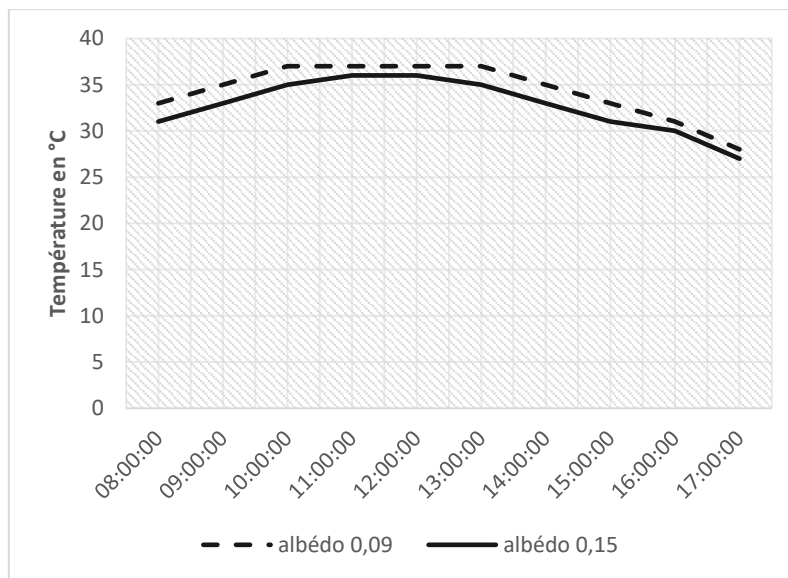


Figure 138: Variation de températures de surface de PDP pour différentes valeurs d'albédo

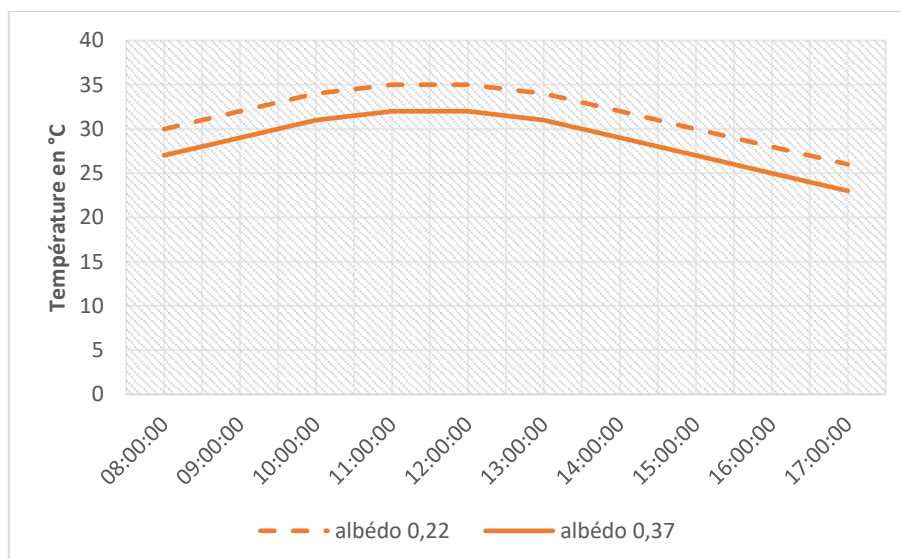


Figure 139 : Températures de surface de PTC pour différentes valeurs d'albédo pour une journée d'été

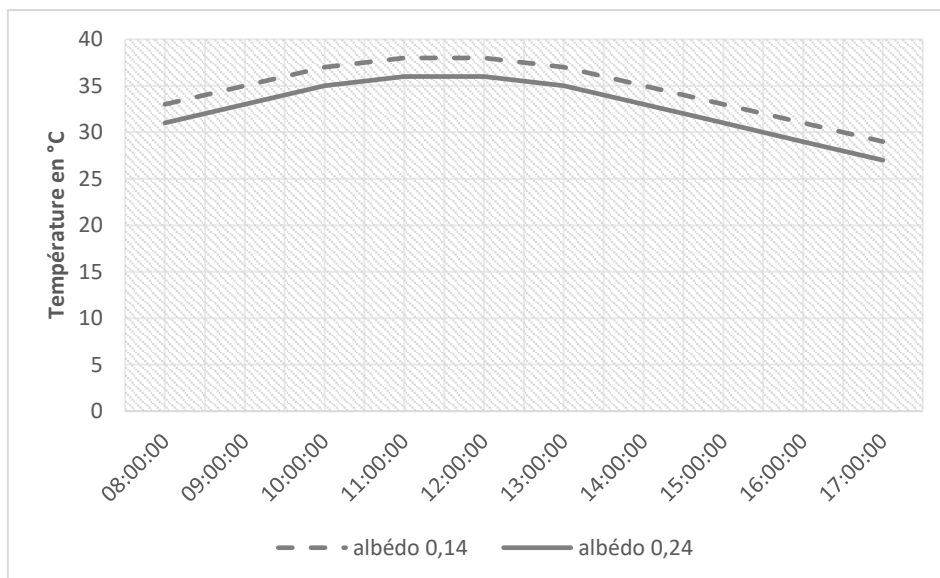


Figure 140 : Variation de températures de surface de PT pour différentes valeurs d'albédo

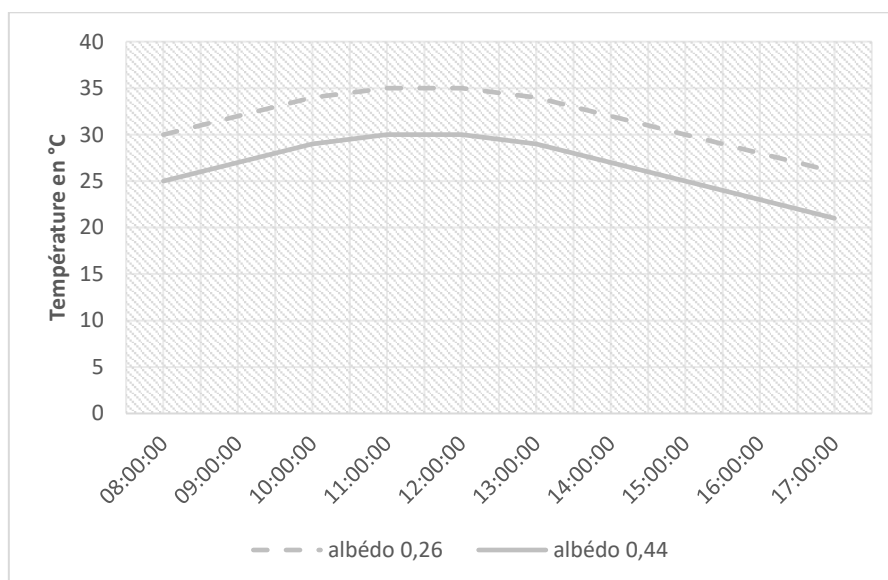


Figure 141: Variation de températures de surface de PB pour différentes valeurs d'albédo

### IX.2.2. Température de l'air à 1 m

L'importance de la température de l'air à un mètre au-dessus de pavés réside dans le fait qu'elle permet d'estimer le confort thermique. Les résultats de la simulation obtenus par l'application de deux valeurs d'albédo nous a permis d'établir les figures 142 à 145. Il est remarqué que la température de l'air au-dessus de chaque pavé prend la même allure que celle de leur température de surface. En évaluant la moyenne de l'écart relatif entre les températures de l'air correspondant à différentes valeurs d'albédo, nous constatons que les PB possèdent l'écart relatif le plus élevé, environ 18% contre 11 % pour les PTC, 7 % pour le PT et 5 % pour les PDP.

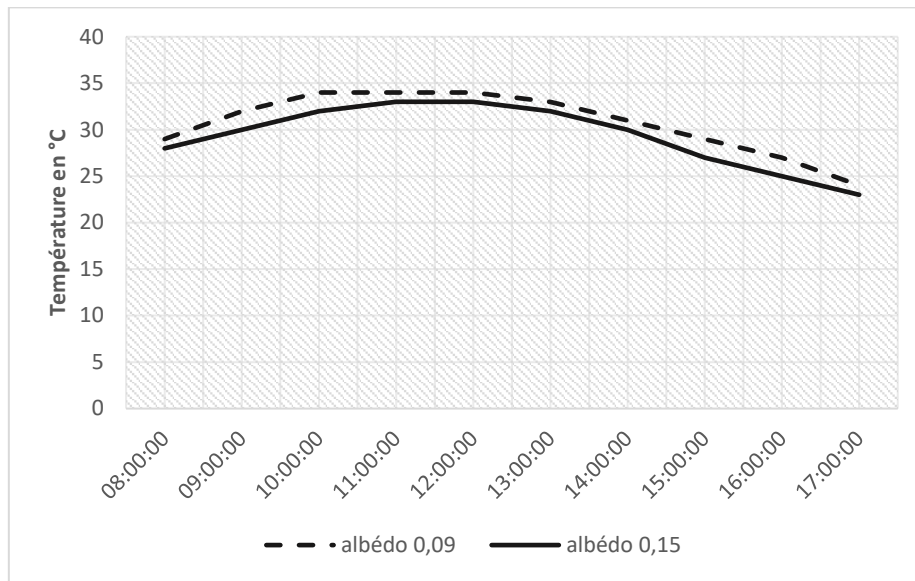


Figure 142: Évolution de températures de l'air à 1 m au-dessus de la surface de PDP pour différentes valeurs d'albédo

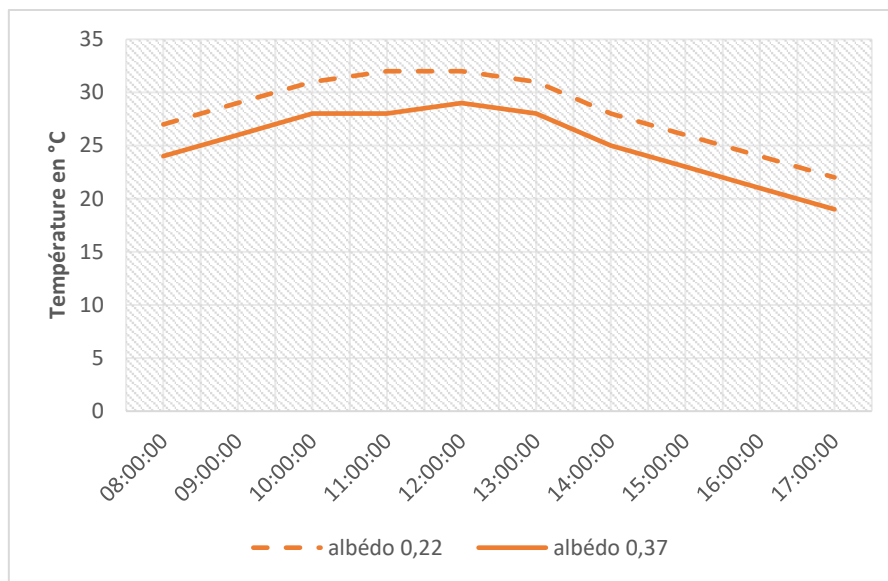


Figure 143: Évolution de températures de l'air à 1 m au-dessus de la surface de PTC pour différentes valeurs d'albédo

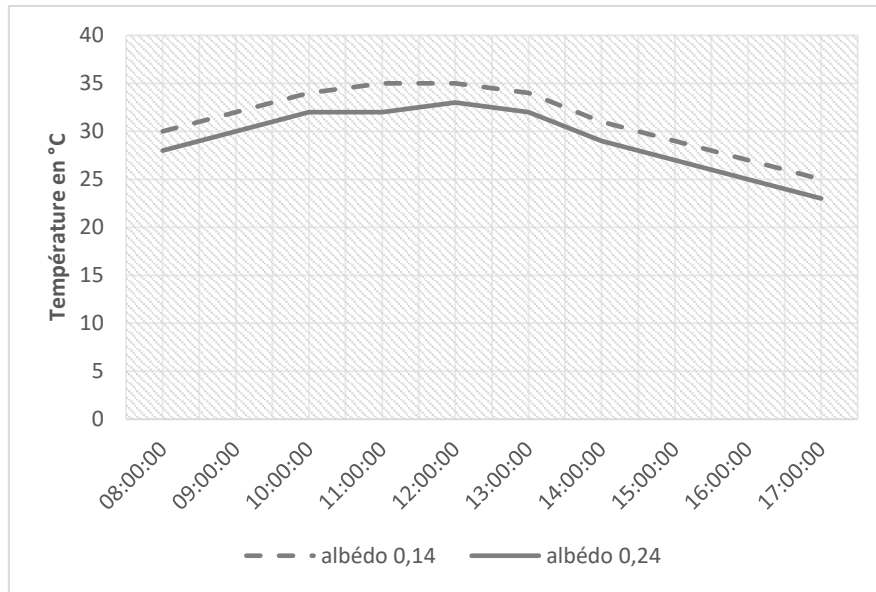


Figure 144: Évolution de températures de l'air à 1 m au-dessus de la surface de PT pour différentes valeurs d'albédo

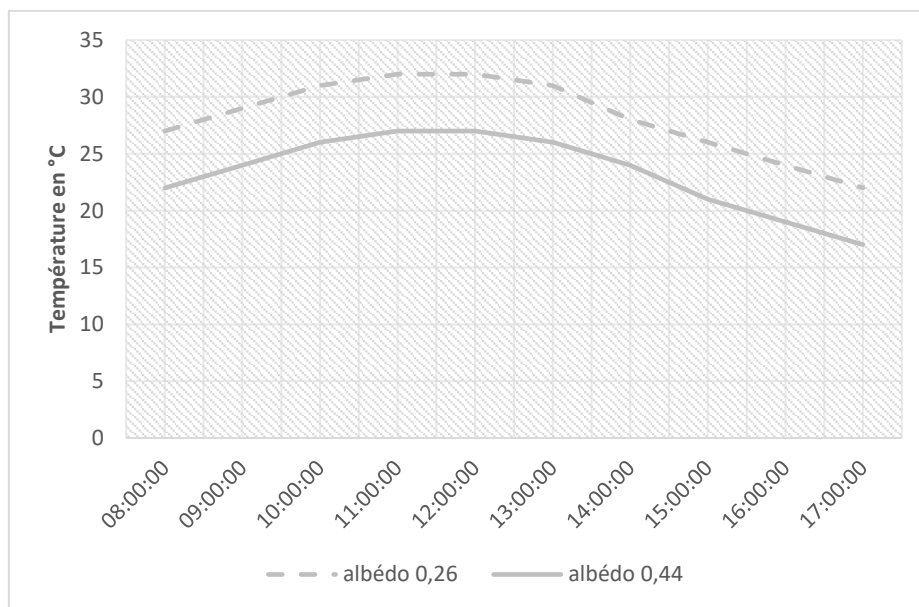


Figure 145: Températures de l'air à 1 m au-dessus de la surface de PB pour différentes valeurs d'albédo

### IX.2.3. Température physiologique équivalente

Le *tableau 44* suivant donne la durée du confort pour chaque type de pavage après l'augmentation de son albédo. Nous constatons que le confort dure plus longtemps lorsque l'albédo est plus élevé. Ce fait est très significatif pour le confort au niveau de PTC et PB.

Tableau 44: Durée du confort selon l'augmentation de l'albédo de chaque pavage

Albédo Niveau du confort	Durée journalière (h)							
	PDP		PTC		PT		PB	
	0.09	0.15	0.22	0.37	0.14	0.24	0.26	0.44
Légèrement froid	0	0	0	0	0	0	0	1
Confortable	0	0	1	4	0	1	1	3
Légèrement chaud	3	4	5	6	3	4	5	6
<b>Durée totale</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>10</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>9</b>
Chaud	7	6	4	0	7	5	4	0
Très chaud	0	0	0	0	0	0	0	0

### IX.2.4. Intensité de l'îlot de chaleur

Le fait d'augmenter l'albédo de 70 % diminue l'intensité de l'îlot de chaleur urbain plus de 16% (Cf. *tableau 45*).

Tableau 45: Différentes valeurs d'intensité de l'ICU et albédo

Pavage	Albédo	Intensité d'ICU (°C)
PDP	0.09	3.03
	0.15	2.50
PTC	0.22	2.98
	0.37	2.50
PT	0.14	3.04
	0.24	2.50
PB	0.26	2.98
	0.44	2.38



### IX.3. INFLUENCE DE PROPRIETES THERMIQUES DE PAVAGES SUR LA TEMPÉRATURE DE SURFACE DIURNE

Pour ce qui est l'étude de l'influence des propriétés thermiques, à savoir la diffusivité thermique, la conductivité thermique ainsi que la masse volumique, nous nous cantonnons dans les limites de valeurs de la littérature pour les matériaux béton et argile cuite. Les valeurs maximales et minimales de ces deux dernières propriétés sont données par le *tableau 46*. Nous retenons les hypothèses que la chaleur massique et l'albédo de nos pavages restent constants. Les différentes méthodes pour modifier la conductivité thermique de pavage ont été développées dans la revue de [Santamouris \(2013\)](#). Ces deux propriétés peuvent varier en fonction de plusieurs facteurs, tels que la composition exacte de matières premières, la porosité et la présence d'additifs.

Tableau 46: Limites de valeurs de propriétés thermiques ([David R., 2010](#), [Tina, 2013](#), [Baran et al, 2014](#))

Matériau	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )		Conductivité thermique (W/m K)		Diffusivité thermique (m <sup>2</sup> /s)×10 <sup>-7</sup>		Écart a <sub>max</sub> et a <sub>min</sub>
	Min	Max	Min	Max	a <sub>min</sub>	a <sub>max</sub>	
Argile cuite	1800	2200	0.50	1.50	3.02	7.41	59 %
Béton	2000	2500	1.00	2.00	5.56	8.89	38 %

Pour la plupart des matériaux minéraux, la conductivité thermique augmente avec la masse volumique ([David R., 2010](#)). Dans le cadre des simulations, nous maintenons la capacité thermique massique déduite des expérimentations pour chaque type de pavage. En retenant les deux valeurs extrêmes des conductivités thermiques et les masses volumiques correspondantes relevées dans la littérature, c'est l'influence de la diffusivité thermique que l'étude met en exergue :

$$a = \frac{\lambda}{\rho C_p}$$

Ainsi, les couples de valeurs de diffusivité thermique diffèrent suivant le matériau (Cf. *Tableau 46*). Les *figures 146 et 147* représentent la variation journalière de températures de surface diurne dans un espace public de la ville de Toliara le 15 décembre 2023.

Pour cet ensemble, la température de surface augmente avec la valeur de la diffusivité thermique. Des écarts relatifs de diffusivité thermique élevés dans le cas des PB, 38 %, n'induisent que de faible écart au niveau des températures de surface, 1.4 %. En revanche, un écart relatif de 59 % pour le cas de PTC diminue cette température de 2 %.



Figure 146: Variation de températures de surface de PTC pour différentes valeurs de diffusivité thermique pendant une journée d'été

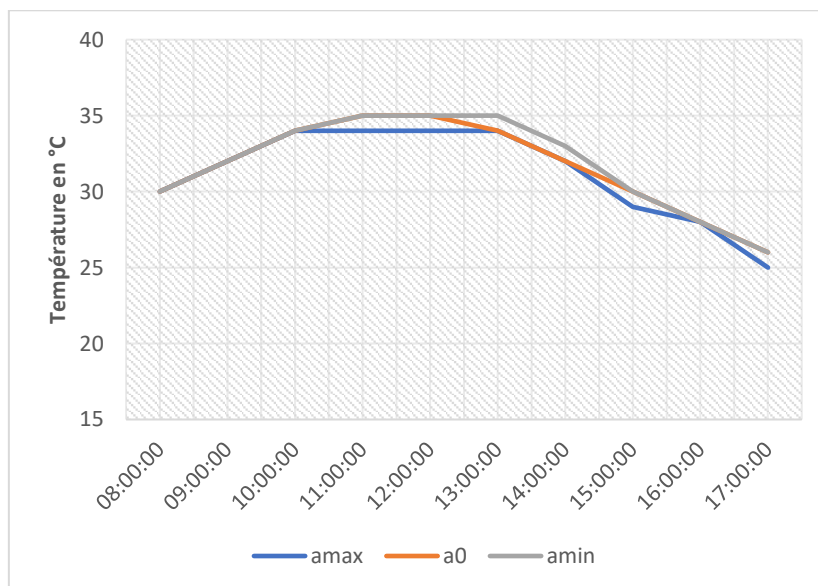


Figure 147: : Variation de températures de surface de PB pour différentes valeurs de diffusivité thermique pendant une journée d'été

## CONCLUSION

Ce chapitre se focalise sur l'application de l'outil au cas des sept grands centres urbains de Madagascar. Cet outil a pour but de prédire la température de surface et la température de l'air, la température physiologique équivalente et l'intensité de l'ICU suivant les conditions des trois principales zones climatiques. Le confort thermique a été évalué en utilisant l'indice PET. Nous avons enregistré pour la ville de Toliara et Mahajanga que les pavés de béton et les pavés en terre cuite sont les mieux indiqués. En revanche, les pavés de déchets plastiques et les pavés de travertin conviennent pour la ville de Toamasina et la ville d'Antsiranana ainsi que la ville d'Antsirabe. Tous les pavés présentent la même performance pour la ville de d'Antananarivo et de Fianarantsoa. Les différentes valeurs de l'intensité de l'ICU illustrent que la température de l'air dans les grandes villes est supérieure à celle de milieu environnant. L'ICU est plus prononcé dans la ville de Toliara. Nous avons constaté que l'augmentation de l'albédo est une solution pour réduire ce problème. Une augmentation de l'albédo de 70 % diminue la température de surface avec un écart relatif de 5 % pour les pavés de déchets plastiques, 11 % pour les pavés en terre cuite, 7 % pour les pavés de travertin et 16 % pour les pavés de béton. Il est important de noter que la durée du confort quotidienne est doublée et l'intensité de l'îlot de chaleur baisse de 16 %. La diminution de la diffusivité thermique permet également de réduire la température, mais avec de faible écart.

# CONCLUSION GÉNÉRALE

La minéralisation généralisée des zones urbaines en remplaçant les végétations et les zones humides par du béton, de l'asphalte et du pavage développe au niveau des villes des problèmes liés au phénomène d'îlot de chaleur telle une augmentation de la température de l'espace public. Il est possible de réduire l'effet d'îlot de chaleur urbain attribué aux revêtements de sol en ayant recours à diverses techniques pour augmenter leur pouvoir réfléchissant. L'objectif principal de cette thèse est d'identifier les matériaux de revêtements de sol utilisés dans les espaces publics en milieu urbain, matériaux qui assurent par leurs caractéristiques thermiques de meilleur confort thermique en milieu extérieur et de faibles impacts sur le climat urbain à micro-échelle. Cette recherche s'est établie en deux parties principales : les théories et les expérimentations. Le préambule de ce travail est consacré majoritairement à la bibliographie qui a permis de dresser un panorama à travers la présentation des connaissances théoriques relatives aux divers phénomènes liés au comportement thermique de revêtements de sol. Les différentes propriétés de ces derniers ont été étudiées. Différentes études scientifiques réalisées à travers le monde ont été présentées dont la totalité s'accordent à caractériser l'impact de revêtements de sol sur l'amélioration des conditions de confort extérieurs. Les éléments de climatologie et leurs caractéristiques ont été définis également.

Les travaux expérimentaux réalisés au niveau d'un site dans la ville d'Antananarivo consistent à des campagnes de mesures sur terrain à l'échelle micro. Avant cette analyse, les propriétés thermiques et radiatives de pavages ont été mesurées. Les données collectées pendant les expérimentations ont été utilisées pour le développement de modèle mathématique. Ce dernier établit une relation entre les propriétés thermiques de matériaux et les conditions climatiques du site. Il est utilisé dans la conception de l'outil de simulation. Cet outil a pour mission de tester la performance thermique de ces pavages dans grandes villes de Madagascar. Il sert aussi pour l'évaluation de l'influence de l'albédo sur le confort de l'espace public et sur la formation de l'îlot de chaleur urbain. Les résultats de recherches bibliographiques et expérimentales permettent de nous affirmer que les revêtements de sol extérieurs jouent un rôle important dans la formation de l'ICU. Leurs propriétés thermiques influencent la température de l'air et l'humidité relative à micro-échelle.

Pour la mesure de propriétés thermiques de pavages, nous avons conçu un dispositif. De programme a été développé sous MATLAB pour traiter les données expérimentales enregistrées par ce dernier afin d'estimer les différents paramètres. La valeur relevée de la conductivité thermique permet de nous énoncer que les pavés de travertin possèdent la valeur

la plus élevée et celle de pavés de déchets plastiques sont la plus faible. Les résultats montrent que les valeurs de la conductivité thermique estimée à partir de modèle « quadripôle » sont supérieures à celles de la norme ISO 8894–2. Le logiciel Mesurim 2 a été utilisé pour déterminer l'albédo de pavages. Les résultats montrent que les pavés de béton sont le pavage le plus réfléchissant tandis que les pavés de déchets plastiques sont le plus absorbant.

Pendant l'expérimentation in situ, différents capteurs commandés par Arduino ont été utilisés pour relever les différents paramètres. Les résultats expérimentaux ont été analysés afin d'analyser l'influence de ces derniers sur la variation de températures. L'écart relatif entre la température de surface et la température de l'air le plus élevé est enregistré pour les pavés de déchets plastiques, tandis que le plus faible est relevé pour les pavés de béton. Les résultats montrent que la température de l'air croît lorsque le rayonnement augmente et elle baisse lorsque la vitesse du vent et l'humidité relative s'élèvent. Les différents résultats rassemblés affirment que l'ordre de pavages le plus performant dans notre zone d'étude est les pavés en terre cuite, les pavés de béton, les pavés de déchets plastiques et les pavés de travertin.

L'outil développé permet de prédire la température de surface et la température de l'air, l'indice de confort PET ainsi que l'intensité de l'ICU. Les données à entrer rassemblent les conditions climatiques dans le site d'étude ainsi que les propriétés thermiques de matériaux à étudier. L'analyse de sensibilité réduite du modèle permet d'énoncer que l'albédo constitue le paramètre le plus influent au changement de températures. Une comparaison entre les résultats de la simulation et ceux de l'expérimentation a été effectuée afin de valider cet outil. L'écart relatif obtenu est inférieur de 10 %.

Une simulation dans les zones climatiques de Madagascar a été effectuée. Nous avons enregistré que les pavés de béton et les pavés en terre cuite sont les pavages les mieux indiqués pour la ville de Toliara et Mahajanga. En revanche, les pavés de déchets plastiques et les pavés de travertin conviennent pour la ville de Toamasina et Antsiranana ainsi que la ville d'Antsirabe. Tous les pavés présentent la même performance pour la ville de d'Antananarivo et de Fianarantsoa. Nous avons remarqué que la température de l'air dans les grandes villes est supérieure à celle de leur milieu environnant. L'Ilot de Chaleur Urbain est plus prononcé dans la ville de Toliara. L'étude montre qu'une augmentation de l'albédo de pavages de 70 % diminue la température de 5 % pour les pavés de déchets plastiques, 11 % pour les pavés en terre cuite, 7 % pour les pavés de travertin et 16 % pour les pavés de béton. Il est important de noter que la durée journalière du confort est doublée et l'intensité de l'îlot de chaleur baisse de 16 %. La diminution de la diffusivité thermique permet également de réduire la température, mais avec de faible écart.

L'intérêt de la présente étude réside dans le fait que les expérimentations menées in situ et la mise en œuvre d'un outil pour la simulation. En effet, pour compléter notre travail, il serait pertinent d'inclure une étude nocturne pour examiner les variations de température pendant la nuit.

# LISTE DES PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

Ces travaux de thèse procurent des productions scientifiques qui ont été soumises à des « reviewers » lors de colloques.

## Les articles scientifiques

**Pierre Bénilde RANDRIAMANAMPISOA**, Bienvenue RAHELIARILALAO. Etude des comportements thermiques de revêtements du sol exposés au rayonnement solaire. Journées scientifiques de l'ESPA, 23 et 24 septembre 2020.

**P. RANDRIAMANAMPISOA**, B. RAHELIARILALAO. Estimation du potentiel solaire d'Ambositra. Journées de recherche des ISTs et leurs partenaires internationaux 5, 6 et 7 octobre 2021, Ambositra.

## Les communications scientifiques

**P. B. Randriamanampisoa**, R.K. Raherinjakanirina, B. Raheliarilalao. Mesure de l'albédo de revêtements de sol par analyse numérique d'images. Journées de recherche des ISTs et leurs partenaires internationaux 21, 22, et 23 novembre 2022, Ampefy - ITASY

R.K. Raherinjakanirina, P. B. Randriamanampisoa, B. Raheliarilalao. Détermination et analyse de l'albédo de matériaux utilisés en toiture. Journées de recherche des ISTs et leurs partenaires internationaux 21, 22, et 23 novembre 2022, Ampefy – ITASY

**RECHERCHES  
POUR  
LE DEVELOPPEMENT**

---

---

**Série Sciences      Technologiques**

---

---

**N° 6 - 202 1**

**Antananarivo      - Madagascar**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique**

**ISSN 1025      - 3459**





# ETUDE DES COMPORTEMENTS THERMIQUES DE REVETEMENTS DU SOL EXPOSES AU RAYONNEMENT SOLAIRE

par

RANDRIAMANAMPISOA Pierre Bénilde<sup>(1)</sup>, RAHELIARILALAO Bienvenue<sup>(2)</sup>

(1) Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences, Université d'Antananarivo, Madagascar

(2) Professeur Titulaire, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Madagascar

## RESUME

La minéralisation des espaces urbains et la réduction des espaces verts contribuent à la modification des conditions climatiques dans les villes. L'augmentation de la température pendant la saison chaude est révélatrice de ce phénomène dans les quartiers où des espaces verts sont remplacés par des revêtements du sol. La nature des matériaux utilisés et plus particulièrement, leurs propriétés thermiques radiatives, influencent la variation de la température moyenne radiante. Nos travaux d'investigation portent sur différents revêtements du sol et se focalisent sur leur comportement thermique vis-à-vis du rayonnement solaire. L'objectif de cette étude est d'identifier ceux qui procurent le meilleur confort thermique aux utilisateurs. L'approche méthodologique combine des mesures in situ, des modélisations et des simulations. Les mesures in situ permettent de collecter en même temps les données climatiques de la zone d'étude et la température de surface de divers revêtements et pavés. Les dispositifs utilisés sont une mini station météo et un thermomètre à infra-rouge. Le rayonnement solaire est estimé à partir d'un modèle programmé dans Python. Les résultats indiquent que la température superficielle du béton bitumineux est supérieure à celle du groupe de produits constitués par le pavé travertin, le pavé ajouré et le béton courant. Pour les rayonnements solaires élevés, la différence peut dépasser 15°C. Le béton bitumineux constitue une source d'îlot de chaleur notable pendant la saison chaude.

**Mots clés :** Béton bitumineux, Propriétés physiques, Propriétés thermiques radiatives, Température de surface

## ABSTRACT

The mineralization of urban spaces and the reduction of parks contribute to the modification of climatic conditions in cities. The temperature rise during summertime reveals this phenomenon in neighborhoods where green parks are replaced by pavements. The nature of the used materials and particularly their radiative thermal

properties influence variation of the average radiant temperature. Our investigation concern different types of pavements, and it is focused on their thermal behavior with the solar radiation. The purpose of this study consists in identifying those which give the best thermal comfort to the users. The methodological approach combines in situ experiments, modeling and simulations. In situ measurements provide at the same time climatic data in the area under study and surface temperature of coatings and pavements. A weather station and an infrared thermometer were used to carry out the investigations. The solar radiation is estimated from a model programmed in Python. The results indicate that the surface temperature of asphalt concrete pavement is higher than that of travertin paver product group, previous paver, and concrete. For high solar irradiation, the difference can exceed 15°C. The asphalt concrete is a significant heat island source during summertime.

**Key words :** Asphalt concrete, Physical properties, Radiative thermal properties, Surface temperature

## INTRODUCTION

Notre recherche s'inscrit dans le cadre du confort thermique de l'habitat. Les exigences techniques et mécaniques dictent avant tout le choix des matériaux de construction. Et pour arriver à un certain de degré de confort, plusieurs moyens peuvent être mis en œuvre tels l'isolation et/ou l'orientation. En ce qui concerne les places publiques, lieux de rassemblement par excellence et de circulation, les contraintes revêtent d'autres aspects comme l'esthétique. Le confort thermique de l'individu est occulté. Selon leurs propriétés thermiques, en milieu urbain, les matériaux utilisés peuvent contribuer au développement d'îlots de chaleur. Pour assurer un environnement agréable au niveau d'un espace public ouvert, il faut prendre en considération le climat. Il dépend d'un grand nombre de facteurs tels que la température, l'état hygrométrique de l'air, le vent au voisinage du sol, la nébulosité et l'ensoleillement. Les éléments du climat suscités peuvent être modérés ou amplifiés en fonction des éléments artificiels tels que les matériaux utilisés, la couleur, la texture, la géométrie ainsi que les éléments naturels tel que la végétation. De ce fait, le choix des matériaux pour les revêtements du sol constitue un paramètre très important. Quels sont donc les plus adéquats pouvant donner une meilleure qualité de confort ? Ce travail a pour objectif d'identifier les matériaux utilisés pour les revêtements du sol qui procurent le meilleur confort thermique à l'individu. L'étude consiste à comparer 5 types de revêtements du sol exposés aux conditions climatiques de deux localités de la ville d'Antananarivo, leur influence sur la modification du microclimat dans l'environnement immédiat de la surface pavée. La méthodologie combine des simulations et des expérimentations in situ sur des cellules de mesure.

## MATERIELS ET METHODES

### Sites d'étude

La ville d'Antananarivo se trouve entre 18°54'49'' Sud de latitude et 47°32'10'' Est de longitude. Du point de vue administratif, elle est subdivisée en 6 arrondissements qui totalisent 192 fokontany. Située dans la zone Sud de la région Analamanga, Antananarivo Renivohitra est limitée par les districts d'Ambohidratrimo, Antananarivo Avaradrano et Antananarivo Antsimondrano.

Ce travail est réalisé dans la ville d'Ambohidratrimo et Antananarivo Antsimondrano (Vontovorona) dans des espaces ouverts et en environnement naturel. La figure 1 présente la carte de localisation des zones d'étude.



Figure 1 : Carte de localisation des zones d'étude

### Protocole expérimental

Les expérimentations sont menées sur des sols pavés déjà installés dans ces deux sites. Elles ont été réalisées durant les mois de février et mars 2020. Les pavés sont montés sur les couches de base et jointoyés suivant les techniques propres à chaque structure. Les séries d'expérimentation consistent à suivre l'évolution de la température de leur surface et celle des données climatiques dont la température de l'air ambiant pendant une partie de la journée.

La Figure 2 représente les structures de revêtements retenus pour l'expérimentation.

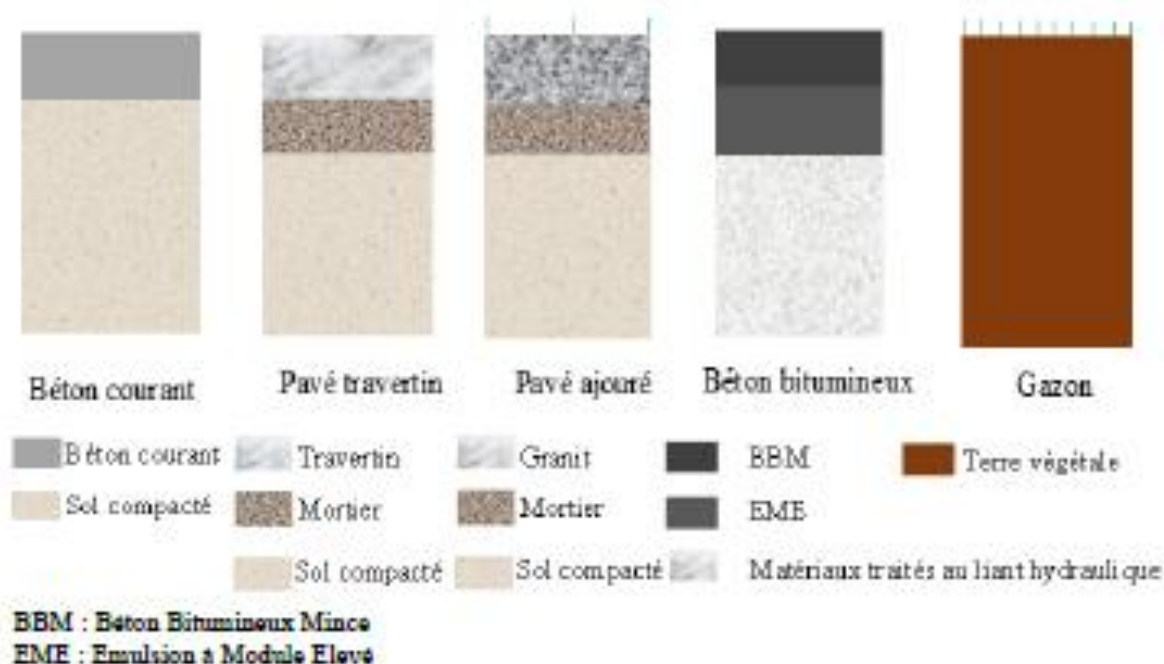


Figure 2 : Structures de revêtements retenus pour l'expérimentation

### Dispositifs expérimentaux

Afin d'étudier la performance thermique de ces revêtements, les températures de surface sont relevées par un thermomètre infrarouge. Les données climatiques sont relevées par une mini-station météo. Ils sont représentés par la Figure 3 et la Figure 4.



Figure 3 : Thermomètre infrarouge

Figure 4 : Mini-station météo

Cet ensemble permet de recevoir et d'afficher :

- La température intérieure et extérieure ;
- Le taux d'humidité ;
- Les prévisions météo (ensoleillé, nuageux, pluvieux, orageux) ;
- La vitesse du vent et sa direction ;
- La hauteur des précipitations ;
- L'indice de UV et de la chaleur.

La Figure 5 montre le thermomètre infrarouge qui capture la température de surface de revêtement du sol.



Figure 5 : Thermomètre infrarouge

La Figure 6 montre la mini station météo installée au-dessus de la surface de revêtement du sol à une hauteur de 1 m.

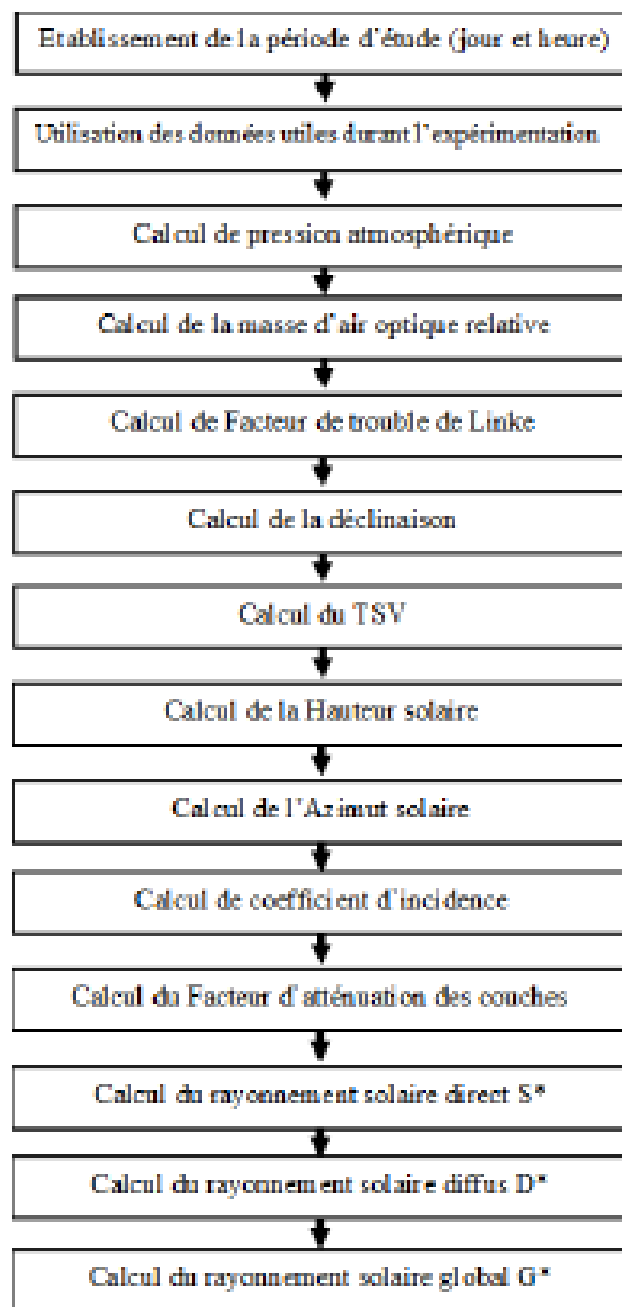


Figure 6 : Installation de mini station météo sur le pavé travertin

### Formules et modèles utilisés

De nombreuses étapes sont nécessaires pour pouvoir estimer le potentiel solaire d'une région. Il s'agit ici d'une estimation. Le modèle le plus fiable est celui de Perrin de Brichambaut (Benlahmidi et *al.*, 2012) et nous l'utilisons pour estimer l'ensoleillement en un temps et un lieu donné.

Selon Yaïche et *al.*, 2010, les différentes étapes de calcul sont représentées par la Figure 7 et les relations utilisées sont intégrées dans le logiciel « solar\_rad » que nous avons programmé.



**Figure 2 : Schéma fonctionnel de calcul de rayonnement selon Perrin de Brichambaut**

### **Outils de collecte de données**

Pour l'enregistrement de données durant l'expérimentation et la simulation de ce travail, nous avons conçu un logiciel nommé «solar\_rad» sous le langage PYTHON.

Ce logiciel permet de calculer l'ensoleillement durant l'expérimentation. La fenêtre de «solar\_rad» après son exécution est représentée sur la Figure 8.

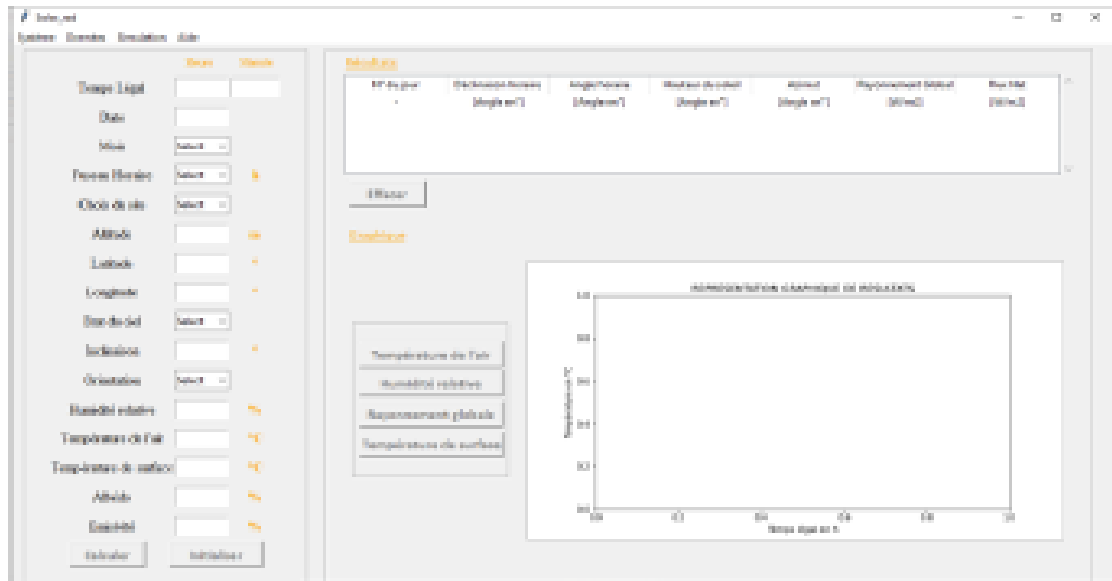


Figure 3 : Fenêtre du logiciel « solar\_rad »

### Outils et technique de traitement des données

Toutes les données climatiques sont insérées dans le logiciel sus cité et les données de simulation sont enregistrées dans un fichier Excel (Figure 9) pour être analysées.

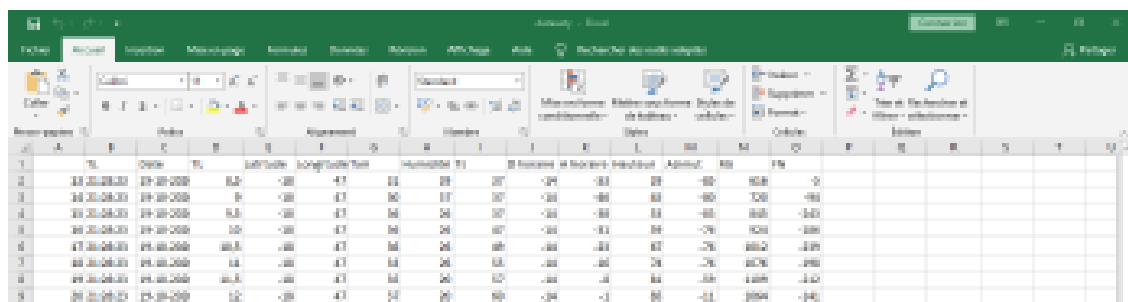


Figure 4 : Feuille Excel de base des données

### Propriétés radiatives de revêtements du sol

Le Tableau 1 donne les valeurs de l'albédo, l'émissivité et l'absorptivité de chacune de nos revêtements du sol (Hendel et al., 2015).

Tableau 1 : Propriétés radiatives de revêtements du sol

	Albédo	Emissivité	Absorptivité
Béton bitumineux	0.05-0.12	0.98	0.88-0.95
Pavé travertin	0.4-0.5	0.99	0.6-0.7
Pavé ajouré	0.3-0.4	0.99	0.5-0.6
Béton courant	0.3-0.5	0.92	0.5-0.7

Gazon	0.25	0.98	0.75
-------	------	------	------

Avec une forte absorptivité et un faible albédo, le béton bitumineux a une grande capacité d'absorption du rayonnement incident et en réfléchit très peu. On s'attend donc à ce qu'il emmagasine plus de chaleur et, en conséquence, sa température va augmenter plus que celle des autres revêtements. Avec des caractéristiques thermiques radiatives proches, le béton courant et la pierre naturelle devraient connaître des évolutions de température pratiquement identiques. L'émissivité, qui caractérise notamment la capacité des matériaux à rayonner et donc à se refroidir, est équivalente pour tout le revêtement.

### Caractères physiques de revêtements du sol

Le Tableau 2 donne les caractères physiques de 5 types de revêtements du sol utilisés pour l'expérimentation.

**Tableau 2** : Caractères physiques de revêtements du sol

	Couleur	Rugosité	Perméabilité
Béton bitumineux	Noir	++++	-
Pavé travertin	Gris	+	-
Pavé ajouré	Gris	+++	+++
Béton courant	Gris	++	-
Gazon	Vert	+++++++	++++

La réflexion est diffuse pour une surface rugueuse. Elle se dirige pratiquement dans toutes les directions ce qui diminue le facteur de réflexion du rayonnement solaire à la surface de revêtements. Par contre, la réflexion est régulière pour une surface lisse. L'égalité entre l'angle d'incidence et l'angle de réflexion augmente le facteur de réflexion de la surface de revêtements.

Les matériaux perméables ont une température basse pour une haute quantité d'eau échangée entre la surface et le sol le plus profond.

## RESULTATS

### Données de la simulation

La valeur moyenne du rayonnement global dans les zones d'études est donnée dans le Tableau 3.



**Tableau 3 : Rayonnement global durant les expérimentations**

Date	Rayonnement global [W/m <sup>2</sup> ]	Etat du ciel
10 février 2020	912.58	Légèrement nuageux
13 février 2020	751.63	Partiellement nuageux
19 février 2020	864.27	Légèrement nuageux
20 février 2020	522.64	Très nuageux
06 mars 2020	729.47	Partiellement nuageux

**Données expérimentales**

Les valeurs moyennes de la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent sont données dans le Tableau 4.

**Tableau 4 : Données expérimentales**

Date	Station	Température de l'air [°C]			Humidité relative [%]	Vitesse du vent [m/s]
		Moyenne	Max	Min		
10-févr-20	B	30.4	36.1	26.3	41	2.5
13-févr-20	A	35.1	40.6	28.4	34	1.1
19-févr-20	A	36.4	40.4	29.7	26	4.9
20-févr-20	B	34.9	37.3	31.0	25	3.5
06-mars-20	A	27.4	31.0	22.3	55	4.9

**Observations du premier jour de la station A**

La Figure 10 montre les résultats de mesure des températures de surface de chaque revêtement exposé au rayonnement solaire au cours de la journée du 13 février 2020.

Les températures des 5 revêtements augmentent jusqu'à midi et diminuent ensuite progressivement. Elles varient en fonction du rayonnement solaire. Au cours de la première heure d'expérimentation, les courbes des pavés minéraux sont pratiquement confondues. Alors que celles du béton courant et du pavé ajouré le restent toute la matinée, celle du pavé travertin se détache et domine tout le reste. L'après-midi, celle du pavé ajouré rejoint celle du pavé travertin. Le comportement du gazon est remarquable ; les différences de température avec les pavés sont très marquées, avec un pic de plus de 15°C vers midi.

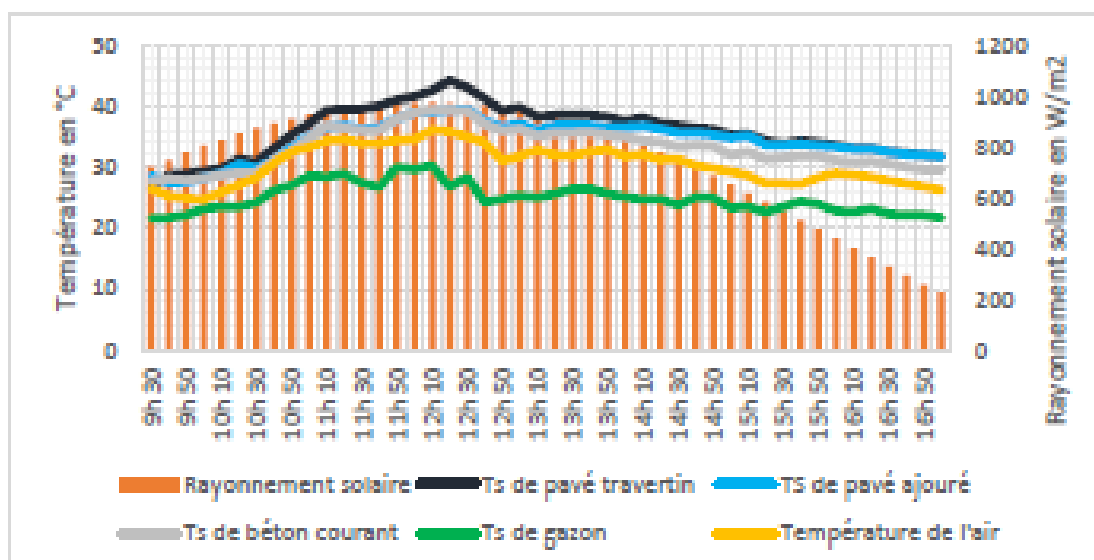


Figure 5 : Température de surface au bout du premier jour dans la station A

### Observations durant le deuxième jour dans la station A

Les courbes de variation des températures de surface de chaque revêtement pendant la journée du 19 février 2020 sont représentées par la Figure 11.

Pour les résultats du deuxième jour d'expérimentation, les courbes de pavé travertin, pavé ajouré et béton courant sont pratiquement confondues du matin jusqu'à l'après-midi. Le comportement du gazon reste toujours remarquable par les différences de température avec les pavés.

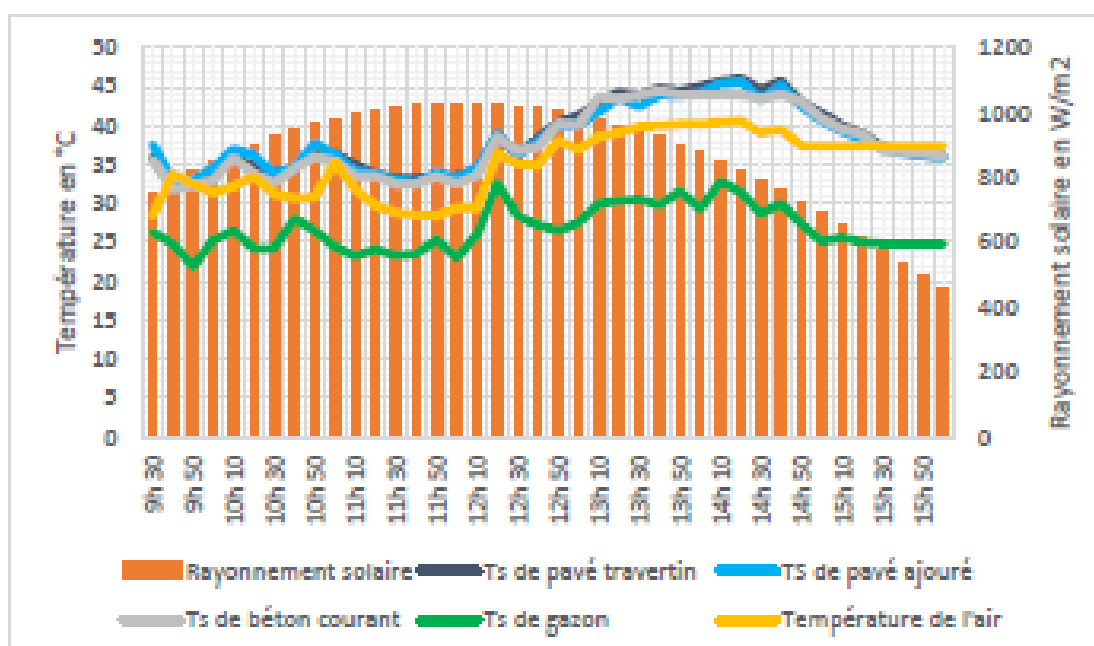


Figure 11 : Températures des surfaces durant le deuxième jour dans la station A

### Observations durant le troisième jour dans la station A

La Figure 12 ci-dessous montre les courbes de la température de surface de chaque revêtement exposé au rayonnement solaire pendant la journée du le 6 mars 2020.

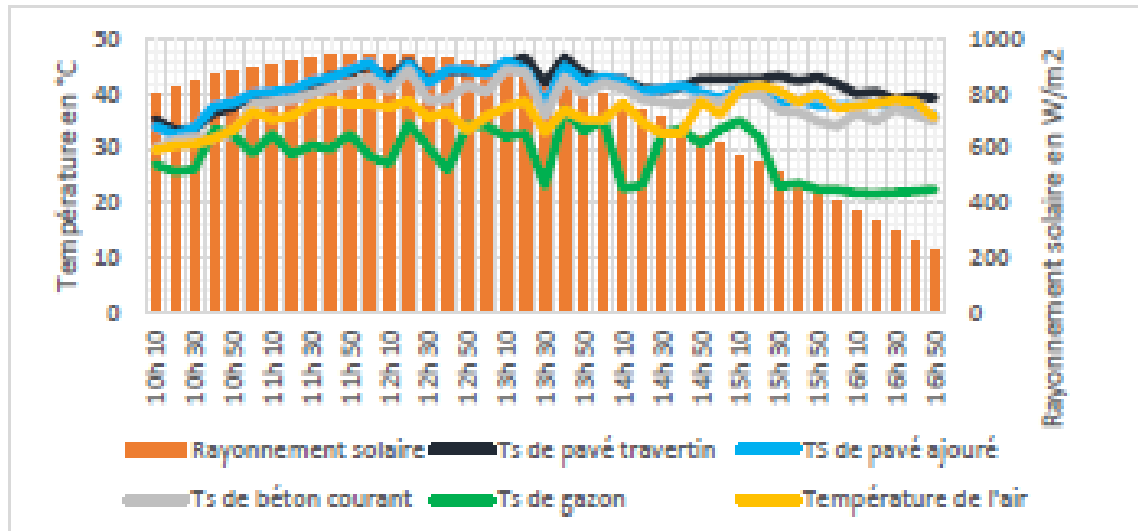


Figure 6 : Températures des surfaces durant le troisième jour dans la station A

Les courbes des pavés minéraux sont pratiquement confondues notamment le pavé travertin et ajouré qui se superpose presque toute la matinée. L'après-midi, toutes les courbes se sont détachées. Le comportement du gazon est remarquable ; les différences de température avec les pavés sont très marquées, avec un pic de plus de 15°C vers midi.

### Observations durant le premier jour dans la station B

La Figure 13 représente la variation de températures de surface de béton bitumineux le 10 février 2020 de 8 h 30 min jusqu'à 12 h 00 min.

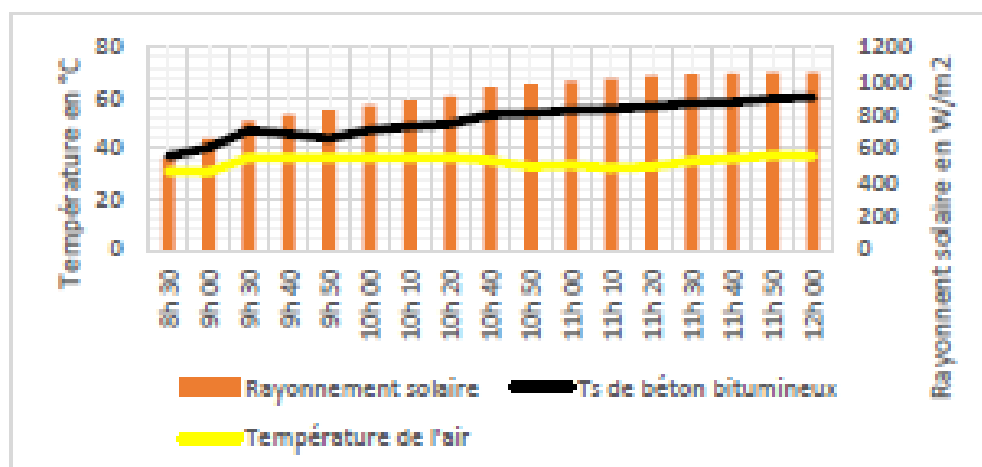


Figure 13 : Températures de surface durant le premier jour dans la station B

- La valeur moyenne de températures de surface de béton bitumineux est de 51.2°C. Sa valeur minimale est de 37°C.
- Avant-midi, la température de surface augmente progressivement jusqu'à atteindre un maximum de 60.2°C. Cela s'explique par l'ensoleillement important noté durant cette période.

### Observations durant le deuxième jour dans la station B

La Figure 14 représente la variation de températures de surface de béton bitumineux le 20 février 2020.

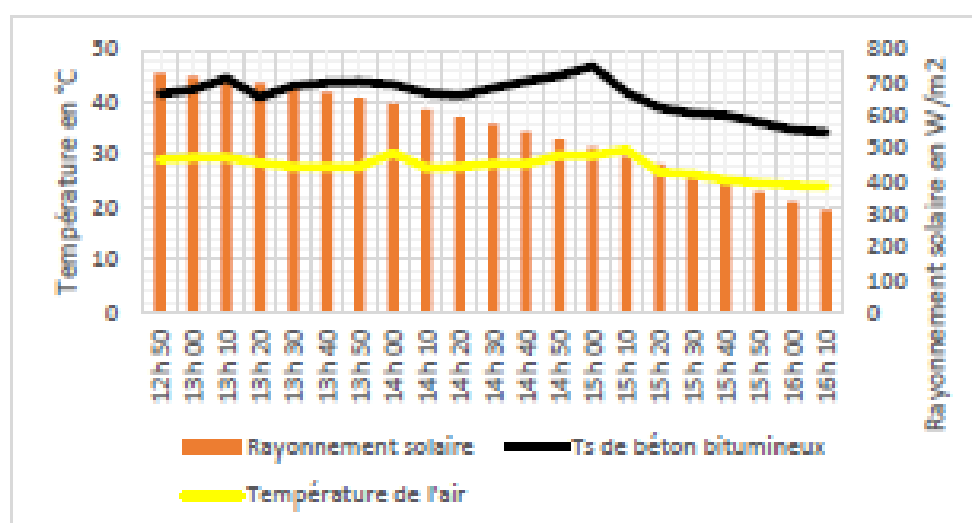


Figure 14 : Températures de surface durant le deuxième jour dans la station B

Au cours de l'après-midi, il a été constaté que la température de surface augmente lentement jusqu'à atteindre un maximum de 46.9°C, puis décroît.

### Interprétation générale des résultats graphiques

D'après les résultats cités précédemment, les remarques suivantes peuvent être émises :

- ❖ Les courbes ont même allure ;
- ❖ Les températures superficielles des pavés minéraux sont supérieures à celles de l'air ambiant pendant toute la durée de l'expérience. Le pavé travertin a le plus grand écart tandis que le gazon a le plus petit écart. L'écart le plus élevé est enregistré autour de midi ;
- ❖ La température du gazon reste inférieure à celle de l'air ambiant pendant toute la durée de l'expérience avec un écart de 10°C.

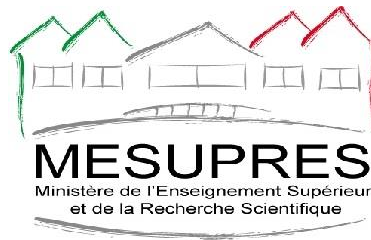
## CONCLUSION

Ce travail vise à concevoir des places urbaines agréables à vivre, et surtout offrir des conditions confortables notamment du point de vue thermique. Il s'agit d'étudier les comportements thermiques de revêtement du sol exposés au rayonnement solaire qui avait pour objectif d'identifier les matériaux utilisés pour les revêtements du sol qui procurent le meilleur confort thermique. Ainsi, l'étude met en exergue le fait que la nature des matériaux utilisés en milieu urbain de couleur sombre et la surface rugueuse participent à augmenter la température de la surface et de l'air. Par contre, la couleur claire et la surface lisse favorisent leur diminution.

Nous avons enregistré pour le cas de la ville, des différences de températures qui sont surtout marquées pendant la journée, avec un écart d'une moyenne de 10°C pour la température de surface, et un écart maximum de 2.5°C pour la température de l'air. Dans cette étude, les matériaux sont classés en deux catégories selon leur performance thermique. Le béton bitumineux est un matériau chaud tandis que le pavé travertin, le pavé ajouré et le béton courant sont des matériaux modérément chauds. Le gazon est une référence climatique qui constitue un matériau frais. Pour améliorer sa performance, on doit augmenter l'albédo de surface en utilisant une couleur claire et une surface lisse. Il est très avantageux aussi d'utiliser un revêtement perméable. Il est également très important d'approfondir les études de la géométrie et la végétation pour diminuer les effets de l'îlot de chaleur urbain. Par conséquent, la demande énergétique de la ville pour rafraîchir la cour et pour climatiser le bâtiment est diminuée.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Martin Hendel, Morgane Colombert, Arnaud Grados, Youssef Diab. (2015). Quel est le meilleur revêtement pour limiter la formation des îlots de chaleur urbains ? France. Page 3
- 2) M. R. Yaïche, S.M.A Bekkouche. (2010). Estimation du rayonnement solaire global en Algérie pour différents types de ciel. In Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°4, Algérie. Pages 2,3.
- 3) S. Benlahmidi, N. Moummi, a. Moummi, K. Aoues, A. Labeled. (2012). Réalisation d'une interface de simulation des performances des isolateurs plans. In Courier du Savoir – N°13, Algérie. Page 6.



UR | UNIVERSITÉ  
DE LA RÉUNION

ist  
les filières pour l'@venir

ist

INSTITUT SUPÉRIEUR DE TECHNOLOGIE  
istA  
D'AMBOSITRA

UNIVERSITÉ DES  
MASCAREIGNES  
SAVOIR, C'EST POUVOIR

AGENCE  
UNIVERSITAIRE  
DE LA FRANCOPHONIE

C.I.T.E.F.

CONFÉRENCE INTERNATIONALE  
DES FORMATIONS D'INGÉNIEURS  
ET TECHNICIENS D'EXPRESSION FRANÇAISE



**Journées de Recherche des ISTs 6ème édition, Ambositra 5-7 octobre 2021**

**« Interdisciplinarité des recherches scientifiques au service du développement durable et d'une société résiliente »**

## **Estimation du potentiel solaire d'Ambositra**

**P. B. Randriamanampisoa<sup>1</sup>, D. Razafindranakolona<sup>2</sup>, B. Raheliharilalao<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Doctorant, Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences, Université d'Antananarivo

Correspondant : [leibenildex@gmail.com](mailto:leibenildex@gmail.com)

<sup>2</sup> Docteur, Institut Supérieur de Technologie d'Ambositra

<sup>3</sup> Professeur Titulaire, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo

### **Résumé**

L'utilisation des énergies renouvelables comme sources d'énergie permet de réduire la demande énergétique en matière d'hydrocarbures et la diminution des gaz à effet de serre. L'énergie fournie par le soleil est plus de 11 000 fois supérieures à la demande énergétique mondiale actuelle. De par sa situation géographique, Madagascar dispose d'un potentiel solaire énorme. Dans ce travail, nous nous intéressons au gisement solaire de divers sites, présentant de climats différents, par la réalisation d'un outil de simulation du rayonnement solaire global. Les estimations ont été effectuées à l'aide du modèle de « Perrin de Brichambaut ». Nous avons conçu une interface graphique avec le langage de programmation Python. Le logiciel « Solar\_rad » permet une visualisation de l'énergie solaire numériquement et graphiquement. Nous pouvons l'utiliser pour un temps donné et Il permettra à tout utilisateur d'avoir des informations préalables avant d'entamer un projet solaire. Nous avons enregistré

pour le cas d'Ambositra avec une valeur moyenne journalière de  $5.54\text{Wh/m}^2/\text{j}$ . Il prend sa valeur optimale en mois de novembre environ  $6.89\text{Wh/m}^2/\text{j}$  tandis que le mois de juin est le plus faible environ  $3.87\text{Wh/m}^2/\text{j}$ . Une comparaison entre des valeurs de l'éclairement solaire dans le logiciel de gestion d'énergie « RETScreen » et des valeurs calculées a été effectuée afin de valider l'outil.

**Mots clés :** Rayonnement solaire, Perrin de Brichambaut, Simulation, Solar\_rad, RETScreen.

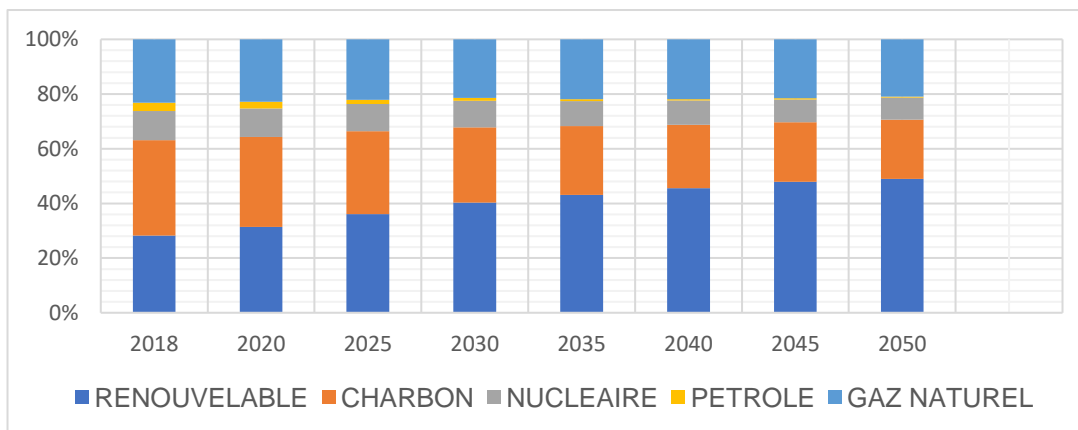
### Abstract

The use of renewable energies as an energy source reduces the energy demand for hydrocarbons and the reduction of greenhouse gases. The energy from the sun is more than 11,000 times greater than the current global energy demand. Thank to its geographic position, Madagascar has an enormous solar potential. In this work, we are interested in the valuation of the solar deposit in various sites, in different climates, by the realization of a radiation simulation tool. We created a graphical interface with Python programming language and the calculations were carried out using the "Perrin de Brichambaut" model. The realized software "Solar\_rad" allows visualization of solar energy numerically and graphically. We can use it for any time and It will allow any users to have prior information before starting a solar project. We registered for the case of Ambositra with an average daily value of  $5.54\text{Wh/m}^2/\text{d}$ . It takes its optimal value in the month of November around  $6.89\text{Wh/m}^2/\text{d}$  while the month of June is the lowest around  $3.87\text{Wh/m}^2/\text{d}$ . A comparison between values of solar irradiance in software RETScreen and calculated values was performed in order to validate this tool.

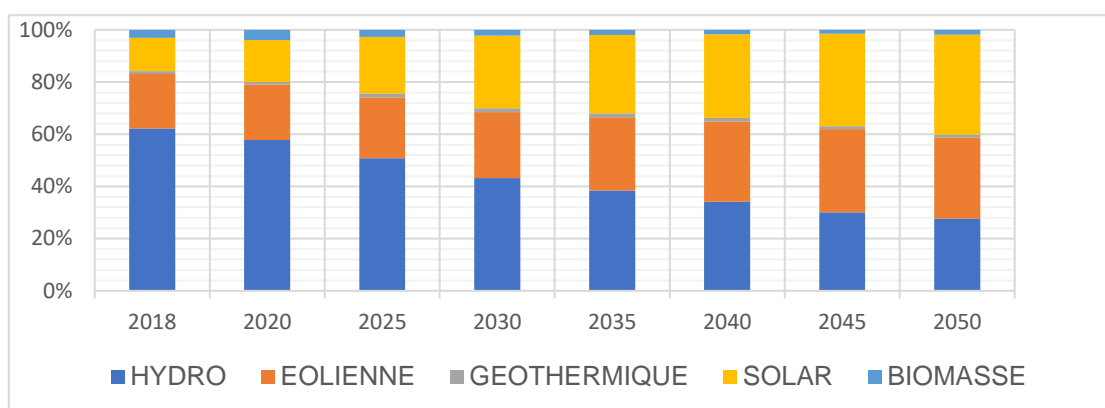
Keywords : Solar radiation, Perrin de Brichambaut, Simulation, Solar\_rad, RETScreen

### 1. Introduction

Les efforts de recherche pour produire de l'électricité en minimisant les émissions de carbone comme l'utilisation des énergies renouvelables nous aident à réduire le changement climatique. Selon l'EIA (EIA, 2018), l'énergie renouvelable occupe le 29% de l'énergie utilisée dans le monde et prévue d'atteindre le 49% en 2050 (**figure 1**). [Samuel \(Samuel, 2013\) a affirmé que l'énergie fournie](#) par le soleil est plus de 11 000 fois supérieures à la demande énergétique mondiale actuelle. Cette énergie peut être exploitée de diverses façons, les plus connues étant le solaire thermique (chauffe-eau, chauffage solaire, centrales solaires thermodynamiques) et la conversion photovoltaïque. La demande énergétique mondiale en énergie renouvelable est représentée par la **figure 2**. Le photovoltaïque peut atteindre le 38% de demande énergétique mondiale en 2050. (EIA, 2018)



**Figure 148: Demande énergétique mondiale depuis 2018 (EIA, 2018)**



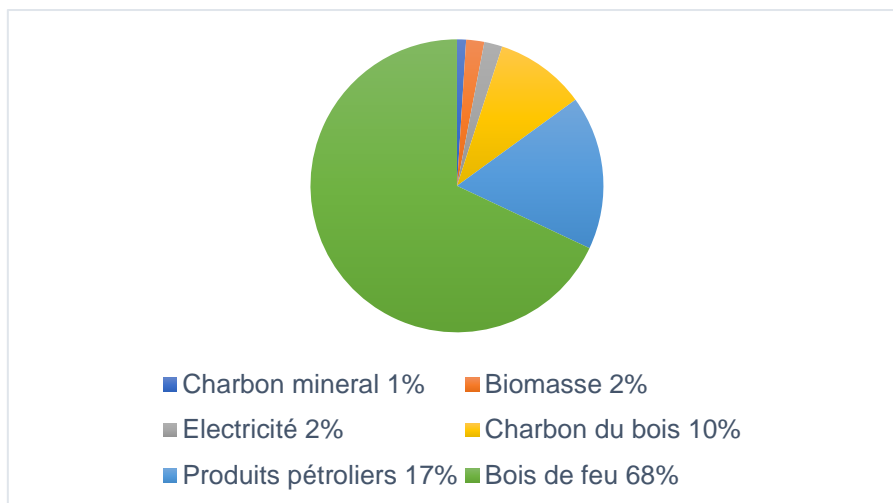
**Figure 149: Demande énergétique mondiale en énergie renouvelable depuis 2018 (EIA, 2018)**

A Madagascar, différentes sources d'énergies sont utilisées pour satisfaire les besoins dans l'accomplissement de diverses activités. La **figure 3** représente la prédominance de l'utilisation du bois comme source d'énergie. Cependant, de par sa situation géographique, Madagascar dispose d'un potentiel solaire énorme presque toutes les régions du pays, plus de 2.800 heures d'ensoleillement annuel totalisant 2.000kWh/m<sup>2</sup>/an. Cette énergie est exploitée actuellement sous exploitée, notamment en matière de production d'électricité.

Le réseau national de mesures météorologiques se caractérise par un faible nombre en stations radiométriques, ainsi la collecte des différentes données météorologiques et radiométriques est rare. L'utilisation de modèles de simulation reste pratiquement l'un des seuls moyens pour pallier à ce problème de données radiométriques.

Le présent travail consiste à la réalisation d'un outil informatique, permettant le calcul de l'éclairement solaire par n'importe quel type de ciel et sur n'importe quel site.





**Figure 150: Consommation en énergie à Madagascar**

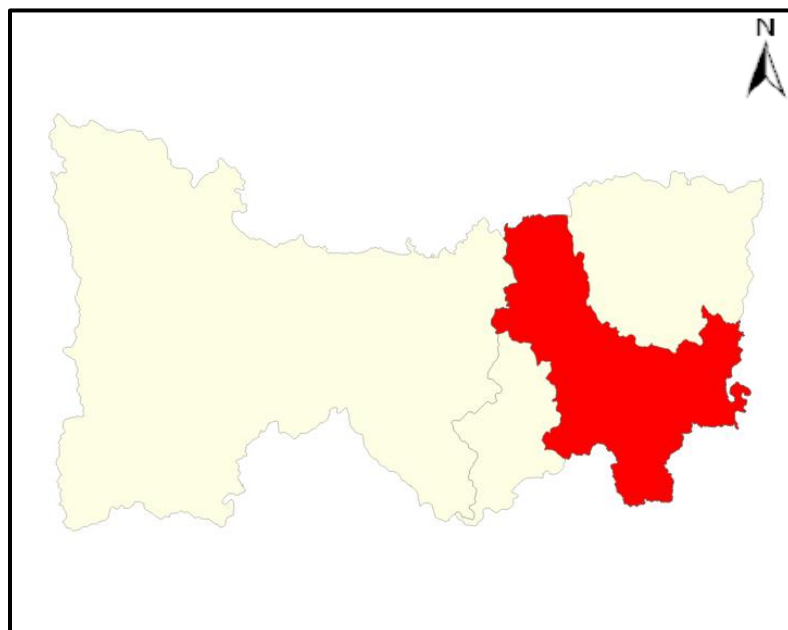
## 2. Méthode et Matériel

### 2.1. Sites d'étude

Le district d'Ambositra se trouve au centre de Madagascar situé dans la région d'Amoron'i Mania et dans la province de Fianarantsoa. Il se trouve entre 20°31'49" Sud de latitude ( $\Phi$ ) et 47°14'36" Est de longitude (L) avec une altitude de 1318m. Son climat de type tropical humide et d'altitude est caractérisé par la présence de deux saisons bien marquées :

- ❖ Saison chaude et pluvieuse qui s'étend du mois d'octobre au mois d'avril.
- ❖ Saison sèche et fraîche qui va du mois de mai au mois de septembre.

La **figure 4** présente la carte de localisation de district d'Ambositra.



**Figure 151: Carte de localisation d'Ambositra**

## 2.2. Modèle de PERRIN DE BRICHAMBAUT

Il existe plusieurs modèles pour estimer le rayonnement solaire reçu sur un plan incliné d'un angle « i » par rapport à l'horizontal et orientée vers une direction faisant un angle « Y ». C'est une méthode pour estimer l'ensoleillement journalier sur un plan horizontal ou incliné au temps donné d'un lieu. Il est fonction des paramètres météorologiques du lieu. Selon l'étude réalisée par Noureddine (Noureddine, 2012), les résultats expérimentaux comparés à ceux de la simulation montrent que l'utilisation des modèles de Perrin de BRICHAMBAUT s'avère fiable pour la détermination du rayonnement solaire global.

### 2.2.1. Rayonnement global

Le rayonnement global est la somme de rayonnement direct et le rayonnement diffus.

$$G^* = S^* + D^*$$

### 2.2.2. Rayonnement solaire direct sur un plan incliné

L'éclairement solaire reçu sur un plan incliné d'un angle « i » par rapport à l'horizontal est

$$S^* = I^* \times C_i$$

$C_i$  : coefficient d'incidence

$I^*$  : rayonnement solaire direct sur une surface horizontale

### 2.2.3. Rayonnement solaire direct sur une surface horizontale

Le rayonnement solaire direct est le rayonnement incident sur un plan donné provenant du soleil. Il parvient en ligne droite et par temps clair, sans subir aucune déviation. Il est donné par la formule suivante (Jannot, 2011) :

$$I^* = I_0 \times e^{-(m_{\text{air}} T_L \sigma_R)}$$

$I_0$  : éclairement solaire perpendiculaire à la surface

$M_{\text{air}}$  : masse atmosphérique

$T_L$  : facteur de trouble de Linke

$\sigma_R$  : épaisseur optique de Rayleigh

#### Valeur de $I_0$

$I_0$  désigne l'éclairement solaire reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite de l'atmosphère en fonction du jour de l'année. Il est exprimé par la relation suivante :

$$I_0 = C_{\text{sol}} \times \left( 1 + 0.0334 \times \cos\left(\frac{360 \times (n - 2.7206)}{365.25}\right) \right)$$

$C_{\text{sol}}$  : constante solaire

n : numéro du jour de l'année

### Masse atmosphérique

C'est la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol, par rapport à une traversée verticale au niveau de la mer. Cela dépend de la hauteur angulaire du soleil à l'aide des points O, A et M. A une pression P et à une altitude z, elle est donnée par la formule suivante (Yettou, 2011) :

$$m_{\text{air}} = \frac{P_{\text{atm}}}{101325 \times \sin(h) + 15198.75 \times (3.885 + h)^{-1.253}}$$

$P_{\text{atm}}$  : pression atmosphérique du milieu

h : hauteur du soleil

### Hauteur du soleil

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal du lieu. La hauteur du soleil varie à chaque instant de la journée et de l'année selon la relation suivante : (MERINO, 2013)

$$h = \text{Arcsin}[\sin(\phi)\sin(\delta) + \cos(\phi)\cos(\delta)\cos(\omega)]$$

$\phi$  : Latitude du lieu

$\delta$  : Déclinaison horaire

$\omega$  : Angle horaire du soleil

### Déclinaison solaire

C'est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre, on adopte la convention compter positivement les latitudes de l'hémisphère Nord qui compris entre 0° à l'équateur et +90° au pôle Nord, et négativement celle de l'hémisphère Sud qui compris entre 0° à l'équateur et -90° au pôle Sud, et variée tout au long de l'année entre deux valeurs extrêmes

23.45°.

$$\delta = 23,45 \sin \left[ \frac{360}{365} (n - 81) \right]$$

n : nombre du jour de l'année

### Angle horaire du soleil

C'est l'angle que font les projections de la direction du soleil avec la direction du méridien du lieu et celui contenant la direction du pôle céleste et celle du soleil. L'angle horaire du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation :

$$\omega = 15(\text{TSV} - 12)$$

### Temps Solaire Vrai

C'est le temps légal corrigé de l'équation du temps, donnée astronomique universelle liée donc à l'excentricité de l'orbite de la terre autour du soleil.

$$\text{TSV} = \text{TL} - \text{DH} + \frac{\text{L}}{15} + \frac{\text{ET}}{60}$$

TL : Temps légal

DH : Décalage Horaire

ET : Equation du Temps

### Temps Solaire Moyen

La rotation de la terre autour des pôles, introduit la notion de « Temps Solaire Moyen ». La journée solaire moyenne est le temps qui sépare, en moyenne, deux passages successifs du soleil au méridien d'un lieu. On définit le Temps Solaire Moyen par la différence entre le temps universel et la correction de longitude, il est donné par :

$$\text{TSM} = \text{TU} + \frac{\text{L}}{15}$$

TU : Temps Universel

L : Longitude du lieu

### Equation du Temps

Cet écart entre le Temps Solaire Moyen et le Temps Solaire Vrai est désigné sous le terme équation du temps. Elle s'exprime par la relation suivante, dans laquelle ET est donnée en minutes :

$$\text{ET} = 9.87 \sin(2B) - 7.35 \cos(B) - 1.5 \sin(B)$$

Dans laquelle  $B = \frac{360}{365} \times (n - 81)$

n : Le nombre du jour de l'année

La durée d'ensoleillement se calcule par la relation suivante :

$$D_0 = \frac{2}{15} \text{Arcos}(-\tan(\phi) \tan(\delta))$$

### Temps solaire vrai lever et coucher du soleil

Le temps solaire vrai lever et coucher du soleil sont donnés par les formules suivantes :

$$\text{TSV}_{\text{lever}} = 12 - \frac{\arccos(\text{tg } \phi \text{ tg } \delta)}{15}$$

$$\text{TSV}_{\text{coucher}} = 12 + \frac{\arccos(\text{tg } \phi \text{ tg } \delta)}{15}$$

### Facteur de Trouble de Linke TL

Par définition, le facteur de Linke est le nombre d'atmosphères idéales superposées qui entraîne la même atténuation que l'atmosphère réelle. Il permet de calculer les composantes directes et diffuse de l'irradiation reçue sur un plan. L'absorption et la diffusion causées par les constituants de l'atmosphère peuvent être exprimées par ce facteur (Yaïche 2010).

$$T_L = 2.4 + 14.6 \beta + 0.4(1 + 2 \beta) \ln(P_v)$$

Avec  $\beta$  est le coefficient de trouble atmosphérique

**Tableau 47: Valeur du coefficient de trouble atmosphérique**

LIEU	Valeur de $\beta$
Montagne	0,02
Rural	0,05
Urbain	0,10
Industriel	0,20

Pression partielle de vapeur d'eau [mm Hg]

$$P_v = P_{sv} \times H_R$$

Avec  $H_R$  est l'humidité relative exprimée en %

Pression de vapeur saturante : [mm Hg]

$$P_{sv} = 2.165 \times \left(1.098 + \frac{T_{\text{air}}}{100}\right)^{8.02}$$

$T_{\text{air}}$  : Température de l'air en °C

## Epaisseur optique de Rayleigh

En 1922, Linke définit l'épaisseur optique de Rayleigh  $\delta_R$  comme étant l'épaisseur optique totale d'une atmosphère sans nuages, vapeur d'eau et aérosols.

$$\sigma_R = \frac{1}{0.9m_{\text{air}} + 9.4}$$

## Coefficient d'incidence $C_i$

C'est l'angle formé par le rayonnement solaire avec le plan perpendiculaire d'une surface. Ce coefficient est défini d'une part par la hauteur du soleil et son azimut, d'autre part par l'orientation et l'inclinaison du plan récepteur.

$$C_i = \sin(i) \times \cos(h) \times \cos(\gamma - a) + \cos(i) \times \sin(h)$$

$i$  : angle d'inclinaison du capteur qui est l'angle entre la normale au plan et la verticale du lieu.

$\gamma$  : angle d'orientation de la surface qui est l'angle que fait la projection de la normale du plan incliné avec le méridien dans le plan horizontal. Il prend les valeurs suivantes :

- 0 pour une orientation vers le Sud
- 90 pour une orientation vers l'Est
- 180 pour une orientation vers le Nord
- -90 pour une orientation vers l'Ouest

$a$  : azimut du soleil

$h$  : hauteur du soleil

### 2.2.4. Rayonnement solaire diffus horizontal

C'est le rayonnement solaire qui arrive sur le plan récepteur après avoir été diffusé par les nuages, les poussières, les aérosols et réfléchi par le sol. L'éclairement solaire diffus est obtenu par :

$$D^* = 125 \times \sin(h)^{0.4} \times \left(1 + \frac{\cos(i)}{2}\right) + 211.86 \times \sin(h)^{1.22} \times \left(1 - \frac{\cos(i)}{2}\right)$$

### 2.2.5. Facteur d'atténuation des couches nuageuses

Ce facteur met en évidence l'action des couches nuageuses sur l'irradiation reçue au sol. Il est donné par la relation :

$$K_C = 1 - 0.75 \left(\frac{N}{8}\right)^{3.4}$$

## Degré de nébulosité N

Il désigne le rapport entre la surface de la voûte céleste couverte par des nuages, et la surface totale. Ses valeurs dépendent donc du taux de couverture du ciel. Il est exprimé par les prévisionnistes en octas huitième de ciel, une valeur de 8 indique que le ciel est complètement opaque et une valeur de 0 qu'il est complètement dégagé. Le **tableau 2** donne un aperçu des termes utilisés dans les prévisions météorologiques pour décrire le degré de nébulosité.

**Tableau 48: Degré de nébulosité**

Termes utilisés	Partie du ciel non visible du fait de la présence de nuages[octas]
Ciel serein	0
Légèrement nuageux	1 à 2
Partiellement nuageux	3 à 5
Très nuageux	6 à 7
Couvert	8

### 2.2.6. Irradiation solaire journalière

L'irradiation solaire journalière est l'énergie reçue par un plan récepteur pendant une journée. Elle est donnée par la formule :

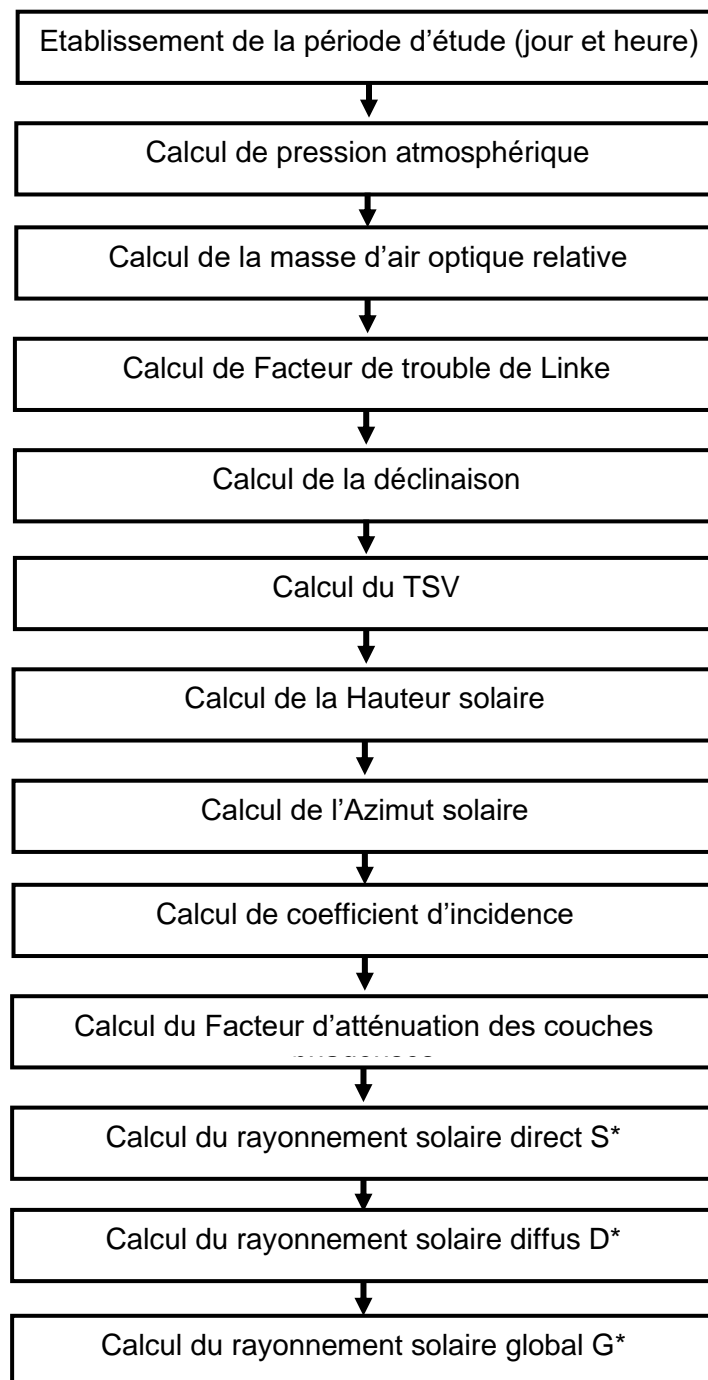
$$G = \int_{TSV_1}^{TSV_2} G dt = \int_{TSV_1}^{TSV_2} \frac{K_c \times 2 \times G^*}{\pi} dt$$

$K_c$  : facteur d'atténuation des couches nuageuses

$G^*$  : rayonnement solaire global en  $W/m^2$

$t$  : temps

La **figure 5** suivante représente l'organigramme pour l'estimation de rayonnement solaire.

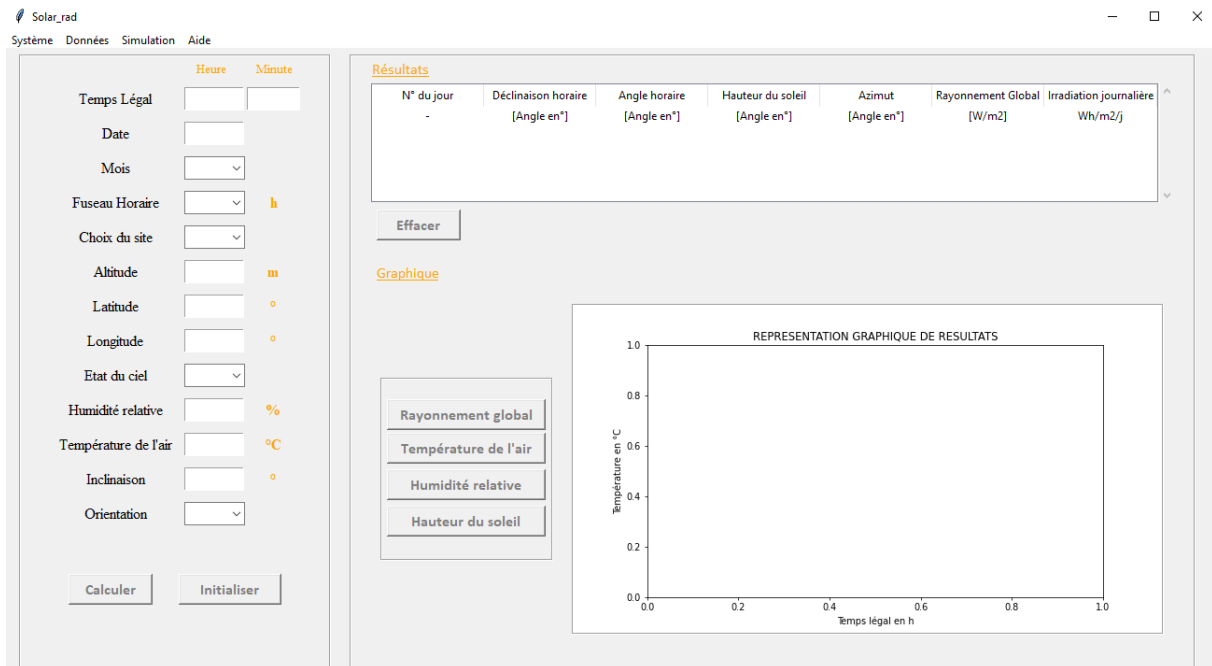


**Figure 152: Schéma fonctionnel du modèle de Bricambaut**



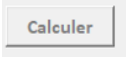
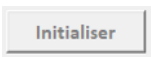
### 3. Résultats

Après l'exécution du logiciel « Solar\_rad », la fenêtre de présentation est affichée en premier lieu, par la suite la fenêtre de la **figure 6** sera affichée. Depuis cette fenêtre, on peut calculer le rayonnement solaire par le modèle de BRICHAMBAUT en intégrant les données relatives au site (latitude, longitude, altitude) et en choisissant l'orientation et l'inclinaison de surface.



**Figure 153: Fenêtre de logiciel Solar\_rad**

On utilise la partie gauche pour l'insertion et la sélections des données (**Figure 7**) et la partie droite contient le tableau qui illustre les résultats numériques (**Figure 8**) et graphiques (**Figure 9**)

La **figure 10** montre l'interface pour l'insertion et la sélection des entrants. On clique sur le bouton  pour exécuter le calcul et le bouton  pour effacer tous les entrants.

	Heure	Minute
Temps Légal	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Date	<input type="text"/>	
Mois	<input type="text" value="v"/>	
Fuseau Horaire	<input type="text" value="v"/>	<b>h</b>
Choix du site	<input type="text" value="v"/>	
Altitude	<input type="text"/>	<b>m</b>
Latitude	<input type="text"/>	<b>°</b>
Longitude	<input type="text"/>	<b>°</b>
Etat du ciel	<input type="text" value="v"/>	
Humidité relative	<input type="text"/>	<b>%</b>
Température de l'air	<input type="text"/>	<b>°C</b>
Inclinaison	<input type="text"/>	<b>°</b>
Orientation	<input type="text" value="v"/>	
<input type="button" value="Calculer"/>		<input type="button" value="Initialiser"/>

**Figure 154: Interface pour les entrants**

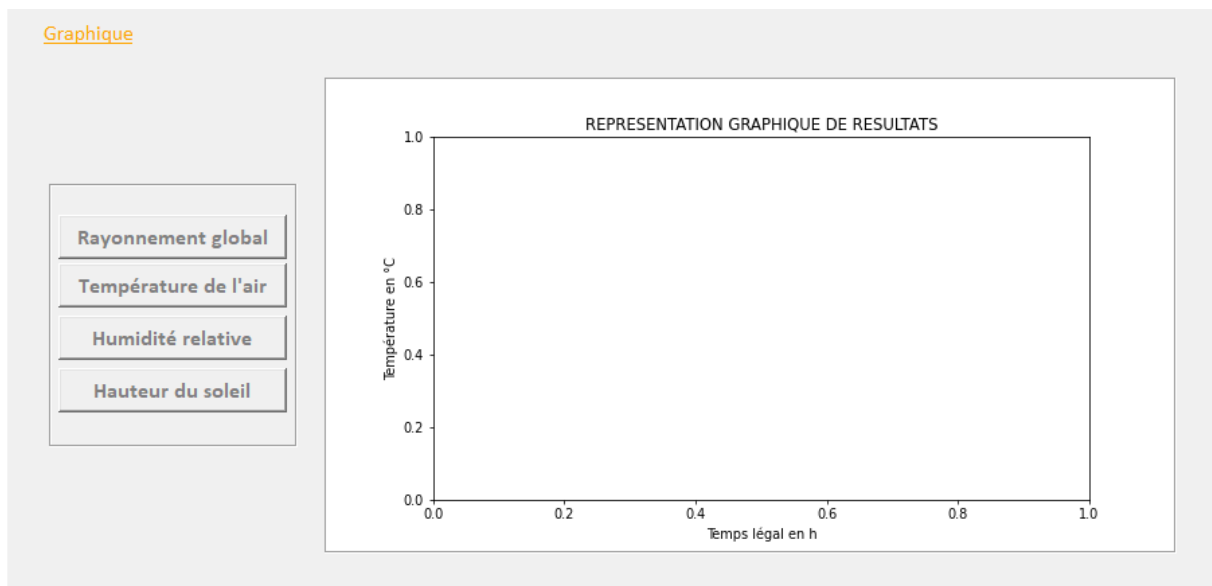
Après l'exécution de calcul, les résultats sont affichés dans le tableau qui est représenté par la **figure 8** suivante.

Résultats

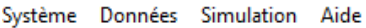
N° du jour	Déclinaison horaire	Angle horaire	Hauteur du soleil	Azimut	Rayonnement Global	Irradiation journalière
-	[Angle en°]	[Angle en°]	[Angle en°]	[Angle en°]	[W/m2]	Wh/m2/j

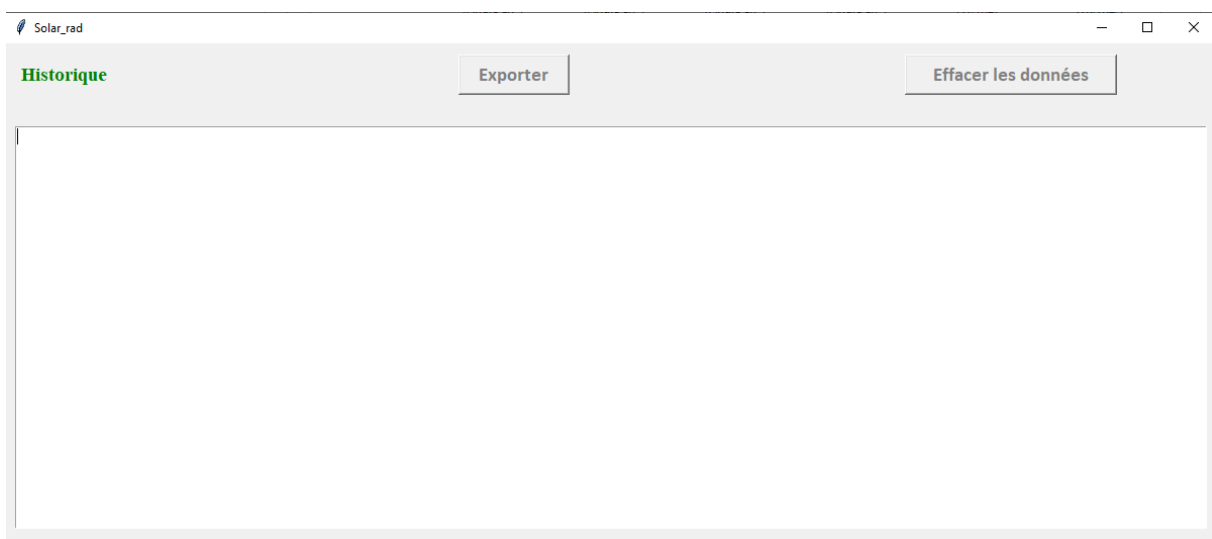
**Figure 155: Tableau des résultats sous Solar\_rad**

La **figure 9** donne les résultats graphiques sur la variation du rayonnement solaire global, la température de l'air, l'humidité relative et la hauteur du soleil en cliquant sur chaque bouton.



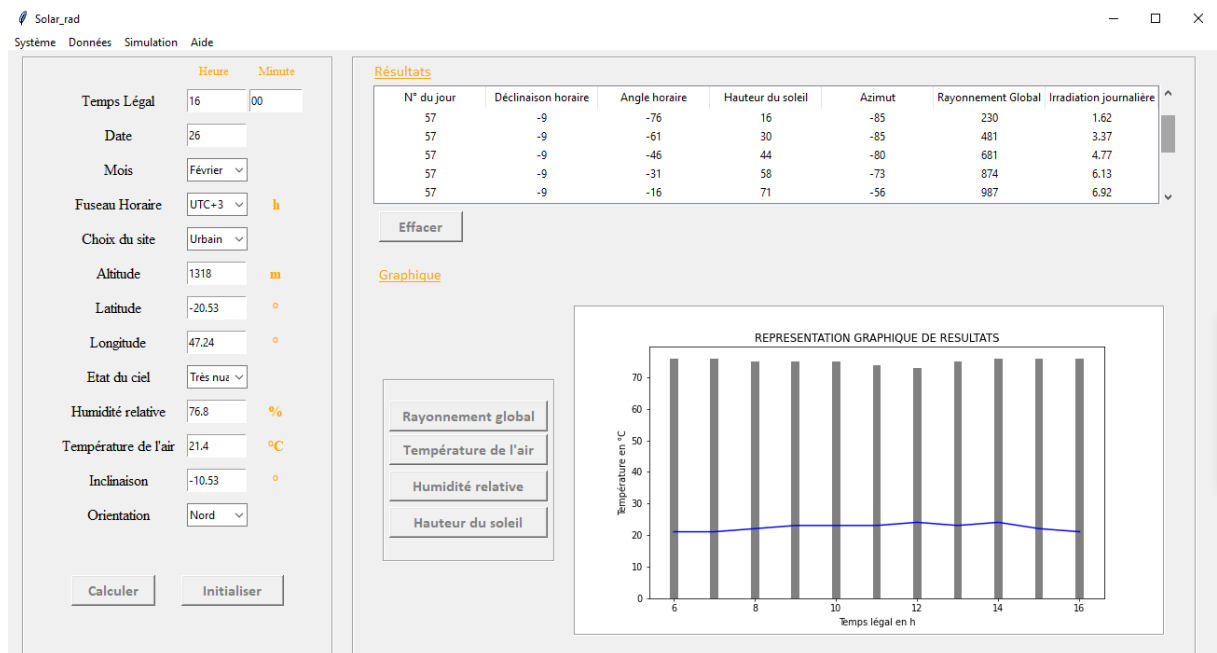
**Figure 156: Résultats graphiques sous Solar\_rad**

Les données obtenues sont enregistrées dans un fichier Excel en consultant le menu « données » «  » et en cliquant sur le bouton « exporter » de la fenêtre historique. Le bouton « Effacer les données » permet de supprimer toutes les données enregistrées dans les bases de données. La **figure 10** montre la fenêtre de l'historique de données dans le logiciel.



**Figure 157: Fenêtre de l'historique sous Solar\_rad**

En suivant la procédure de l'utilisation de notre logiciel « solar\_rad » citée précédemment, on obtient les valeurs de la déclinaison horaire, l'angle horaire, hauteur de soleil, l'azimut, le rayonnement global ainsi qu'irradiation solaire journalière. Les résultats graphiques sont représentés par une courbe et un histogramme. La fenêtre de notre logiciel après l'exécution de calcul est illustrée par la **figure 11**.



**Figure 158: Fenêtre de Solar\_rad après le calcul**

Toutes les données climatiques insérer dans ce logiciel et les données de simulation sont enregistrées dans un fichier Excel.

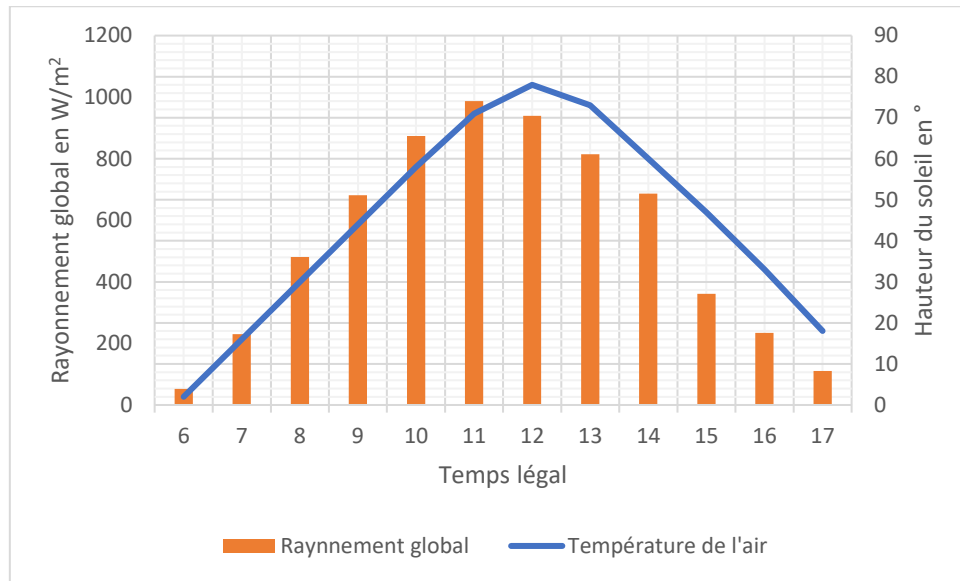
La **figure 12** représente la feuille Excel après l'exécution de notre fichier.

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1				TL	Latitude	Longitude	Tempétur	Humidité relative	Déclinaisc	Angle hor	Hauteur d	Azimut	Rayonnement global			
2		22:30:22	13-06-202	6	-20	47	21	76	-9	-91	2	-81	52			
3		22:30:22	13-06-202	7	-20	47	21	76	-9	-76	16	-85	230			
4		22:30:22	13-06-202	8	-20	47	22	75	-9	-61	30	-85	481			
5		22:30:22	13-06-202	9	-20	47	23	75	-9	-46	44	-80	681			
6		22:30:22	13-06-202	10	-20	47	23	75	-9	-31	58	-73	874			
7		22:30:22	13-06-202	11	-20	47	23	74	-9	-16	71	-56	987			
8		22:30:22	13-06-202	12	-20	47	24	73	-9	-1	78	-4	939			
9		22:30:22	13-06-202	13	-20	47	23	75	-9	13	73	49	815			
10		22:30:22	13-06-202	14	-20	47	24	76	-9	28	60	68	687			
11		22:30:22	13-06-202	15	-20	47	22	76	-9	43	47	81	361			
12		22:30:22	13-06-202	16	-20	47	21	76	-9	58	33	87	234			

**Figure 159: Feuille Excel de la base des données**

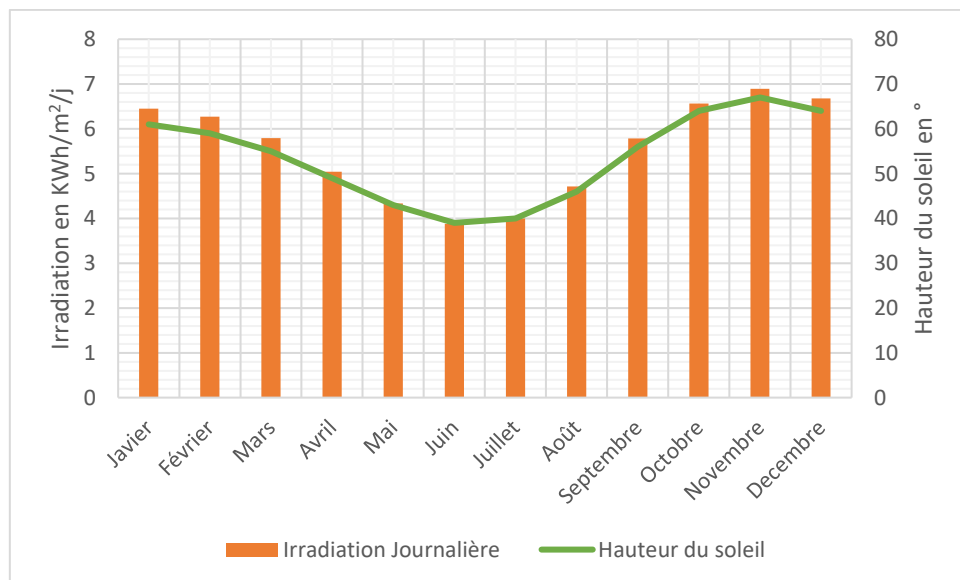
La variation de rayonnement global du 26 février 2021 à Ambositra est représentée par la **figure 13** suivante :



**Figure 160: Rayonnement global du 26 février 2021**

On constate que le rayonnement global varie en fonction de l'état du ciel. Il prend sa valeur maximale vers midi et il est proportionnel avec la hauteur du soleil durant toute la journée.

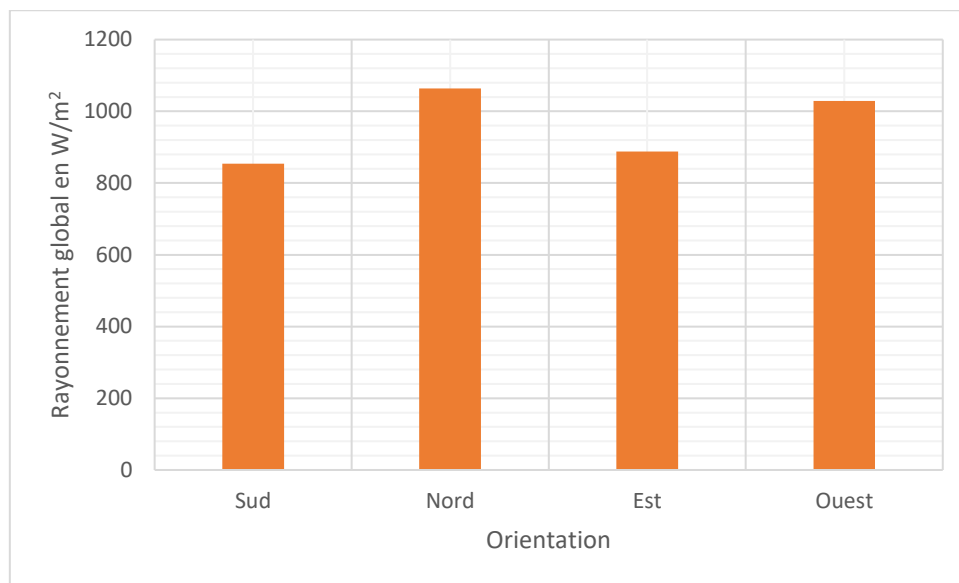
La **figure 14** suivante représente l'irradiation journalière pour l'année 2021 à Ambositra.



**Figure 161: Irradiation journalière pour l'année 2021.**

La valeur moyenne de l'irradiation journalière est environ  $5.54KWh/m^2/j$ . Il prend sa valeur optimale en mois de novembre tandis qu'il est faible en mois de juin.

La **figure 15** représente la variation du rayonnement solaire en fonction de l'orientation de la surface le 26 février 2021 à 11h 00.



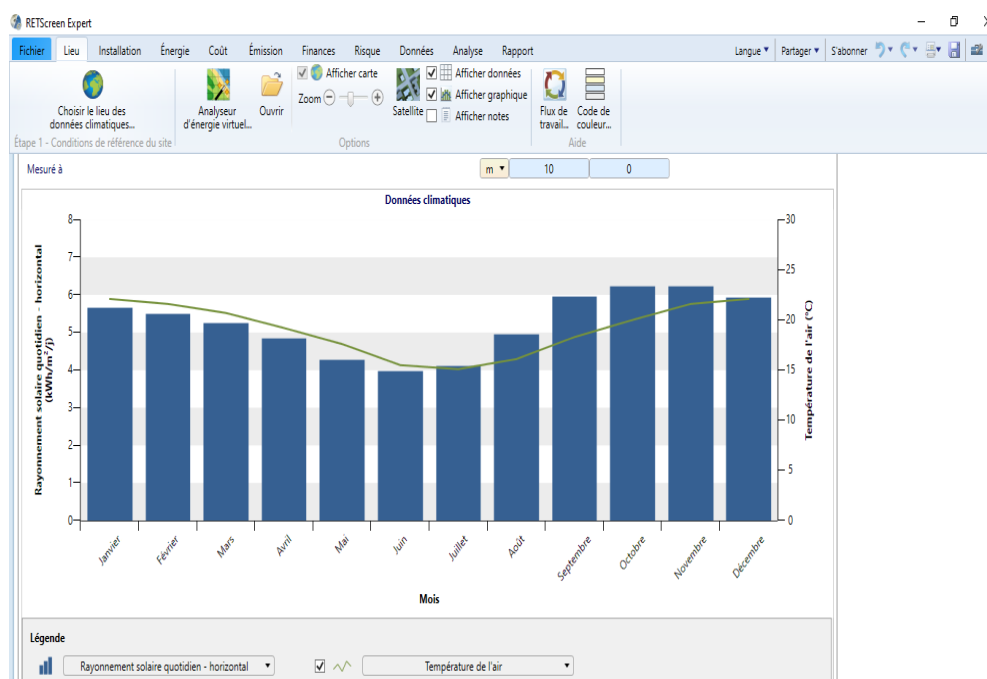
**Figure 162: rayonnement solaire en fonction de l'orientation**

Le rayonnement global est maximum pour l'orientation Nord tandis qu'il est faible pour l'orientation sud.

#### 4. Discussion

Selon l'étude réalisée par Nouredine (Nouredine, 2012), les résultats expérimentaux comparés à ceux de la simulation montrent que l'utilisation des modèles de Perrin de BRICHAMBAUT s'avère fiable pour la détermination du rayonnement solaire global.

La **figure 16** représente la variation de l'irradiation solaire journalière dans RETScreen.



**Figure 163: Données de simulation sous RETScreen**

RETScreen est un logiciel de gestion d'énergie propres très utilisé à Canada. En comparant nos résultats (**figure 14**) avec celle de ce logiciel, nous pouvons dire que les valeurs sont presque identiques avec une différence l'ordre de  $0.5\text{kWh/m}^2/\text{j}$ . Pour obtenir des données dans RETScreen, il suffit de choisir le site qui est déjà intégré dans ce logiciel. Il n'est qu'est 41 districts Malgache. Malgré, Ambositra n'est pas inclus et on utilise Fandriana comme référence de la Station.

## 5. Conclusion

Ce travail vise à concevoir une interface très simple à utiliser pour estimer le rayonnement solaire pour n'importe quel site et pour n'importe quelle orientation et inclinaison. Les coordonnées géographiques et les paramètres météorologiques sont les données utilisées pour le calcul. Nous devons insérer le temps légal et la date. Il suffit de choisir le mois et le type du ciel. Ce logiciel calcule les valeurs de la déclinaison horaire, l'angle horaire, la hauteur du soleil, l'azimut, le rayonnement global ainsi qu'irradiation solaire journalière. Les résultats numériques sont représentés graphiquement et les données obtenues sont enregistrées dans une base de données et nous pouvons l'ouvrir en feuille Excel pour faciliter l'analyse.

. Nous avons enregistré pour le cas d'Ambositra avec une valeur moyenne journalière de  $5.54\text{kWh/m}^2/\text{j}$ . Il prend sa valeur optimale en mois de novembre environ  $6.89\text{kWh/m}^2/\text{j}$  tandis que le mois de juin est le plus faible environ  $3.87\text{kWh/m}^2/\text{j}$ .

Pour la validation de notre logiciel, nous avons comparé nos valeurs avec celle dans le logiciel RETScreen. Les résultats obtenus sont très satisfaisants et nous pouvons dire que le logiciel réalisé est un outil intéressant et indispensable.

### Références bibliographiques

Alain Ricaud. Gisement solaire et transferts énergétiques, France. Pages 27, 2011.

Energy Information Administration (EIA), 2018 <http://www.eia.gov>

Fatiha Yettou. Etude et conception d'un logiciel de calcul de l'éclairement solaire en Algérie. Page 5, 2011.

Luis MERINO. Modélisation du rayonnement solaire pour la simulation thermique en milieu urbain. Pages 12, 2013.

M.R Yaïche. Estimation du rayonnement solaire global en Algérie pour différents types de ciel. Page 2, 2010.

Moummi Nouredine. Réalisation d'une interface de simulation des performances des isolateurs plans. Page 39, 2012.

Samuel DE SOUSA. Ingénierie, synthèse et étude de chromophores organiques et organométalliques pour cellules solaires à colorant. Université de Bordeaux ,2013.

Yves Jannot,. Thermique solaire, Pages 16,17, 2011



# RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Akbari H., R. Levinson, and P. Berdahl. ASTM Standards for Measuring Solar Reflectance and Infrared Emittance of Construction Materials and Comparing their Steady-State Surface Temperatures, Lawrence Berkeley National Laboratory. 2015.

<https://www.osti.gov/scitech/biblio/432933>

Akbari, H., S. Davis, S., S. Dorsano, J. H. & al, e., 1992. Cooling our communities: A guide book on tree planting and light-coloured surfacing. United States Environmental Protection Agency EPA, Berkeley (CA) USA. <http://repositories.cdlib.org/lbnl/LBL-31587>

AKROUCHE A., Étude du stockage et déstockage d'énergie dans un matériau à changement de phase, Mémoire de Magister, Université M'Hamed Bougara, Boumerdes, École des mines de Nantes-France, 2011. <https://docplayer.fr/56795958>

Akram Rosheidat, Harvey Bryan. Optimizing the effect of vegetation for pedestrian thermal comfort and urban heat island mitigation in a hot arid urban environment. New York City, 2010. <https://www.researchgate.net/publication/266496235>

Alberto Muscio, Hashem Akbari. An index for the overall performance of opaque building elements subjected to solar radiation. In Energy and Buildings, Volume 157, 7 January 2017, Pages 184–194. <https://doi.org/10.3390/atmos12070862>

André B. De Vriendt. La transmission de la chaleur Volume 1 Tome 2. 1990

Anna Laura Pisello et al., State of the art on the development of cool coatings for buildings and cities in Solar Energy, Volume 144, 1 March 2017, Pages 660-680.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.068>

Anquez, P. & Herlem, A., 2011. Les îlots de chaleur dans la région métropolitaine de Montréal : causes, impacts et solutions : Chair de responsabilité sociale et de développement durable ESG UQAM.

Arsonina BERA, A. RATIARISON, N.R. ARINAVALONA, Jean HARY. L'îlot de chaleur dans la ville d'Antananarivo et ses conséquences sur la pluviométrie dans cette ville. In Afrique SCIENCE 14 (2) (2018) 186 – 196.

Artid Ponyakan, Manaskorn Rachakornkij. Potential Use of Plastic Waste for Low Thermal Conductivity Concrete. In Materials 2018. <https://doi.org/10.3390/ma11101938>

Asaeda, Takashi. CA, Vu thanh. Wake, Akio. Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere. *Atmospheric Environment*, vol.30, n°3,1996, p.313-427.

[https://doi.org/10.1016/1352-2310\(94\)00140-5](https://doi.org/10.1016/1352-2310(94)00140-5)

ASHRAE, 2009. American society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers. ASHRAE handbook fundamentals, ISBN 978-1-933742-54-0.

ASTE N. et al. The influence of the external wall's thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings, *Energy and Buildings*, volume 41, issue 11, pages 1181-1187, 2009.

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.06.005>

Atelier Parisien d'Urbanisme, Les îlots de Chaleur Urbains à Paris cahier 1, 2012.

<https://www.apur.org/fr/nos-travaux/ilots-chaueur-urbains-paris-cahier-1>

Atelier Parisien d'Urbanisme, Les îlots de Chaleur Urbains à Paris cahier 2 : Simulations climatiques de trois formes urbaines parisiennes et enseignements, 2014.

Atelier Parisien d'Urbanisme, Les îlots de Chaleur Urbains du cœur de l'agglomération parisienne cahier 3 : brises thermiques, 2017

Atelier Parisien d'Urbanisme, Les îlots de Chaleur Urbain à Paris cahier 4 : Influence climatique de revêtement de sol à Paris, 2017

Athamena, K., 2012. Modélisation et simulation des microclimats urbains : étude de l'impact de la morphologie urbaine sur le confort dans les espaces extérieurs. Cas des éco-quartiers., École centrale de Nantes : Thèse de doctorat. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.34949.76004>

ATLAS, USAID. Madagascar face aux changements climatiques. Mars 2018.

ATLAS, USAID. Risques climatiques dans les zones urbaines et en voie d'urbanisation à Madagascar. Mars 2018.

Baran Tufun, Mete Kun. Thermal Insulation Performance and Thermal Conductivity Evaluation of Natural Stones by Infrared Thermography. In *Proceeding of the International Conference on Mining, Material and Metallurgical Engineering*, 2014, Czech Republic.

<https://www.researchgate.net/publication/273009754>

Berdahl, P. & Bretz, S. E., 1997. Preliminary Survey of the Solar Reflectance of Cool Roofing Materials. *Energy & BUilding* 25, pp. 149-158.

[https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)01004-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)01004-3)

Bernardo B. da Silva<sup>1</sup>, Alexandra C. Braga, Célia C. Braga. Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. v.20, n.1, p.3-8, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n1p3-8>

Billoux, N. Sas, C. Millardet. Développement et validation d'une méthodologie de quantification des images planaires. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mednuc.2016.03.100>

Bouyer, J., 2009. Modélisation et simulation des microclimats urbains - Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments. Thèse de doctorat, l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes.

<https://www.researchgate.net/publication/39064174>

Brattebo, B., Booth, B.D. (2003) Long-term storm water quantity and quality performance of permeable pavement systems, *Water research*, Vol. 37, No. 18, pp. 4369-4376.

[https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00410-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00410-X)

Bröde, P., Jendritzky, G., Fiala, D. & Havenith, G., 2010. The Universal Thermal Climate Index.

UTCI in Operational Use. Proceedings of Conference: Adapting to Change: New Thinking on Comfort Cumberland Lodge, Windsor, UK, 9-11 April 2010. London.

<http://dx.doi.org/10.2486/indhealth.2012-0098>

Brophy, V. et al., 2000. Sustainable urban design. Energy Research Group, with the support of the European Commission, Directorate-General Energy and Transport.

Canorel, F., 2009. Géographie sociale et politiques territoriales de développement durable.

Carlos-Wilber Pena Puesan, Joan-Lluis Zamora Mestre, Technical Evaluation of an Improved Paint Coating with NIR Pigments Designed to Reduce Thermal Discomfort Caused by Incident Solar Radiation: Application in the Caribbean Area, in *Energy Procedia*, Volume 115, February 2017 pages 463–479. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.043>

Carlsaw H.S., J.C. Jaeger. *Conduction of Heat in Solids*, Oxford University Press, London, 1959.

Chandler, T., 1970. Selected bibliography on urban climate. Tech. Note No. 155, WMO No. 276, World Met. Organize., Geneva., p. 383.

Chandler, T. J., 1976. The climate of towns, Ch. 14 in the 'The Climate of the British Isles', Longman, pp. 307-329. London.

Colombert Morgane. Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville. In HAL archives –ouvertes. 2008, École Doctorale Ville et Environnement, Université Paris-Est.

<https://www.researchgate.net/publication/43041374>

Coutts A.M., Beringer J., Tapper N. (2008) Changing urban climate and CO<sub>2</sub> emissions: implications for the development of policies for sustainable cities, Urban Policy and Research, In Press. <http://dx.doi.org/10.1080/08111140903437716>

Dasaraden Mauree, Emanuele Naboni, Silvia Coccolo, A.T.D. Perera, Vahid M. Nik, Jean-Louis Scartezzin. A review of assessment methods for the urban environment and its energy sustainability to guarantee climate adaptation of future cities, in Renewable and Sustainable Energy Reviews 112 (2019) 733–746. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.005>

David Fueyo-Rodriguez, Laurent Vandervelde, Benjamin Van Bocxlaer, Julien André. Ilots de Chaleur Urbain. Facultés de Science-Département Géosciences, Environnement et sociétés, 2017.

David R. LIDE. CRC Handbook of Chemistry and Physics. 90th edition 2009-2010.

Deléglise I., C. L'héret, Comment la terre est-elle chauffée par le soleil ? CNRS, 11p.

DREAL PACA -TRIBU – Coût global des espaces publics, Fiche technique n °06, France.

Doulos, L., Santamouris, M. & Livada, Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials. Solar energy, Volume 77(2), 2004, p. 231–249.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.04.005>

EMANUELE H. et al., Definition of parameters useful to describe dynamic thermal behaviour of hollow bricks, 72<sup>nd</sup> Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, Lecce-Italy, Energy Procedia, volume 126, pages 50 – 57, 2017.

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.056>

Escourrou, G., 1991. Le climat et la ville. Presses universitaires., Paris: Nathan.

Evyatar Erell, Daniel Boneh, David Pearlmutter, Pua Bar-Kutiel. Effect of High albedo Materials on Pedestrian Thermal sensation in urban street Canyons in Hot climates, Sustainable Architecture for a Renewable Future, 29th Conference, Munich, Germany 10-12 September 2013. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2013.10.005>

Fahed Jeff. Étude numérique du potentiel de rafraîchissement des techniques de réduction des îlots de chaleur urbain (ICU) sous climat méditerranéen. In HAL archives –ouvertes. 2018, École doctorale : MEGEP - Mécanique, Énergétique, Génie civil, Procédés. Toulouse.

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02003346>

Family Roxana, M. Pinar Mengüç, Analysis of Sustainable Materials for Radiative Cooling Potential of Building Surfaces, in Sustainability, 10, 3049, 28 August 2018

Family Roxana, M. Pinar Mengüç, Materials for Radiative Cooling: A Review, In Procedia Environmental Sciences 38 (2017) 752 – 759. <http://dx.doi.org/10.3390/su10093049>

Fanger, P., 1972. Thermal Comfort. New York, USA: McGraw Hill place City Book. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.658>

Fanger, 1982. Thermal comfort. Malabar, FL, USA: Robert E. Krieger Publishing Company.

Fiala, D., Lomas, K. & Stohrer, M., 1999. A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: The passive system. Journal of Applied Physiology, Volume 87, pp. 1957-1972. <http://dx.doi.org/10.1152/jappl.1999.87.5.1957>

Filippo Pratico, Concettina Marino, Marinella Giunta. Pavement albedo and sustainability: An experimental investigation. University Mediterranea, Reggio Calabria, Italy. 2017. <https://www.researchgate.net/publication/284726139>

Gabriel TETEKA, Cathérine NSIAMI, Donatien KALOMBO. Estimation de l'albédo de surface avec LANDSAT 8 OLI : Application sur la scène de la ville de Lubumbashi et ses environs. In Geo-Eco-Trop., 2020, 44, 3 : 459-465, République Démocratique du Congo.

Gabrielle van DURME et Michel ERPICUM. Variabilité spatio-temporelle de l'albédo. Analyse menée à la résolution métrique. Bulletin de la Société géographique de Liège, 46, 2005, 27-35. <https://www.researchgate.net/publication/239549299>

Gagge, A., Stolwijk, J. & Nishi, Y., 1971. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. ASHRAE Transactions, Volume 77, p. 247–257.

Germany Climate Services Center (GERICS). 2015. Climate Fact Sheet, Madagascar.

Geros, V. Santamouris, M. Karatasou, S. Tsangrassoulis, A. Papanikolaou, N. On the cooling potential of night ventilation techniques in the urban environment. Energy and buildings, vol. 37, 2005, p. 243-257. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.06.024>

Giovannini André, Benoît Bédard. Transfert thermique. 2012.

GIVONI, B. L'Homme, l'Architecture et le Climat. Paris : Éditions du Moniteur, 1978, 460 p.

GIVONI, B. Climate considerations in building an Urban Design. John Wiley & Sons, 1998, 480 p.

Giuseppe Rossi, Paola Iacomussi, Michele Zinzi. Lighting implications of urban mitigation strategies through cool pavements: Energy savings and visual comfort. In *Climate*, 7 April 2018, 6-26. <http://dx.doi.org/10.3390/cli6020026>

Habiba TEBBANI, Yasmina BOUCHAHM. Caractérisation du confort thermique dans les espaces extérieurs : Cas de la ville d'Annaba. Laboratoire ABE (Architecture Bioclimatique et Environnement), Université Constantine 3, Constantine, Algérie. 2016.

<https://www.researchgate.net/publication/323840400>

Hailu Yang, Kai Yang, Yinghao Miao, Linbing Wang, Chen Ye. Comparison of potential contribution of typical pavement materials to heat island effect, In *Sustainability*, 12, 4752, 10 June 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/su12114752>

Hanafi A. et D. Alkama. Stratégie d'amélioration du confort thermique d'une place publique d'une ville saharienne 'Biskra/Algérie'. In *Revue des Énergies Renouvelables* Vol. 19 N°3 (2016) 465 – 480. Algérie. <https://www.researchgate.net/publication/317259488>

Hanafi A. et D. Alkama. Vers la meilleure solution d'optimisation du confort thermique des places publiques de la ville de Biskra/Algérie. In *Revue des Énergies Renouvelables* Vol. 22 N°2 (2019) 189 – 204. <https://www.asjp.cerist.dz/en/article/127809>

Hendel Martin, Laurent Royon. The effect of pavement-watering on subsurface pavement temperatures. *Urban Climate*, Elsevier, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.10.006>

Hendel Martin, Morgane Colombert, Arnaud Grados, Youssef Diab, Quel est le meilleur revêtement pour limiter la formation des îlots de chaleur urbains ? in *ResearchGate*, 19 mai 2016. <https://www.researchgate.net/publication/277588295>

Hendel Martin, Morgane Colombert, Youssef Diab, Laurent Royon. An analysis of pavement heat flux to optimize the water efficiency of a pavement-watering method. 2015.

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.11.060>

Hendel Martin. Pavement-Watering in Cities for Urban Heat Island Mitigation and Climate Change Adaptation: A Study of its Cooling Effects and Water Consumption in Paris. *Engineering Sciences*. Université Paris Diderot Paris 7, 2015.

<https://www.researchgate.net/publication/291374813>

HONGOIS S. Stockage de chaleur inter-saisonnier par voie thermo-chimique pour le chauffage solaire de la maison individuelle, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2011.

Honjo, T., 2009. Thermal comfort in outdoor environment. *Global Environmental Research*, Volume 13, pp. 43-47. <https://www.researchgate.net/publication/228521038>

Höppe, P., 1993. Heat balance modelling. *Experientia*, Volume 49, p. 741–746.

<https://doi.org/10.1007/bf01923542>

Howard, L., 1833. *The Climate of London*, Vols. I- III. London.

<https://www.researchgate.net/publication/292141041>

Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement (IBGE). *Pierre naturelle*, 2011a, Bruxelles.

Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement (IBGE). *Pavés de béton*, 2011b, Bruxelles.

Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement (IBGE). *Asphalte*, 2011c, Bruxelles.

Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement (IBGE). *Béton coulé*, 2011d, Bruxelles.

Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement (IBGE). *Choisir les matériaux de revêtement de sol en fonction de leur impact environnemental*, 2011, Bruxelles.

Jean-Philippe, Y. AUDA, E. MARTIN. DART : modèle 3D de simulation du bilan radiatif et d'images de télédétection de paysages urbains et naturels. In *Actes des JSIRAUF*, Hanoi, 6-9 novembre 2007. France. <https://www.researchgate.net/publication/29601483>

Janet F. Barlow, Progress in observing and modelling the urban boundary layer, in *Urban Climate* 10 (2014) 216–240. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.03.011>

JEAN LOUIS I., *L'inertie thermique dans le bâtiment*, Laboratoire ABC – ENSA Marseille, 2006.

Jiachuan Yang, Zhi- Hua Wang, Kamil E. Kaloush, Heather Dylla. Effect of Pavement Thermal Properties on Mitigating Urban Heat Islands: A Multi-scale Modelling Case study in Phoenix. USA, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.021>

Jiarong Wang, Zhengqi Zhang, Datong Guo, Cheng Xu, Ke Zhang. Study on cooling effect and pavement performance of thermal- resistant asphalt mixture. In *Advances in Materials Science and Engineering*, Article ID 6107656, 24 December 2018.

<http://dx.doi.org/10.1155/2018/6107656>

Johanna Salvant. Caractérisation des propriétés physico-chimiques des matériaux de peinture employés par Van Gogh : les peintures blanches. In HAL archives. 2013. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00834371>

Jooseng Gavin\_Gui, Phelan Patrick E, Kaloush Kamil E, Golden Jay S. Impact of Pavement thermophysical properties on surface temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:8\(683\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:8(683))

Jooseng Gui, Joby Carlson, Patrick E. Phelan, Kamil E. Kaloush. Impact of pavement thickness on surface diurnal temperatures. In Journal of Green Building. Arizona, 2021.

<https://doi.org/10.3992/jgb.2.2.121>

Karlessi T, Santamouris M, Apostolakis K, Synnefa A, Livada I. Development and testing of thermochromic coatings for buildings and urban structures. Solar Energy 2009 ;83(4) :538–51.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.005>

KASTENDEUCH P., NAJJAR G., PHILIPS N. Mesure pour l'étude des ambiances climatique à Strasbourg lors de la canicule de juillet 2015. 2015, France.

<https://www.researchgate.net/publication/293485529>

Kerstin Sommer, Joseph Guiébo, Nicolas Maréchal. Madagascar : Profil urbain d'Antananarivo. ONU et HABITAT. 2012.

Konstantinos Gobakis, Dionysia Kolokotsa, Noni Maravelaki-Kalaitzaki, Stratos Lionakis, Vasilios Perdikatsis, Matheos Santamouris. Development and analysis of inorganic coating for energy saving for buildings, 2013, Greece, 10p. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.081>

LAGHZAOU A., Stockage de chaleur : Energie solaire et autres applications, Etude bibliographique, Ecole des mines de Douai, 2010.

Liebard A. et al., traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique ; concevoir, édifier et aménager avec le développement durable, édition du moniteur, 2005.

Lucas Landier. Modélisation 3D du bilan radiatif des milieux urbains par inversion d'images satellites en cartes de réflectance et de température des matériaux urbains. In HAL archives – ouvertes. 2019, Université Toulouse 3 Paul Sabatier.

<https://www.researchgate.net/publication/328799817>

MAHTP, JICA. Plan d'urbanisme directeur de l'agglomération d'Antananarivo 2019.

Ma Y, Zhu B, Wu K. Preparation and solar reflectance spectral of chameleon type building coatings. Journal of Solar Energy 2001; 70:417–22. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00160-2](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00160-2)

Ma Y, Zhang X, Zhu B, Wu K. Research on reversible effects and mechanism between the energy-absorbing and energy-reflecting states of chameleon type building coatings. Journal of Solar Energy 2002; 72 :511–20. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(02\)00029-4](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(02)00029-4)

Marina Popovic. Potentiel des événements climatiques à l'échelle “ pico ” pour l'amélioration du confort thermique piétonnier. Architecture, aménagement de l'espace. École centrale de Nantes, 2017. Français. <https://www.researchgate.net/publication/333475078>



Marquardt Donald. An algorithm for least squares estimation of non-linear parameters, Soc. Ind. Appl. Math. Volume 11, 1963, 431–441. <https://www.jstor.org/stable/2098941>

Matthew R Hall1, Pejman Keikhaei Dehdezi, Andrew R Dawson, James Grenfell, Riccardo Isola. Influence of the thermo-physical properties of pavement materials on the evolution of temperature depth profiles in different climatic regions, Faculty of Engineering, University of Nottingham, University Park, 2010, 51p.

[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000357](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000357)

Maxime Frere, Martin Hendel, Laurent Royon. Couplage de matériaux frais, perméables et arrosage urbain : Évaluation d'un démonstrateur d'îlot de fraîcheur urbain. In HAL archives – ouvertes. Octobre 2020. France. <https://www.researchgate.net/publication/344708055>

Maxime Doya. Analyse de l'impact des propriétés radiatives de façades pour la performance énergétique de bâtiments d'un environnement urbain dense. In HAL archives –ouvertes, 2010, École Doctorale Sciences pour l'Environnement Gay Lussac.

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00537691v1>

MDG-INSTAT-RGPH2018. Résultats globaux du recensement général de la population et de l'habitation de 2018 de Madagascar.

Mélissa Giguère. Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains. Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels, Institut national de santé publique du Québec. 2009.

Michael Zettl, High performance coatings for solar receivers and new dedicated manufacturing solution. In Energy Procedia, Volume 48, September 2013, pages 701 – 706.

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.081>

Ministère du développement durable et des parcs (MDDEP) (2006) Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2003 et évolution depuis 1990.

Mohammad T., Umberto B. The effect of pavement characteristics on pedestrian's thermal comfort in Toronto. In Urban Climate, 2017, US.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2017.05.007>

Mohammed Chérif LEHTIHET. Amélioration des microclimats des villes par la prolifération des terrasses et toitures végétalisées en zones aride et méditerranéenne. 2018, Université Mohammed Seddik BENYAHIA, Algérie.

<http://dspace.univ-jijel.dz:8080/xmlui/handle/123456789/3808>

Mouada Nassima. Étude de l'impact de la morphologie urbaine sur le confort thermique et la marchabilité dans les espaces publics extérieurs. Cas de la ville de Sidi Okba. Thèse de doctorat, Architecture, Environnement et Patrimoine, Université Mohamed Khider, Algérie. 2020

<http://thesis.univ-biskra.dz/id/eprint/5308>

Munck, D. et al., 2010. Projet CLIM2 Climat urbain et climatisation.

NAJJAR Georges, Pierre KASTENDEUCH, Pierre GRUSSENMEYER. Topographie et climatologie urbaine. In Revue XYZ • N° 123 – 2ème trimestre 2010.

<https://www.researchgate.net/publication/309637611>

ND-GAIN. 2015. Notre Dame Global Adaptation Index, Vulnerability and Readiness, Madagascar.

Nicolas LALANNE, Modélisation des échanges thermiques et radiatifs en environnement urbain à très haute résolution spatiale : aide à l'interprétation des mesures par télédétection infrarouge, 2015, Mécanique – Énergétique, Université d'Aix-Marseille, 194 p.

<https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01235688>

Nikolopoulou, M., 2004. Concevoir des espaces extérieurs en environnement urbain : une approche bioclimatique. Résultats du projet RUROS (Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces), Centre for Renewable Energy Sources (C.R.E.S).

<https://www.academia.edu/25050855>

Oke, T., 1976. The distinction between canopy and boundary layer urban heat islands. ATMOSPHERE, Volume 14, pp. 268-277. <https://doi.org/10.1080/00046973.1976.9648422>

Oke, T., 1981. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. International Journal of Climatology, 1(3), pp. 237-254.

<http://dx.doi.org/10.1002/joc.3370010304>

OKE, T., 1982, b. Overview of interactions between settlements and their environments, WMO experts meeting on Urban and Building climatology, WPC-37, WMO, Genève.

Oke, T., 1982. The energetic basis of the urban heat island. QUARTERLY JOURNAL OF THE ROYAL METEOROLOGICAL SOCIETY, Volume 108, pp. 1-24.

<http://dx.doi.org/10.1002/qj.49710845502>

Oke, T., 1987. Boundary layer climates. London: 2<sup>nd</sup> edition.

<https://doi.org/10.4324/9780203407219>

Oke, T., 1988. Street design and urban canopy layer climate. Energy and building, Volume 11(1), pp. 103-113. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(88\)90026-6](https://doi.org/10.1016/0378-7788(88)90026-6)

Oke, T., Bailey, W. G. & R, R. W., 1997. Urban environments. The surface climates of Canada McGill. Queens University Press, Montreal 303–27. <https://www.jstor.org/stable/j.ctt7zmr8>

ONU-Habitat. Madagascar : Profil Urbain d’Antananarivo. 2018. Page 4.

OSIŃSKA-SKOTAK K. Application de la télédétection et des techniques de systèmes d’information géographique dans les études du climat urbain. Institut de Photogrammétrie et Cartographie, Ecole Polytechnique de Varsovie.

<https://www.researchgate.net/publication/260228235>

Ouarda Mansouri. L’influence de la réflectivité des matériaux (albédo) sur la modification du microclimat et le confort thermique extérieur dans un canyon urbain, 2008, Algérie, 253p.

Ouarda Mansouri, Rafik Belabi, Fatiha Bourbia, Albedo effect of external surfaces on the energy loads and thermal comfort in buildings, in Energy Procedia, Volume 139, May 2016, Pages 571-577. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.255>

Pachauri, R.K., Reisinger. Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième rapport d’évacuation du Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat. GIEC, Genève, 103p.

Pierre KASTENDEUCH, Georges NAJJAR, Nicolas RINGENBACH. Modélisation du bilan radiatif et d’énergie d’un canyon urbain à Strasbourg. In Climatologie, vol. 3, 2006. France.

<http://dx.doi.org/10.4267/climatologie.677>

Pierre P. KASTENDEUCH, Georges NAJJAR. Une simulation des interactions ville-atmosphère à différentes échelles : Application sur Strasbourg. In Climatologie, vol. 12 (2015).

Université de Strasbourg. <https://doi.org/10.4267/climatologie.1118>

Pigeon, G., Legain, D., Durand, P. & Masson, V., 2007. Anthropogenic heat release in an old European agglomeration (Toulouse, France). International Journal of Climatology, Volume 27, pp. 1969-1981. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1530>

Pigeon, G., Lemonsu, A., Masson, V., Hidalgo, J. (2008) De l’observation du microclimat urbain à la modélisation intégrée de la ville, La Météorologie, No. 52, pp. 39-47.

<http://dx.doi.org/10.4267/2042/19174>

POMERANTZ, M. PON, B. AKBARI, H. CHANG, S.-C. The Effect of Pavements’ Temperatures On Air Temperatures in Large Cities. Avril 2000, 22 p.

<http://eetd.lbl.gov/HeatIsland/PUBS/2000/43442rep.pdf>

PPCR. 2017. First Joint Programming Mission Support Madagascar towards developing its Strategic Program for Climate Resilience under the Pilot Program for Climate Resilience (PPCR).

RADANIELINA Miharintsoa. Microclimat urbain : phénomène d'îlot de chaleur et confort thermique mise en évidence et variabilité spatiale sur l'agglomération d'Antananarivo. 2019.

Rafiee A., E. Dias, E. Koomen. Analysing the impact of spatial context on the heat consumption of individual households, in Renewable and Sustainable Energy Reviews 112 (2019) 461–470. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.033>

ROBERTS, Sarah M. OKE, TR. VOOGT, JA. GRIMMOND, CSB. LEMONSU, A. Energy storage in a European city centre. In Fifth International Conference on urban climate, Lodz, Pologne, 1-5 September 2003.

Roesler Jeffery, Sushobhan Sen. Impact of pavements on the urban heat island, Centre for Highway Pavement Preservation, October 2016, University of Illinois at Urbana-Champaign. 112p. <http://dx.doi.org/10.14716/ijtech.v9i8.2755>

ROSENFELD, Arthur H. AKBARI, Haschem. BRETZ, Sarah. Mitigation of urban heat island: materials, utility programs, updates. Energy and Buildings, n°22, 1995, p. 255-265. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(95\)00927-P](https://doi.org/10.1016/0378-7788(95)00927-P)

Rositsa Petkova-Slipets, Penka Zlateva. Thermal properties of a new pavement material for using in road construction. 2018. In Civil and Environmental Engineering, Volume 14, Issue 2/2018, 99-104. <https://doi.org/10.2478/cee-2018-0013>

Rushton, B. T. (2001) Low-impact parking lot design reduces runoff and pollutant loads. Vol. 127, No. 3, pp. 172-179. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2001\)127:3\(172\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2001)127:3(172))

Sahar Sodouti, Ulrich cubasch. Using the ENVI-MET program to simulate the micro climate in new town HASHTGERD. In ResearchGate, 11 September 2014. <http://dx.doi.org/10.13140/2.1.1739.2005>

Samir Boutabb, Abdallah Farhi, Boutabba Hynda, Mili Mohamed. Bilan thermique humain dans les espaces urbains a climat chaud et sec : Cas de la ville de Sidi-Okba. 2007, Algérie. <https://www.researchgate.net/publication/348339279>

Samira LOUAFI BELLARA, Saliha ABDYOU. Effet de l'ombrage sur le confort thermique et visuel dans les espaces extérieurs : cas de l'esplanade de l'Université Mentouri de Constantine, Est de l'Algérie. Laboratoire ABE (Architecture Bioclimatique et Environnement), Université Mentouri Constantine, Algérie. 2011. <https://www.researchgate.net/publication/323966282>

Santamouris M., Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volume 26, 20 May 2013, pages 224–240.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>

Santamouris M, Synnefa A, Karlessi T. Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy* 2011 ;85 :3085–102. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.023>

Saudreau M., Pierre Kastendeuch, Jérôme Ngao. Régulation du climat thermique urbain par les arbres : ombrage et température du couvert. In HAL archives –ouvertes. Juin 2020. France.

<https://hal.inrae.fr/hal-02743096>

Sébastien LE FOLL, Agnès DELMAS, Frédéric ANDRÉ, Identification des propriétés radiatives et du champ de température de matériaux fibreux de faible densité : Application aux barrières thermiques hautes températures, Université de Lyon, CNRS, CETHIL, INSA Lyon, UMR5008, F-69621, France, 9p. <https://www.researchgate.net/publication/281076491>

Sen Sushobhan, Jeffery Roesler, Benjamin Ruddell. Cool Pavement Strategies for Urban Heat Island Mitigation in Suburban Phoenix, Arizona. *Sustainability* 2019, 11, 4452.

<http://dx.doi.org/10.3390/su11164452>

Sen, S.; Roesler, J. Microscale heat island characterization of rigid pavements. *Transp. Res. Rec.* 2017, 2639, 73–83. <http://dx.doi.org/10.3141/2639-10>

Shengyang Wang. Pavement albedo assessment: Methods, aspects, and implication. Iowa State University, 2015. <https://doi.org/10.31274/ETD-180810-4502>

Stehfest H., Numerical inversion of Laplace transform, *Comm. ACM*, 13(1), p. 47-49, 1970.

<https://doi.org/10.1145/361953.361969>

Stéphane Thiers, Bruno Peuportier, Modélisation thermique d'un échangeur air-sol pour le rafraîchissement de bâtiment, Journée thématique SFT-IBPSA : froid solaire et confort d'été.

<https://www.researchgate.net/publication/266461424>

Synnefa, A. Dandou, M. Santamouris and M. Tombrou, Cool coloured coatings for passive cooling of cities. International Workshop on Energy Performance and Environmental Quality of Buildings, July 2006, Milos island, Greece.

<https://www.researchgate.net/publication/254292325>

Synnefa A., Dandou A., M. Santamouris, M. Tambrou. On the use of cool materials as a heat island mitigation strategy. In *Journal of applied meteorology and climatology*, vol 47, 2008, Greece. <https://doi.org/10.1175/2008JAMC1830.1>

Synnefa Afroditi, Theoni Karlessi, Niki Gaitani, Mat Santamouris. Measurement of optical properties and thermal performance of coloured thin layer asphalt samples and evaluation of their impact on the urban environment. Department of Applied Physics, Physics Department, 2010, Greece, 12p. <https://www.researchgate.net/publication/228794095>

TAHA, H. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings*. vol.25, n°2, 1997(a), p. 99-103.

[https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)00999-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)00999-1)

TAHA, Haider. Modeling the impacts of large-scale albedo changes on ozone air quality in the south coast air basin. *Atmospheric Environment*, vol.31, n°11, 1997(b), p. 1667-1676.

[https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(96\)00336-6](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(96)00336-6)

Tasneem Tariq, M.Arch. An ENVI-met Simulation Study on Urban Open Spaces of Dhaka, Bangladesh. Department of Architecture, Bangladesh University of Engineering and Technology (BUET), Dhaka, Bangladesh. 2014.

<https://www.researchgate.net/publication/338197528> *An ENVI-met*

Tiago Souto, Margarida Almeida, Vítor Leal, João Machado and Adélio Mendes, Total Solar Reflectance Optimization of the External Paint Coat in Residential Buildings Located in Mediterranean Climates, *Energies* 2020, 13, 2729. <http://dx.doi.org/10.3390/en13112729>

Tina Pourshams-Manzouri. Pavement Temperature Effects on Overall Urban Heat Island. Arizona, 2013.

Tiziana Susca, Enhancement of life cycle assessment methodology to include the effect of surface albedo on climate change: Comparing black and white roofs. In *Environmental Pollution*, volume 163, 11 December 2011, pages 48-54.

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.12.019>

Tzu-Ping Lin, Andreas Matzarakis, Ruey-Lung Hwang, Ying-Che Huang. Effect of pavements albedo on long-term outdoor thermal comfort. 2012, Taiwan.

<https://www.researchgate.net/publication/262562147>

United States Environmental Protection Agency (USEPA) (2008) Ground-level ozone: health and environment. USEPA. <http://www.epa.gov/air/ozonepollution/health.html>

Vinet, J., 2000. Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs. Thèse de doctorat, Ecole polytechnique de l'université de Nantes.

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00490049>

Vooght, J. & Oke, T., 2003. Thermal Remote Sensing of Urban Climates. *Remote Sensing of Environment*, Volume 86, Issue 3, pp. Pages 370-384.

Wijewardane S., D.Y.Goswami, A review on surface control radiation by paints and coatings for new energy application, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 16, Issue 4, May 2012, Pages 1863-1873, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.046>

Wong Chung Wan, Wong Nyuk Hien, Tan Phay Ping, Aw Zhi Wei Aloysius, A Study of the Effectiveness of Heat-Mitigating Pavement Coatings in Singapore, In *Journal of Heat Island Institute International Vol.7-2* (2012).

Yavuzturk C., K. Ksaibati, Assessment of Thermal Stresses in Asphalt Pavements Due to Environmental Conditions, April 2006, Department of Civil and Architectural Engineering University of Wyoming, 53p.

Youssou Traore, Alassane Dienne, Séni Tamba. Etude du transfert de chaleur à travers une chaussée en régime dynamique fréquentiel : l'influence de paramètres intrinsèques. *International Journal of Innovation and Applied Studies* 20 (2), 616, 2017.

Yves Jannot. *Théorie pratique de la métrologie thermique*. 2011.

Yves Jannot, Alain Degiovanni. An improved model for the parallel hot wire: Application to the thermal conductivity measurement of low-density insulating materials at high temperature. In *International Journal of Thermal Sciences* 142 (2019) 379–391.

<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.04.026>

# ANNEXE

## ANNEXE 1

### Équations de transmission de chaleur par conduction

Le transfert de chaleur dans cette paroi plane est unidirectionnel.

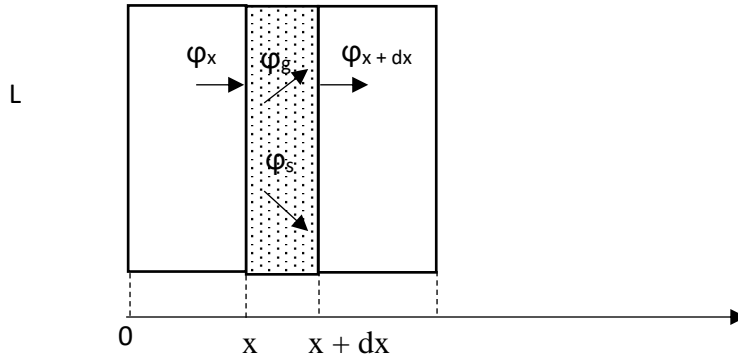


Figure 164: Bilan thermique sur un système élémentaire

On a un système d'épaisseur  $dx$  dans la direction  $x$  et de section d'aire  $S$  normalement à la direction  $Ox$ . Le transfert de chaleur dans le solide s'effectue par conduction, il est régi par la loi de Fourier :

$$\varphi = -\left(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x}\right)$$

Le bilan d'énergie sur ce système s'écrit :

$$\varphi_x + \varphi_g = \varphi_{x+dx} + \varphi_s$$

$$\text{Avec } \varphi_x = -\left(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x}\right)_x \text{ et } \varphi_{x+dx} = -\left(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x+dx}$$

$$\varphi_g = \dot{q} S dx$$

$$\varphi_s = \rho C_p S dx \frac{\partial T}{\partial t}$$

En reportant dans le bilan d'énergie et en divisant par  $dx$  :

$$\frac{\left(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x+dx} - \left(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x}\right)_x}{dx} + \dot{q} S = \rho C_p S \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$\text{Soit } \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{q} S = \rho C_p S \frac{\partial T}{\partial t}$$

Dans le cas tridimensionnel, nous obtenons l'équation de la chaleur dans le cas le plus général :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho C \frac{\partial T}{\partial t}$$



## ANNEXE 2

### Tableau 49: Fonctions et équations de Bessel

x	$I_0(x)$	$I_1(x)$	$K_0(x)$	$K_1(x)$	x	$I_0(x)$	$I_1(x)$	$K_0(x)$	$K_1(x)$
0	1,0000	0,0000	∞	∞	3,0	4,881	3,953	0,035	0,041
0,1	1,0025	0,0501	2,247	9,849	3,1	5,294	4,326	0,031	0,036
0,2	1,01	0,1005	1,753	4,775	3,2	5,747	4,734	0,028	0,031
0,3	1,226	0,1517	1,373	3,057	3,3	6,243	5,181	0,025	0,028
0,4	1,0404	0,204	1,115	2,185	3,4	6,785	5,67	0,022	0,025
0,5	1,0635	0,2579	0,924	1,656	3,5	7,378	6,206	0,019	0,022
0,6	1,092	0,3137	0,778	1,302	3,6	8,028	6,793	0,017	0,020
0,7	1,1263	0,3719	0,660	1,051	3,7	8,739	7,436	0,016	0,017
0,8	1,1665	0,4329	0,565	0,862	3,8	9,517	8,14	0,014	0,016
0,9	1,213	0,4971	0,487	0,716	3,9	10,369	8,913	0,013	0,014
1,0	1,2661	0,5652	0,421	0,602	4,0	11,3	9,76		
1,1	1,3262	0,6375	0,366	0,509	4,1	12,32	10,69		
1,2	1,3937	0,7147	0,319	0,435	4,2	13,44	11,71		
1,3	1,4693	0,7973	0,278	0,372	4,3	14,67	12,62		
1,4	1,5534	0,8861	0,243	0,320	4,4	16,01	14,05		
1,5	1,6467	0,9817	0,214	0,278	4,5	17,48	15,39		
1,6	1,75	1,0848	0,188	0,240	4,6	19,09	16,86		
1,7	1,864	1,1963	0,165	0,209	4,7	20,86	18,48		
1,8	1,9896	1,3172	0,146	0,182	4,8	22,79	20,25		
1,9	2,1277	1,4482	0,129	0,160	4,9	24,91	22,79		
2,0	2,28	1,591	0,113	0,140	5,0	27,24	24,91		
2,1	2,446	1,746	0,101	0,123	5,1	29,79	26,68		
2,2	2,629	1,914	0,090	0,108	5,2	32,58	29,25		
2,3	2,83	2,098	0,079	0,094	5,3	35,65	32,08		
2,4	3,049	2,298	0,071	0,083	5,4	39,01	35,18		
2,5	3,29	2,517	0,063	0,074	5,5	42,7	38,59		
2,6	3,553	2,755	0,055	0,066	5,6	46,74	42,33		
2,7	3,842	3,016	0,049	0,058	5,7	51,17	46,44		
2,8	4,157	3,301	0,044	0,050	5,8	56,04	50,95		
2,9	4,503	3,613	0,039	0,046	5,9	61,38	55,9		

### ANNEXE 3

#### Matrices quadripolaires pour différentes configurations

Le quadripôle associé à un transfert unidirectionnel dans un milieu sans génération d'énergie est donné par l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \Phi_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \Phi_2 \end{bmatrix}$$

Pour le milieu d'épaisseur finie, la matrice quadripolaire est donnée par le *tableau 38*.

Tableau 50: Matrice quadripolaire associé à un transfert unidirectionnel dans un milieu d'épaisseur finie dans génération d'énergie.

	Mur plan d'épaisseur e	Cylindre creux de rayons $r_1$ et $r_2$	Sphère creuse de rayons $r_1$ et $r_2$
A	$\cosh(qe)$	$qr_2[I_0(qr_1)K_1(qr_2) + I_1(qr_2)K_0(qr_1)]$	$\frac{r_2}{r_1} \cosh(p) - \frac{\sinh(p)}{qr_1}$
B	$\frac{\sinh(qe)}{\lambda q S}$	$\frac{2}{2\pi\lambda L} [I_0(qr_2)K_0(qr_1) - I_0(qr_1)K_0(qr_2)]$	$\frac{\sinh(p)}{4\pi\lambda q r_1 r_2}$
C	$\lambda q S \sinh(qe)$	$2\pi\lambda L q r_1 q r_2 [I_1(qr_2)K_1(qr_1) - I_1(qr_1)K_1(qr_2)]$	$4\pi\lambda r_2 \left[ \left(1 - \frac{r_1}{r_2}\right) \cosh(p) + \left(qr_1 - \frac{1}{qr_2} \sinh(p)\right) \right]$
D	$\cosh(qe)$	$qr_1[I_0(qr_2)K_1(qr_1) + I_1(qr_1)K_0(qr_2)]$	$\frac{r_1}{r_2} \cosh(p) + \frac{\sinh(p)}{qr_2}$

Le *tableau 39* donne la valeur de cette matrice. La transformée de Laplace  $\Phi$  du flux de chaleur

$\phi$  s'écrit  $\Phi = \frac{\phi}{Z}$

Tableau 51: Matrice quadripolaire associé à un transfert unidirectionnel dans un milieu semi-fini dans génération d'énergie.

	Mur semi-infini	Cylindre semi-infini de rayon intérieur $r_1$	Sphère semi-infinie de rayon intérieur $r_1$
Z	$\frac{1}{SE\sqrt{p}}$	$\frac{1}{2\pi\lambda L} \frac{K_0(qr_1)}{qr_1 K_1(qr_1)}$	$\frac{1}{4\pi\lambda L r_1 (1 + qr_1)}$

Où  $E = \sqrt{\lambda\rho c}$  est l'effusivité thermique

### ANNEXE 3

#### Matrices quadripolaires pour différentes configurations

Le quadripôle associé à un transfert unidirectionnel dans un milieu avec génération d'énergie est résumé dans le *tableau 40*. La température considérée est égale à la température moyenne de l'élément chauffant.

Tableau 52: Quadripôle associé à un transfert unidirectionnel dans un milieu avec génération d'énergie

	Plaque d'épaisseur e	Cylindre plein de rayon r	Sphère pleine de rayon r
A	1	1	1
B	$\frac{1}{\frac{\lambda S}{e} qe \tanh(qe)} - \frac{1}{\rho c Sep}$	$\frac{1}{2\pi\lambda L} \frac{I_0(qr)}{I_1(qr)} - \frac{1}{\rho c \pi r^2 Lp}$	$\frac{1}{4\pi\lambda r [qr \cosh(qr) - 1]} - \frac{3}{4\rho c \pi r^3 p}$
C	$\rho c Sep$	$\rho c \pi r^2 Lp$	$\frac{4}{3} \rho c \pi r^3 p$
D	$\frac{qe}{\tanh(qe)}$	$\frac{qr I_0(qr)}{2 I_1(qr)}$	$\frac{(qr)^2}{3[qr \coth(qr) - 1]}$

## ANNEXE 4

### Propriétés radiatives de matériaux

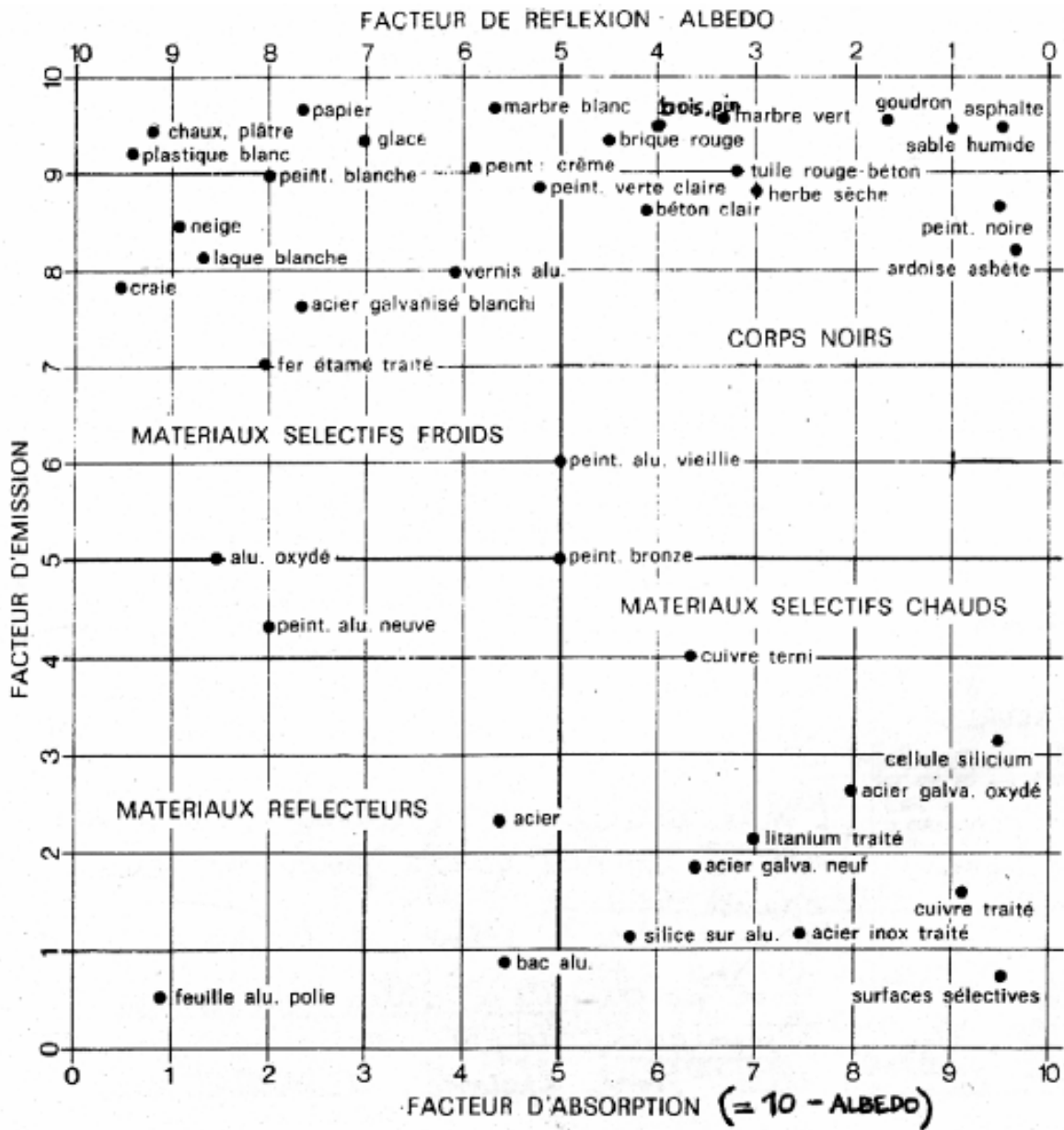


Figure 165: Propriétés radiatives de matériaux

## ANNEXE 5

**Tableau 53: Albédo de différents revêtements de sol**

Matériau	Albédo	Méthode	Références
Béton d'asphalte poreux	0.119	Mesure in situ en utilisant un pyranomètre conformément à ASTM E 1918-06	(Filippo et al., 2017)
	0.09	Expérimentation in situ en utilisant un albédomètre	(Tina, 2013)
Béton d'asphalte perméable	0.08	Mesure sur terrain en utilisant un Albédomètre CMA 6	Shengyang (2015)
Béton d'asphalte imperméable	0.09	Mesure sur terrain en utilisant un Albédomètre CMA 6	Shengyang (2015)
Béton d'asphalte recyclé	0.194	Mesure in situ en utilisant un pyranomètre conformément à ASTM E 1918-06	(Filippo et al., 2017)
Asphalte	0.09	Mesure en laboratoire	Hendel et al (2016)
	0.05	Mesure in situ en utilisant un pyranomètre conformément à ASTM E 1918-06	(Filippo et al., 2017)
	0.04	Mesure dans un laboratoire à disposant un spectrophotomètre conformément à ASTM E903-96	Synnefa et al. (2008)
	0.05 - 0.15	-	IBGE, 2011c
	0.1	Expérimentation in situ en utilisant un albédomètre	(Tina, 2013)
	0.08	Expérimentation sur terrain en utilisant un CNR1	(Tzu-Ping et al., 2012).
Béton de ciment poreux	0.4	Expérimentation in situ en utilisant un albédomètre	(Tina, 2013)
Béton de ciment perméable	0.18	Mesure sur terrain en utilisant un Albédomètre CMA 6	Shengyang (2015)

Béton de ciment	0.12	Expérimentation sur terrain en utilisant un CNR1	(Tzu-Ping et al., 2012).
	0.25	Expérimentation in situ en utilisant un albédometre	(Tina, 2013)
	0.25	Mesure sur terrain en utilisant un albédomètre conformément à la norme ASTM E1918	Roesler et al. (2016)
	0.36	Mesure en laboratoire	Hendel et al (2016)
Pavés de béton	0.20 - 0.25	-	<a href="#">IBGE, 2011b</a>
Béton coulé	0.20 - 0.25	-	<a href="#">IBGE, 2011d</a>
Béton de ciment imperméable	0.29	Mesure sur terrain en utilisant un Albédomètre CMA 6	Shengyang (2015)
Pavés en terre cuite	0.15	Expérimentation sur terrain en utilisant un CNR1	(Tzu-Ping et al., 2012).
Pavés en pierre naturelle	0.20	-	<a href="#">IBGE, 2011a</a>
	0.31	Mesure en laboratoire	Hendel et al (2016)
Pavés en terre cuite	0.15	Expérimentation sur terrain en utilisant un CNR1	(Tzu-Ping et al., 2012).
Pavés en pierre naturelle	0.20	-	<a href="#">IBGE, 2011a</a>
	0.31	Mesure en laboratoire	Hendel et al (2016)

## ANNEXE 6

### Méthodes conseillées pour la mesure des propriétés thermiques d'un solide en fonction de la conductivité

Gamme de conductivité (W/ m K)	Méthodes conseillées	Grandeurs mesurés	Remarques
$5 < \lambda$	Flash	a	
	Calorimétrie différentielle	$C_p$	
	Fil chaud	$\lambda, \rho C_p$	Condition milieu semi-infini à vérifier
$0.5 < \lambda < 5$	Plan chaud centré face arrière isolée	$\lambda, \rho C_p$	Condition du transfert 1D à vérifier
	Flash	a	
	Calorimétrie différentielle	$C_p$	
	Fil chaud	$\lambda$	Condition milieu semi-infini à vérifier
	Hot disk	$\lambda, a$	Faible précision sur la valeur de a
$0.05 < \lambda < 0.5$	Plan chaud centré	$\lambda, \rho C_p$	Condition du transfert 1D à vérifier
	Ruban chaud permanent	$\lambda$	Adapté aux matériaux anisotropes
	Calorimétrie différentielle	$C_p$	
	Plaque chaude gardée	$\lambda$	
	Mini-plaque chaude	$\lambda$	
	Flash	a	
	Fil chaud	$\lambda, \rho C_p$	Condition milieu semi-infini à vérifier
	Hot disk	$\lambda, a$	Faible précision sur la valeur de « a »
	Plan chaud centré	$\lambda, \rho C_p$	Condition du transfert 1D à vérifier
	Ruban chaud permanent	$\lambda$	Adapté aux matériaux anisotropes

$\lambda < 0.05$	Calorimétrie différentielle	c	
	Plaque chaude gardée	$\lambda$	
	Tricouche	$\lambda, \rho C_p$	
	Fil chaud	$\lambda, \rho C_p$	Condition milieu semi-infini à vérifier
	Hot disk	$\lambda, a$	Faible précision sur la valeur de « a »



## ANNEXE 7

### Méthode de Stehfest

La transformée inverse de la fonction  $\theta(p)$  peut se calculer par :

$$T(t) = \frac{\ln(2)}{t} \sum_{j=1}^N V_j \theta\left(\frac{j \ln(2)}{t}\right)$$

#### N= 10 (simple précision)

$$V1 = 1/12, V2 = -385/12, V3 = 1279, V4 = -46871/3, V5 = 505465/6, V6 = -473915/2,$$

$$V7 = 1127735/3, V8 = -1020215/3, V9 = 328125/2, V10 = -65625/2$$

#### N= 20 (double précision)

$$V1 = -5,511463844797178.10^{-6} \quad V2 = 1,523864638447972.10^{-1}$$

$$V3 = -1,174654761904762.10^2 \quad V4 = 1,734244933862434.10^4$$

$$V5 = -9,228069289021164.10^5 \quad V6 = 2,37740877871031810^7$$

$$V7 = -3,494211661953704.10^8 \quad V8 = 3,241369852231879.10^9$$

$$V9 = -2,027694830723779.10^{10} \quad V10 = 8,946482982379724.10^{10}$$

$$V11 = -2,870209211471027.10^{11} \quad V12 = 6,829920102815115.10^{11}$$

$$V13 = -1,219082330054374.10^{12} \quad V14 = 1,637573800842013.10^{12}$$

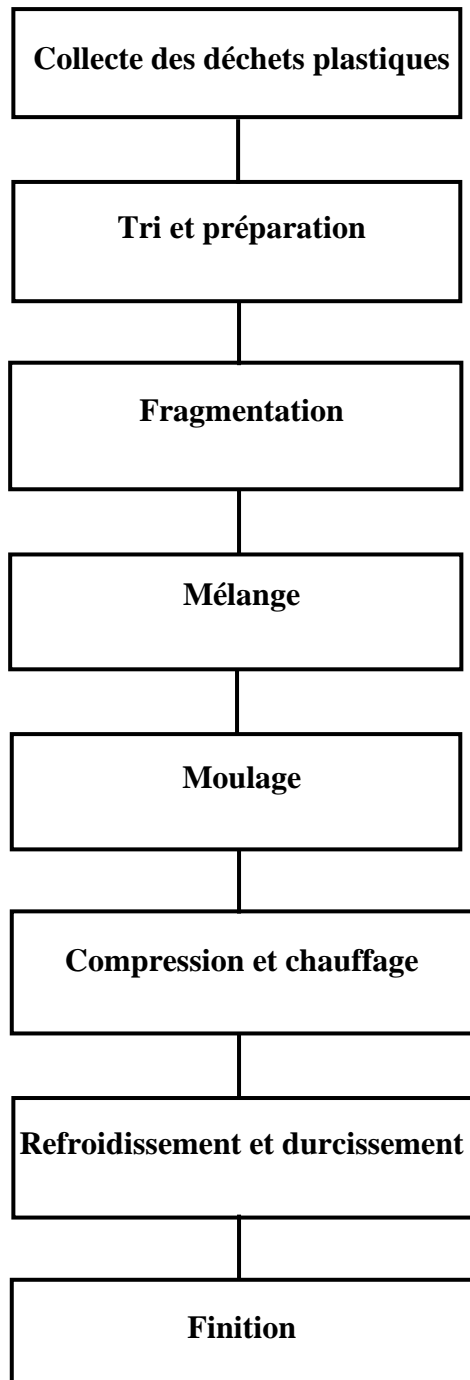
$$V15 = -1,647177486836117.10^{12} \quad V16 = 1,221924554444226.10^{12}$$

$$V17 = -6,488065588175326.10^{11} \quad V18 = 2,333166532137059.10^{11}$$

$$V19 = -5,091380070546738.10^{10} \quad V20 = 5,091380070546738.10^9$$

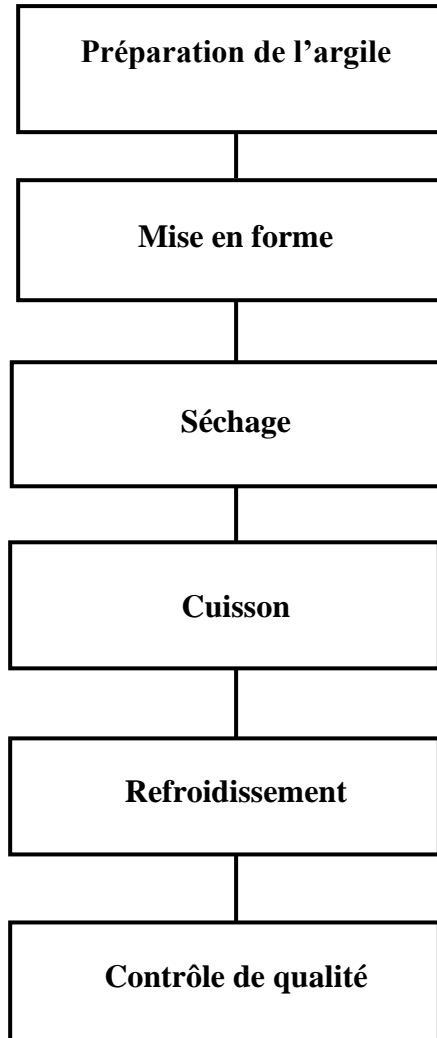
## ANNEXE 8

### Procédés de fabrication de pavés de déchets plastiques



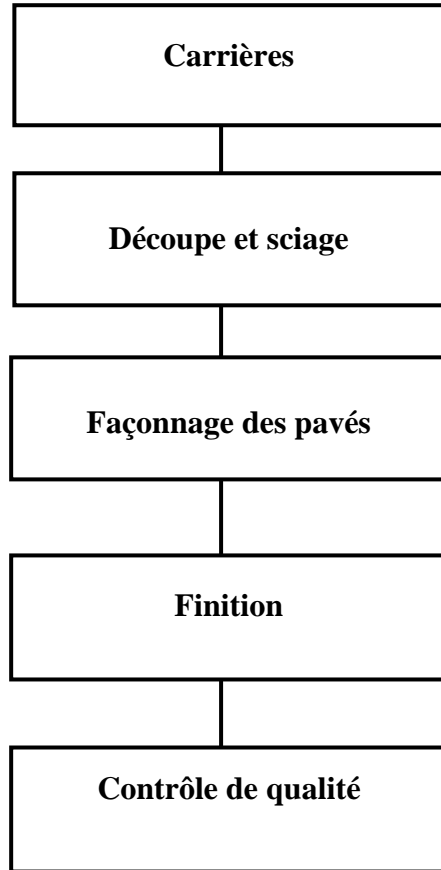
## ANNEXE 9

### Procédés de fabrication de pavés en terre cuite



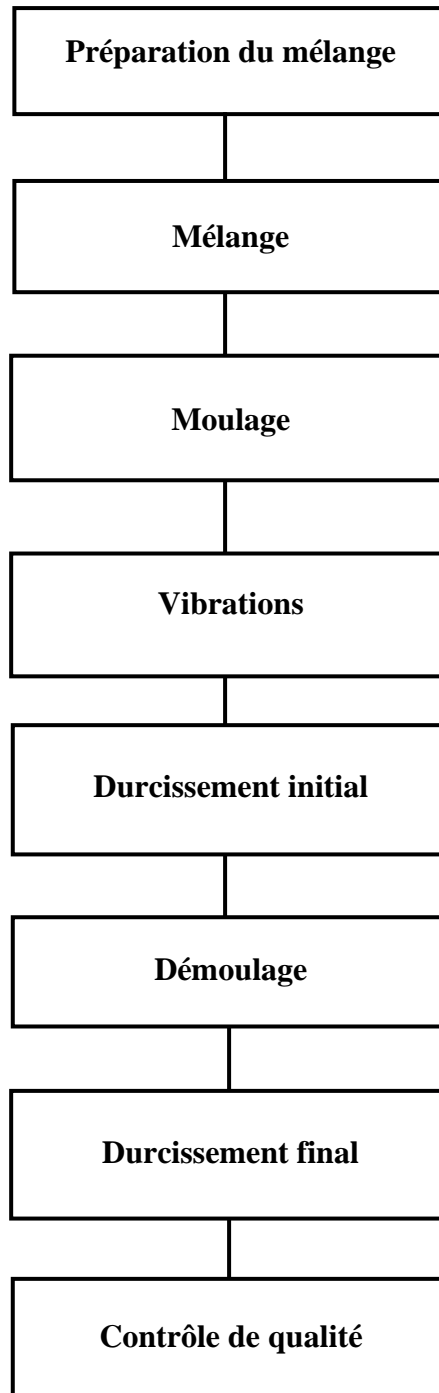
## ANNEXE 10

### Procédés de fabrication de pavés de travertin



## ANNEXE 11

### Procédés de fabrication de pavés de béton



## ANNEXE 12

### Lignes de codes utilisés dans la modélisation.

```
import pandas as pd

from sklearn.model_selection import train_test_split

from sklearn.linear_model import LinearRegression

import numpy as np

from SALib.sample import sobol

from SALib.analyze import sobol as sobol_analyze

data = pd.read_excel('data.xlsx')

data = data[['T', 't', 'h', 'Vv', 'RG', 'HR', 'al', 'a']]

# Diviser les données en ensembles d'entraînement et de test

train_data, test_data, train_target, test_target = train_test_split(data[['t', 'h', 'Vv', 'RG', 'HR',
' al', 'a']], data['T'], test_size=0.2)

# Initialiser le modèle

model = LinearRegression()

# Entraîner le modèle

model.fit(train_data, train_target)

# Fonction pour prédire la température en fonction des paramètres

def predict_temperature(t, h, Vv, RG, HR, al, a):

    new_data = pd.DataFrame({'t': [t], 'h': [h], 'Vv': [Vv], 'RG': [RG], 'HR': [HR], 'al': [al], 'a':
[a]})

    new_temperature = model.predict(new_data)

    return new_temperature[0]

# Paramètres pour l'analyse de sensibilité réduite

problem = {
```

```

'num_vars': 7,

'names': ['t', 'h', 'Vv', 'RG', 'HR', 'al', 'a'],

'bounds': [[8,17], [0, 1.5], [1.5, 8.5], [0, 850], [40, 70], [0, 0.8], [0.0000004,0.000001]]

}

# Génération des échantillons Sobol

N = 1024 # Nombre d'échantillons (puissance de 2)

param_values = sobol.sample(problem, N, calc_second_order=True)

# Évaluation des températures prédites pour chaque combinaison de paramètres

Y = np.zeros([param_values.shape[0]])

for i, X in enumerate(param_values):

    Y[i] = predict_temperature(*X)

# Analyse de sensibilité réduite avec la méthode de décomposition de Sobol

Si = sobol_analyze.analyze(problem, Y, calc_second_order=True, print_to_console=False)

# Affichage des indices de sensibilité réduite pour chaque paramètre

for i, name in enumerate(problem['names']):

    print(name + ": " + str(Si['S1'][i]))

```

### ANNEXE 13

## Températures physiologiques équivalentes prédites pour les grandes villes de Madagascar

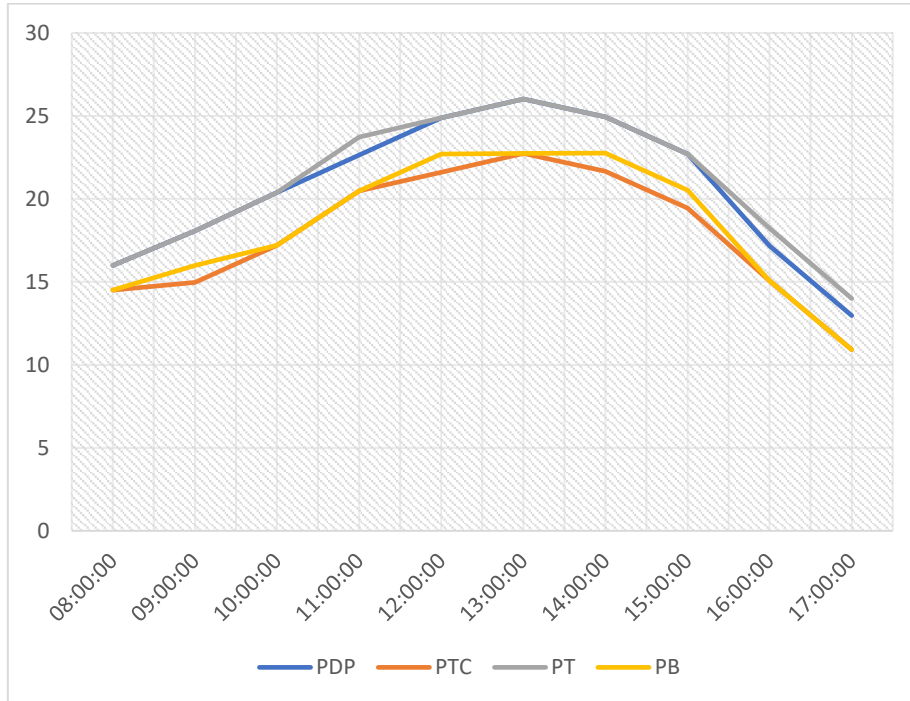


Figure 166: PET prédites pour la ville d'Antananarivo le 15 juin 2023

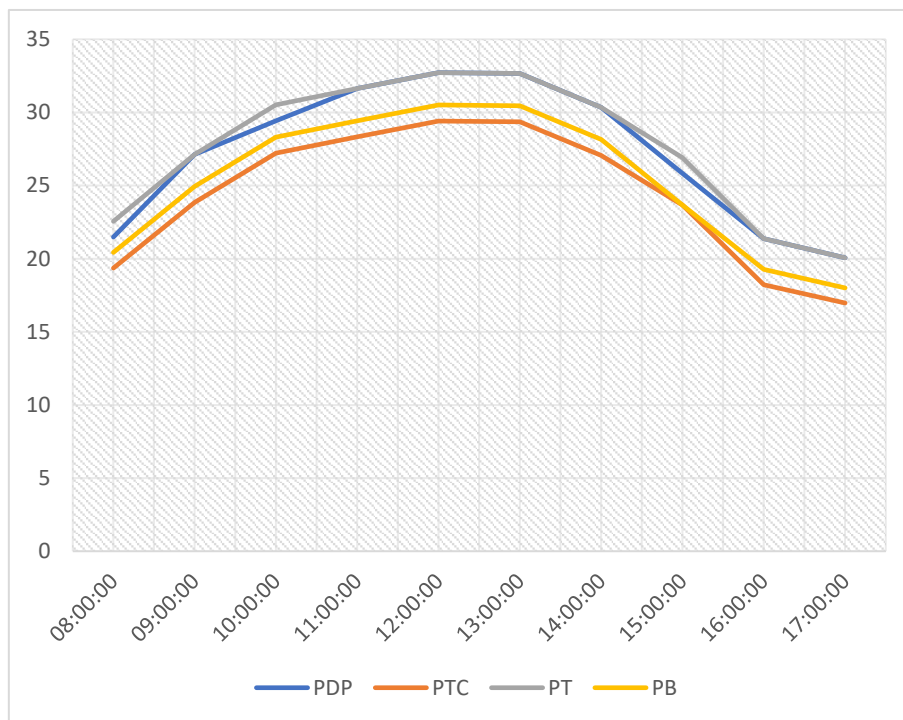


Figure 167: PET prédites pour la ville d'Antananarivo le 15 décembre 2023



### ANNEXE 13

## Températures physiologiques équivalentes prédites pour les grandes villes de Madagascar

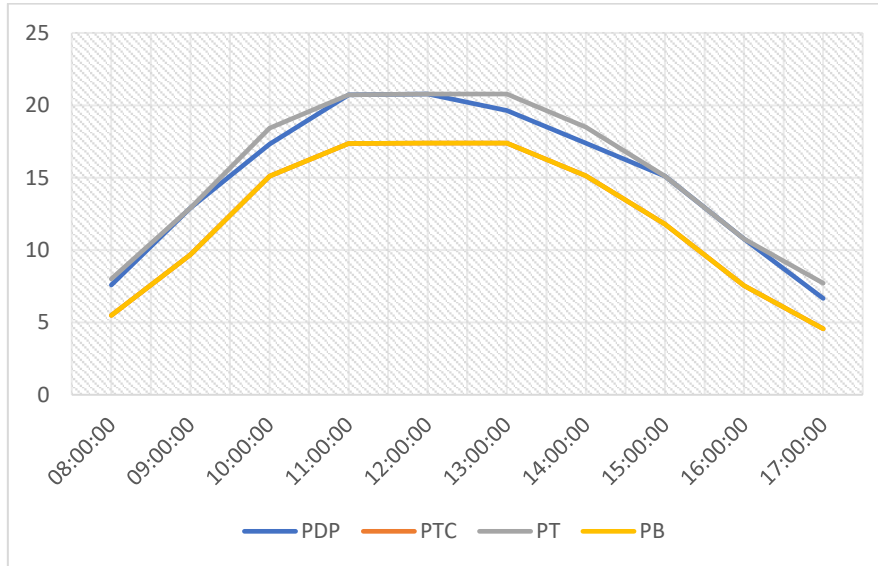


Figure 168: PET prédites pour la ville d'Antsirabe le 15 juin 2023

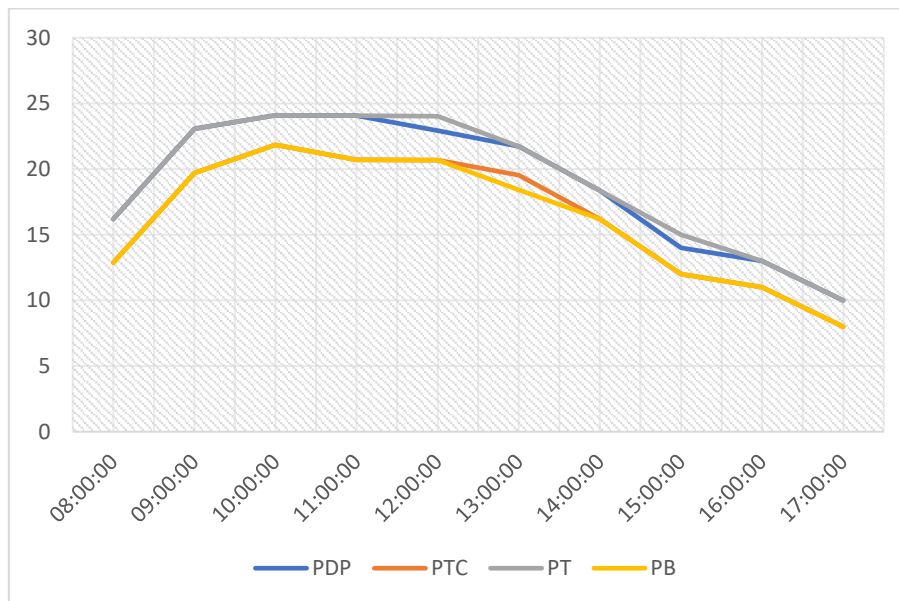


Figure 169: PET prédites pour la ville d'Antsirabe le 15 décembre 2023

### ANNEXE 13

## Températures physiologiques équivalentes prédites pour les grandes villes de Madagascar

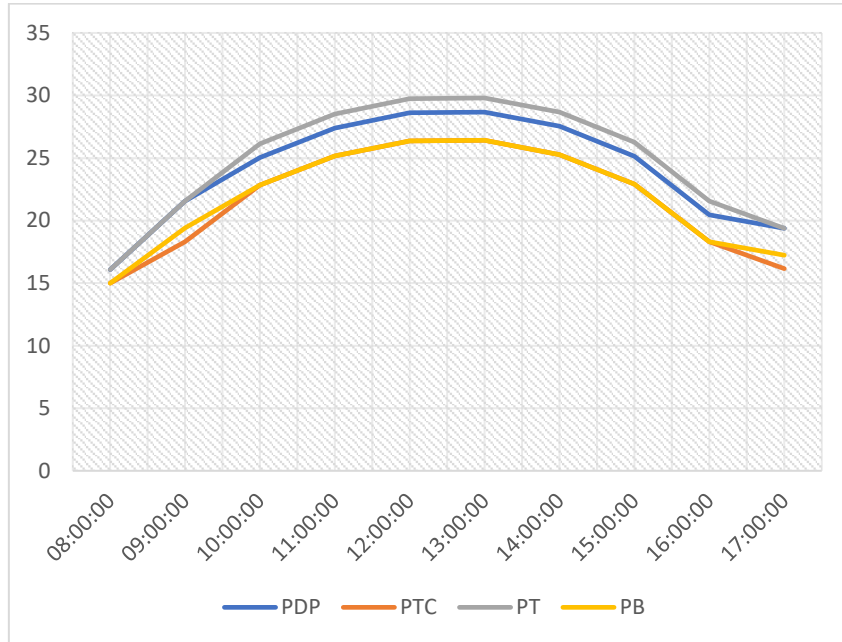


Figure 170: PET prédites pour la ville de Fianarantsoa le 15 juin 2023

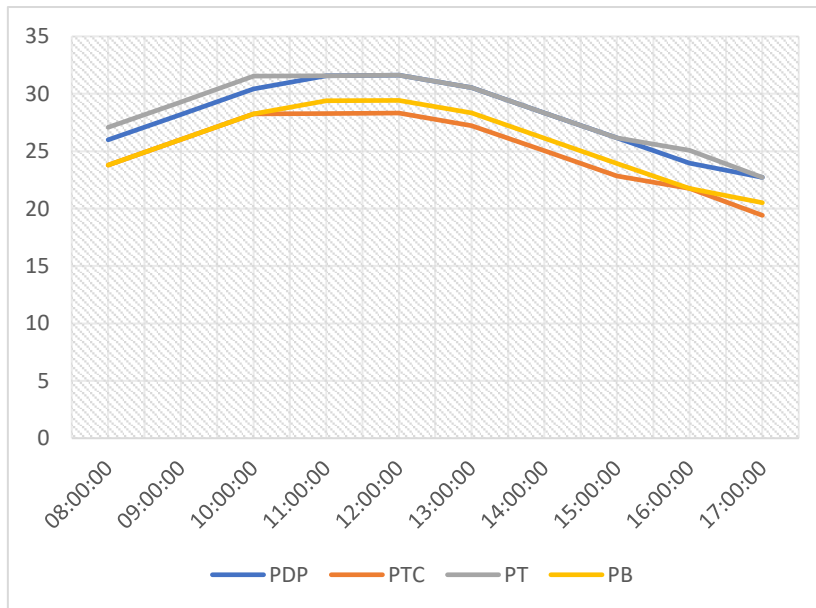


Figure 171: PET prédites pour la ville de Fianarantsoa le 15 décembre 2023

### ANNEXE 13

## Températures physiologiques équivalentes prédites pour les grandes villes de Madagascar

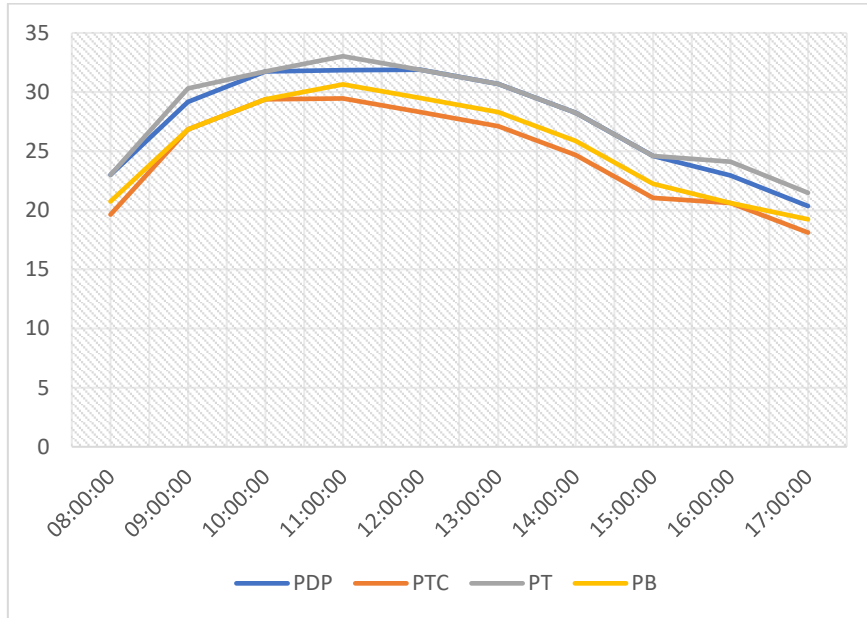


Figure 172: PET prédites pour la ville de Toliara le 15 juin 2023

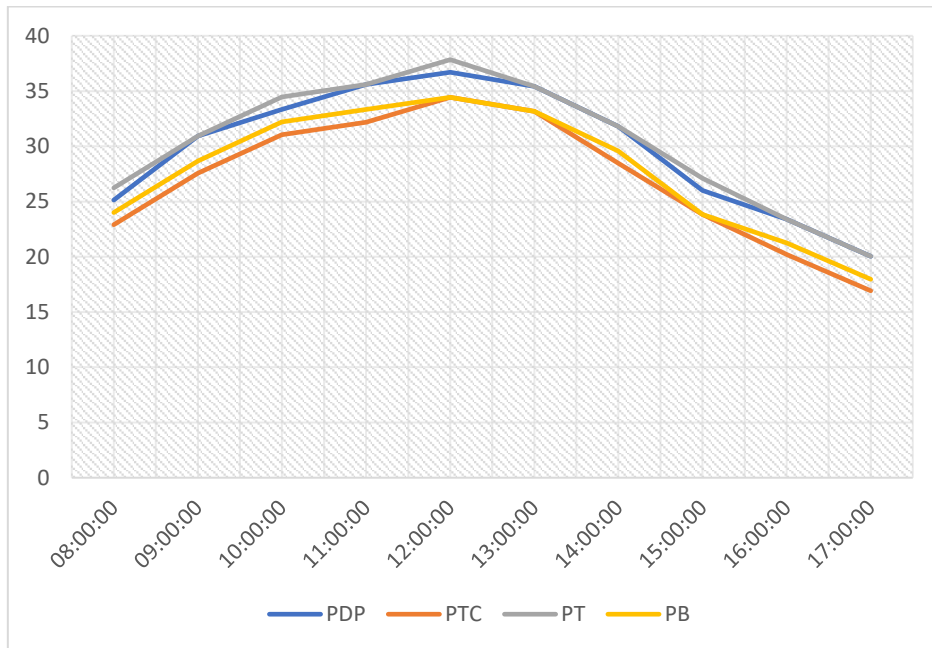


Figure 173: PET prédites pour la ville de Toliara le 15 décembre 2023

### ANNEXE 13

## Températures physiologiques équivalentes prédites pour les grandes villes de Madagascar

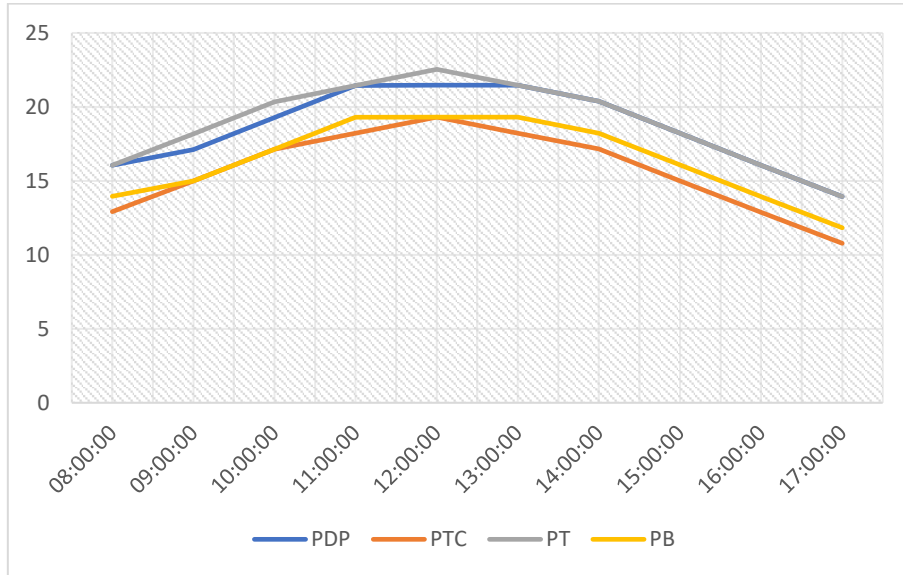


Figure 174: PET prédites pour la ville de Toamasina le 15 juin 2023

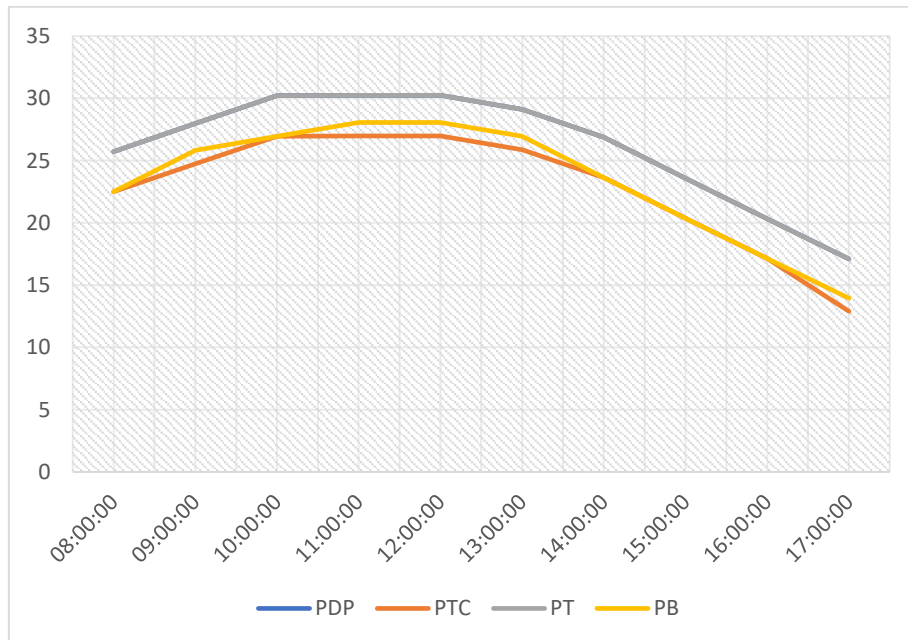


Figure 175: PET prédites pour la ville de Toamasina le 15 décembre 2023

### ANNEXE 13

## Températures physiologiques équivalentes prédites pour les grandes villes de Madagascar

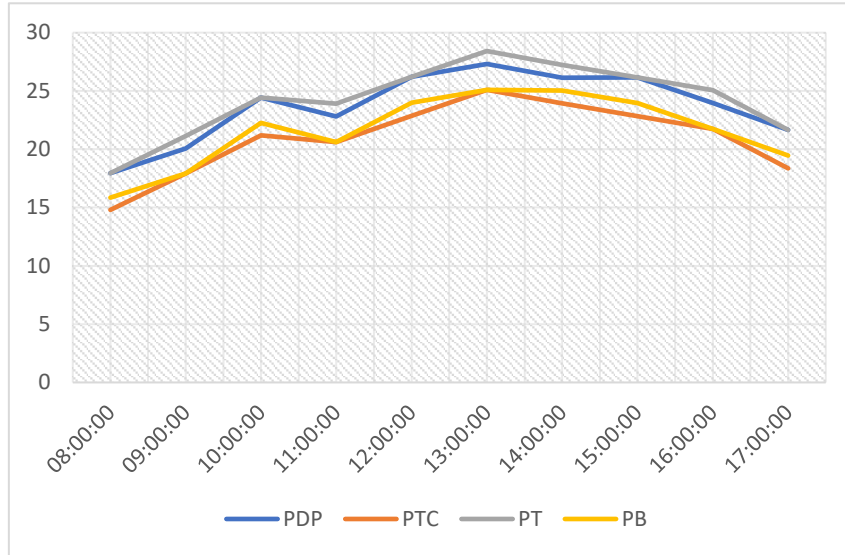


Figure 176: PET prédites pour la ville de Mahajanga le 15 juin 2023

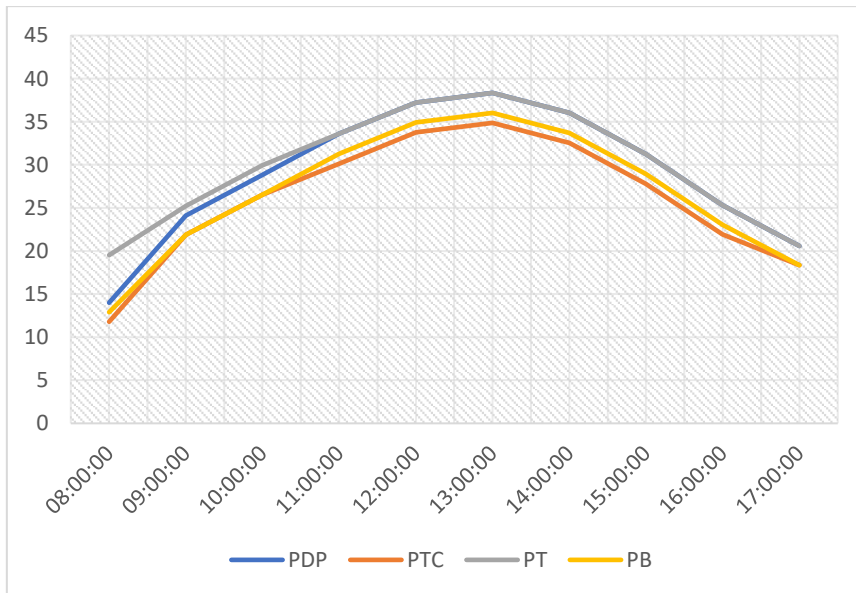


Figure 177: PET prédites pour la ville de Mahajanga le 15 décembre 2023

### ANNEXE 13

## Températures physiologiques équivalentes prédites pour les grandes villes de Madagascar

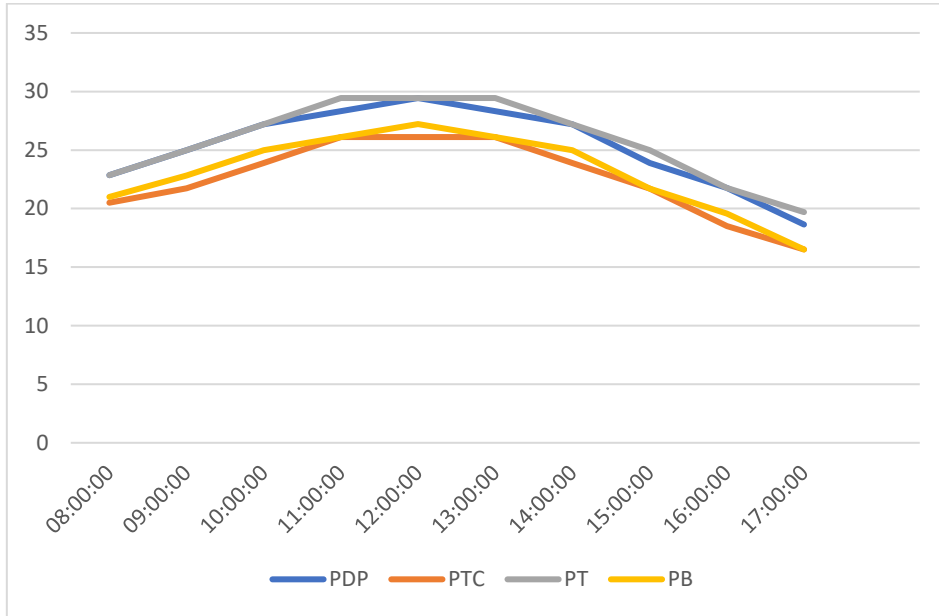


Figure 178: PET prédites pour la ville d'Antsirananana le 15 juin 2023

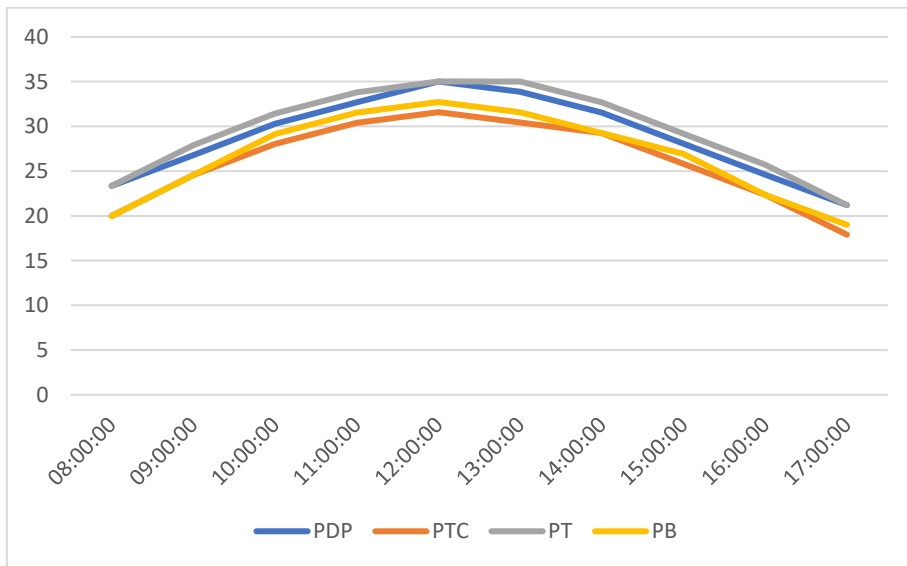


Figure 179: PET prédites pour la ville d'Antsirananana le 15 décembre 2023

# TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	iii
SOMMAIRE .....	iv
LISTE DES ABRÉVIATIONS .....	vi
LISTE DES NOTATIONS.....	vii
LETTRES GRECQUES.....	ix
LISTE DES FIGURES .....	x
LISTE DES TABLEAUX.....	xvii
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
PARTIE 1 : RAPPELS THÉORIQUES ET ÉTAT DES LIEUX .....	3
CHAPITRE I : LES TROIS MODES DE TRANSFERT DE CHALEUR .....	4
INTRODUCTION .....	4
I.1. CONDUCTION .....	4
I.1.1. Loi de Fourier .....	4
I.1.2. Flux thermique.....	5
I.1.3. Équation générale de la conduction.....	5
I.1.4. Résistance thermique d'une paroi.....	6
I.1.5. Résistance thermique de cylindre creux .....	7
I.1.6. Méthodes des quadripôles .....	8
a. Écoulement unidirectionnel dans une paroi .....	8
b. Écoulement radial dans un cylindre creux .....	10
c. Résistance de contact entre deux solides.....	11
d. Association de matrices quadripolaires .....	11
d.1. Association en série .....	11
d.2. Association en parallèle .....	12
d.3. Association en cascade.....	12

I.1.7.	Milieu semi-infini .....	12
a.	Profondeur de pénétration .....	14
b.	Facteur d'amortissement .....	14
c.	Déphasage en temps .....	14
d.	Vitesse apparente de propagation de l'onde de température .....	15
I.2.	CONVECTION.....	15
I.2.1.	Types de convection .....	16
a.	Convection naturelle .....	16
b.	Convection forcée .....	16
I.2.2.	Loi du Newton .....	17
I.3.	RAYONNEMENT .....	17
I.3.1.	Loi de Stefan-Boltzmann .....	18
I.3.2.	Emittance .....	18
I.3.3.	Réception du rayonnement par un matériau .....	18
I.3.4.	Lois de rayonnement .....	19
a.	Corps noir .....	19
b.	Loi de Planck et Stefan Boltzmann .....	19
c.	Loi de Wien .....	20
d.	Loi de Kirchhoff.....	20
	CONCLUSION .....	21
	CHAPITRE II : PROPRIÉTÉS RADIATIVES ET CONDUCTIVES DES REVÊTEMENTS DE SOL EXTÉRIEURS .....	22
	INTRODUCTION .....	22
	II.1. PROPRIÉTÉS DE REVÊTEMENTS DE SOL EXTÉRIEURS LIÉS AU RAYONNEMENT SOLAIRE.....	22
II.1.1.	Albédo ou facteur de réflexion solaire .....	22
II.1.2.	Facteur d'absorption solaire .....	26
II.1.3.	Émissivité .....	26



II.2. PROPRIÉTÉS THERMIQUES CONDUCTIVES ET PHYSIQUES DE REVÊTEMENTS DE SOL EXTÉRIEURS .....	29
II.2.1. Conductivité thermique .....	29
II.2.2. Chaleur spécifique .....	30
II.2.1. Masse volumique .....	30
II.2.2. Capacité thermique volumique .....	31
II.2.3. Diffusivité thermique.....	31
II.2.4. Effusivité thermique .....	33
II.2.5. Inertie thermique.....	33
a. Inertie thermique de transmission .....	33
b. Inertie thermique par absorption .....	34
II.2.6. Perméabilité .....	34
II.3. STOCKAGE DE L'ÉNERGIE THERMIQUE.....	35
II.3.1. Stockage par chaleur sensible .....	35
II.3.2. Stockage par chaleur latente .....	36
CONCLUSION.....	37
CHAPITRE III : CLIMATOLOGIE URBAINE.....	38
INTRODUCTION .....	38
III.1. BILAN THERMIQUE D'UNE VILLE .....	38
III.1.1. Échelles.....	38
III.1.2. Bilan thermique d'une ville .....	39
a. Rayonnement net ( $Q_R$ ) .....	40
a. Chaleur d'origine anthropique ( $Q_F$ ) .....	40
b. Variation de quantité de chaleur stockée ( $\delta Q_S$ ).....	40
c. Flux de chaleur latente ( $Q_L$ ) .....	41
d. Flux de chaleur sensible ( $Q_H$ ).....	41
e. Flux de chaleur advectif ( $\delta Q_A$ ).....	41

III.1.3.	Bilan radiatif au-dessus d'une ville .....	41
b.	Rayonnement solaire global .....	42
c.	Rayonnement réfléchi .....	42
d.	Rayonnement atmosphérique descendant de grande longueur d'onde .....	43
e.	Rayonnement de grande longueur d'onde émis par le milieu .....	43
III.1.4.	Balance thermique au niveau de la surface de revêtements de sol .....	43
III.2.	PHÉNOMÈNE D'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN .....	45
III.2.1.	Types d'ICU .....	46
a.	L'îlot de chaleur surfacique.....	46
b.	Îlot de chaleur atmosphérique .....	46
III.2.2.	Origines de l'îlot de chaleur urbain .....	47
a.	Émission de gaz à effet de serre .....	47
b.	Perte du couvert forestier dans les milieux urbains.....	47
c.	Imperméabilité des matériaux .....	48
d.	Propriétés thermiques des matériaux.....	49
e.	Morphologie urbaine et taille des villes .....	49
f.	Chaleur anthropique .....	50
III.2.3.	Intensité de l'ICU .....	51
III.3.	CONFORT THERMIQUE EXTÉRIEUR EN MILIEU URBAIN .....	52
III.3.1.	Définition.....	52
III.3.2.	Indice de confort.....	53
a.	Indice PMV (Predicted Mean Vote).....	53
b.	Indice PPD (Predicted percentage dissatisfied) .....	54
c.	Indice UTCI (Universal Thermal Climate Index) .....	55
d.	Indice PET (Température physiologique équivalente).....	56
	CONCLUSION.....	57

CHAPITRE IV : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE DES MÉTHODES UTILISÉES POUR L'ÉTUDE DE L'ICU INFLUENCÉ PAR LES REVÊTEMENTS DE SOL.....	58
INTRODUCTION .....	58
IV.1.    MÉTHODES EXPÉRIMENTALES .....	58
IV.1.1.  Expérimentation in situ.....	58
IV.1.2.  Expérimentation en laboratoire .....	67
IV.2.    MÉTHODES DE SIMULATION NUMÉRIQUE.....	69
IV.3.    COMBINAISON DE MÉTHODES EXPÉRIMENTALES ET DE SIMULATION NUMÉRIQUE.....	71
CONCLUSION.....	73
PARTIE 2 : EXPÉRIMENTATION ET SIMULATION NUMÉRIQUE .....	74
CHAPITRE V : MATÉRIELS ET MÉTHODE DE DÉTERMINATION DES PROPRIÉTÉS THERMIQUES ET RADIATIVES DE PAVAGES.....	76
INTRODUCTION .....	76
V.1.    DÉTERMINATION DES PROPRIÉTÉS THERMIQUES DE PAVAGE.....	76
V.1.1.  Préparation des éprouvettes .....	77
V.1.2.  Méthode du fil chaud.....	77
a.  Principe de mesure .....	77
b.  Modèles .....	78
c.  Estimation de paramètres .....	82
d.  Matériels.....	83
d.1.  Fil résistif Nickel-Chrome .....	84
d.2.  Alimentation stabilisée.....	85
d.3.  Voltmètre ampèremètre digital .....	85
d.4.  Thermocouple DH-1-24.....	86
d.5.  Système d'acquisition de données .....	87
e.  Montage.....	87
f.  Estimation de propriétés thermiques à partir de données expérimentales .....	89

f.1.	Importation de données expérimentales.....	90
f.2.	Traçage de la courbe expérimentale.....	90
f.3.	Insertion de conditions expérimentales.....	91
f.4.	Estimation de la conductivité par la norme.....	92
f.5.	Traçage de courbe de résidu de température.....	93
f.6.	Traçage des courbes de sensibilités réduites de la température $T_t$ .....	94
f.7.	Estimations de $\lambda_s$ , $\rho C_p$ et $R_c$ .....	95
V.2.	DÉTERMINATION DE PROPRIÉTÉS RADIATIVES DE PAVAGES .....	95
	CONCLUSION .....	97
	CHAPITRE VI : EXPÉRIMENTATION IN SITU .....	98
	INTRODUCTION .....	98
VI.1.	SITE D'ÉTUDE .....	98
VI.1.1.	Analyse climatique .....	99
a.	Température .....	99
b.	Précipitation .....	99
c.	Humidité relative.....	100
d.	Irradiation solaire .....	101
e.	Vitesse du vent .....	101
VI.2.	MATÉRIAUX DE PAVAGES .....	102
VI.2.1.	Pavés de déchets plastiques .....	102
VI.3.	Pavés en terre cuite .....	102
VI.3.1.	Pavés de travertin.....	103
VI.3.2.	Pavés de béton .....	103
VI.3.	PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX .....	103
VI.3.1.	Mise en œuvre de pavages dans le site .....	103
a.1.	Sol support .....	104
a.2.	Couche d'assise.....	104

a.3. Lit de pose.....	104
VI.3.2. Collecte de données expérimentales.....	106
a. Matériels.....	106
a.1. Capteurs de température.....	106
a.2. Central d'acquisition des données.....	109
a.3. Station Météo.....	110
b. Calendrier de mesures.....	111
c. Installations des dispositifs de mesure.....	111
c.1. Mesure des conditions climatiques.....	111
c.2. Mesure de températures de surface.....	112
c.3. Mesure de température de l'air à 1 m au-dessus de chaque pavage.....	113
d. Estimation du rayonnement solaire.....	114
CONCLUSION.....	115
CHAPITRE VII : RÉSULTATS DE L'EXPÉRIMENTATION.....	116
INTRODUCTION.....	116
VII.1. PROPRIÉTÉS THERMIQUES DE PAVAGES.....	116
VII.2. PROPRIÉTÉS RADIATIVES DE PAVAGES.....	118
VII.3. VARIATION HORAIRE DES TEMPÉRATURES DE SURFACE DE PAVAGES.....	119
VII.4. TEMPÉRATURES DE SURFACE ET TEMPÉRATURE DE L'AIR A 1 M AU-DESSUS DE PAVAGES.....	121
VII.5. INFLUENCE DE FACTEURS CLIMATIQUES SUR LA TEMPÉRATURE DE L'AIR A 1 M AU-DESSUS DE CHAQUE PAVAGE.....	124
VII.5.1. Rayonnement solaire et vitesse du vent.....	124
VII.5.2. Rayonnement solaire et humidité relative de l'air à 1 m au-dessus de chaque pavage	130
VII.6. ÉVALUATION DE LA TEMPÉRATURE PHYSIOLOGIQUE ÉQUIVALENTE (PET).....	135

VII.7. INTENSITÉ D’ILOT DE CHALEUR URBAIN (ICU) .....	136
CONCLUSION .....	136
CHAPITRE VIII : OUTIL DE SIMULATION .....	138
INTRODUCTION .....	138
VIII.1. MODÉLISATION.....	138
VIII.1.1. Prédiction de la température .....	138
a. Analyse de régression.....	139
b. Machine Learning .....	140
a.1. Analyses des données .....	141
a.2. Entraînement de données .....	142
a.3. Modélisation .....	143
a.4. Environnement de programmation .....	143
VIII.1.2. Analyse de sensibilité du modèle.....	145
VIII.1.3. Prédiction de la température de revêtements de sol non étudiés.....	146
VIII.1.4. Évaluation de l’intensité d’ICU .....	147
VIII.1.5. Évaluation du confort thermique.....	147
VIII.2. SIMULATION .....	147
VII.2.1. Mise en œuvre de l’outil .....	147
VII.2.2. Présentation de l’outil .....	148
a. Choix du site.....	149
b. Insertion de données climatiques .....	150
c. Insertion de la date et l’heure locale.....	151
d. Choix de revêtements de sol.....	152
e. Affichage des résultats de calculs .....	155
VII.2.3. Validation de l’outil .....	156
CONCLUSION .....	157

CHAPITRE IX : APPLICATION DE L’OUTIL AU CAS DES MILIEUX URBAINS DE MADAGASCAR.....	158
INTRODUCTION .....	158
IX.1.    SIMULATION DANS LES TROIS GRANDES ZONES CLIMATIQUES DE MADAGASCAR.....	158
IX.1.1.  Température de l’air à 1 m .....	158
IX.1.2.  Température physiologique équivalente (PET).....	169
IX.1.3.  Intensité de l’ICU .....	174
IX.2.    INFLUENCE DE L’ALBÉDO SUR LA TEMPÉRATURE DIURNE ET L’INTENSITE DE L’ICU .....	175
IX.2.1.  Température de surface .....	176
IX.2.2.  Température de l’air à 1 m .....	177
IX.2.3.  Température physiologique équivalente.....	180
IX.2.4.  Intensité de l’îlot de chaleur .....	180
IX.3.    INFLUENCE DE PROPRIETES THERMIQUES DE PAVAGES SUR LA TEMPÉRATURE DE SURFACE DIURNE .....	181
CONCLUSION.....	183
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	184
LISTE DES PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES .....	187
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	I
ANNEXE .....	XVI

**Auteur :** RANDRIAMANAMPISOA Pierre Bénilde

**Titre :** Étude des interactions entre le comportement thermique de revêtements de sol et le climat urbain à micro-échelle par des expérimentations in situ, modélisation et simulation



**Résumé :** La minéralisation des espaces urbains et la réduction des espaces verts contribuent à la modification des conditions climatiques dans les villes. La nature des matériaux utilisés et leurs propriétés thermiques conductives et radiatives influencent la variation de la température. Nos travaux d'investigation portent sur différents matériaux utilisés en pavage des espaces publics, en milieu urbain et se focalisent sur leur comportement thermique. L'objectif est d'identifier ceux qui procurent le meilleur confort thermique en milieu extérieur et de faibles impacts sur le climat urbain à micro-échelle. L'approche méthodologique combine des études expérimentales, de modélisation et de simulation. Les mesures in situ permettent d'analyser le comportement thermique de divers revêtements et pavés exposés au rayonnement solaire sur la base de températures de surface relevées. Les résultats incluant les données climatiques collectées au niveau de la zone d'étude ont servi à l'élaboration de modèles mathématiques en vue de la simulation. L'outil développé nommé « I-PATHCLIM » a pour but de faire des prédictions et d'étendre l'étude à d'autres sites, autres zones climatiques et autres matériaux. Les différents résultats expérimentaux rassemblés affirment que les pavés en terre cuite sont les plus indiqués dans notre zone d'étude. La simulation montre que le pavage approprié à un espace public varie d'une grande ville à une autre.

**Mots-clés :** Albédo, Diffusivité thermique, Revêtements de sol extérieurs, Intensité de l'îlot de chaleur, Indice du confort PET, Micro-échelle, I-PATHCLIM.

**Abstract:** The mineralization of urban spaces and the reduction of green spaces contribute to the modification of climatic conditions in cities. The nature of the materials used and their conductive and radiative thermal properties influence the variation in temperature. Our investigative work focuses on different materials used in the paving of public spaces in urban environments and specifically examines their thermal behavior. The objective is to identify those that provide the best thermal comfort in outdoor environments and have minimal impacts on the microscale urban climate. The methodological approach combines experimental studies, modeling, and simulation. In situ measurements were conducted to analyze the thermal behavior of various coatings and paving materials exposed to solar radiation based on the surface temperatures recorded. The results, including climatic data collected in the study area, were used for model development and simulation. The developed tool, called "I-PATHCLIM," aims to make predictions and extend the study to other sites, different climatic zones, and other materials. The various experimental results gathered affirm that terracotta paving is the most suitable in our study area. The simulation shows that the appropriate paving for a public space varies from one large city to another.

**Keywords:** Albedo, Thermal diffusivity, Outdoor pavements, Urban Heat Island intensitie, PET comfort index, Microscale, I-PATHCLIM.

**Directeur de thèse :** RAHELIARILALAO Bienvenue, Professeur Titulaire

**Coordonnées de l'auteur :** AKT II E 48 Antanety Vontovorona

[leibenildex@gmail.com](mailto:leibenildex@gmail.com) / +261 34 93 345 86