

Développement d'une méthode d'évaluation des propriétés
radiatives et isolantes d'un matériau destiné aux enveloppes
extérieures de bâtiments

par

Constance LEROY

MÉMOIRE PAR ARTICLE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE L'ENVIRONNEMENT
M. Sc. A

MONTREAL, LE 02 NOVEMBRE 2023

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Constance Leroy, 2023



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Éric Lachance-Tremblay, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Diego Ramirez Cardona, codirecteur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Janie Masse-Dufresne, présidente du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Mathias Glaus, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 11 OCTOBRE 2023

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Ce mémoire de recherche n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide des nombreuses personnes que je souhaite remercier ici.

Tout d'abord, je voudrais exprimer ma plus sincère gratitude envers mes deux directeurs M. Éric Lachance-Tremblay et M. Diego Ramirez Cardona, qui ont mené de front tout ce travail avec moi. Ils ont toujours su me guider, me soutenir et m'encourager. Je suis heureuse d'avoir pu faire partie de l'équipe formidable que forme ce duo et honorée de la confiance qui m'a été accordée pendant cette année et demie de travail ensemble. Leur patience, leur bienveillance et leur rigueur resteront gravées dans ma mémoire.

Ensuite, je voudrais remercier toute l'équipe technique sans qui aucune des expériences présentées dans ce mémoire n'aurait été réalisée. D'abord, Juan-Mauricio Rios pour son aide cruciale à chaque étape de ma maîtrise avec gentillesse, patience et entrain. Ensuite, je remercie Sébastien Ménard d'avoir eu la patience de m'apprendre à me servir d'outils « dangereux » en toute sécurité. Ce sont des acquis qui me serviront probablement à vie. Je souhaite aussi remercier Sylvain Bibeau pour sa bonne humeur et son ingéniosité quant à la réalisation de montages expérimentaux. Je remercie aussi Sébastien Lamothe de m'avoir aidée et soutenue lors de la réalisation pressée de mes dernières expériences. Ses volonté, efficacité et patience ont permis d'ajouter la cerise sur le gâteau de ce mémoire. Il est aussi temps de remercier Marielle Jacques pour son aide et sa bienveillance qui étaient plus que bienvenues dans mes débuts de recherche. Je remercie Francis Bilodeau de m'avoir aidée avec enthousiasme et précision. Enfin, je remercie Richard Prowt de m'avoir accordé son aide même pendant ses vacances, ce pour quoi je suis immensément reconnaissante.

Je souhaite aussi exprimer ma gratitude envers Pr Janie Masse-Dufresne pour avoir accepté de présider le jury et Pr Mathias Glaus pour avoir accepté d'évaluer ce travail de recherche et pour avoir grandement participé à ma formation à l'ÉTS.

VI

Je remercie l'entreprise Rinox qui a soutenu financièrement ce projet dans le cadre d'une bourse Mitacs, et plus particulièrement, M. Maxime Boissy et M. Olivier Dunn pour leur enthousiasme.

Il est aussi nécessaire que je remercie tous mes collègues pour leur bonne humeur, leurs partages d'histoires et de bonne nourriture. Alors merci Manon, Constantin, Maicon, Quentin, Youness, Mahsa et Marc-André pour avoir apporté de la vie à nos journées de travail.

Je remercie mes amis pour tous ces bons moments passés ensemble. Merci Clara, Bastien, Caroline, Sébastien, Juliette, Vincent, Joey, Gauthier, Pauline, Quentin, Lara et Jade. Merci à mes parents Joël et Véronique, mon frère Pierre et ma sœur Bertille pour leur soutien malgré la distance et tout leur amour. Merci à mes nièces et neveux qui, sans le savoir, m'ont donné la force d'aller jusqu'au bout. Merci à mes sœurs de cœur, Emma, Cannelle, Valentine, Émeline et Roxane pour leurs encouragements.

Enfin, merci Robin d'avoir partagé avec moi tous ces moments forts en émotions. Merci pour les encouragements, les heures de discussion, les repas délicieux et tout le reste de la vie heureuse. Je n'aurais jamais pu arriver jusque-là sans toi.

Développement d'une méthode d'évaluation des propriétés radiatives et isolantes d'un matériau destiné aux enveloppes extérieures de bâtiments

Constance LEROY

RÉSUMÉ

Alors que les épisodes caniculaires augmentent en intensité et en fréquence sous l'effet des changements climatiques, ils sont aggravés en zone urbaine par le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU). Notamment, l'absence de végétation, la concentration en matériaux de construction pour les bâtiments et chaussées conduisent à l'absorption et à la rétention de la chaleur au sein de la zone urbaine, ce qui représente une menace pour la santé des résidents. Parmi les solutions d'adaptation des zones urbaines aux fortes chaleurs figure l'utilisation de revêtements dits « frais » pour les bâtiments. Ces revêtements ont des propriétés radiatives qui leur permettent de réduire l'absorption de la chaleur dans l'enveloppe du bâtiment tout en facilitant le relargage vers l'air extérieur de la chaleur absorbée. Toutefois, dans des régions présentant des étés chauds et des hivers froids comme le Québec (Canada), il est essentiel de compléter l'application de ces revêtements par des mesures d'isolation. Par ailleurs, le développement de parements extérieurs de bâtiment ayant de telles propriétés radiatives et isolantes est ralenti par la nécessité de caractériser isolément chacune de leurs propriétés thermiques. Il est donc essentiel de fournir aux industries une méthode expérimentale adaptable pour évaluer efficacement le comportement thermique global de leurs produits.

Ce projet de recherche présente une méthode d'évaluation des performances radiatives et isolantes de matériaux destinés aux parements extérieurs de bâtiment utilisant des équipements communs: une lampe chauffante, de l'isolant de polystyrène expansé, une caméra thermique et des thermocouples. Les principaux transferts thermiques subis par une façade de bâtiment ont été reproduits et suivis à l'aide de l'évolution de la température à différents points sur le matériau étudié.

De plus, une étude de cas a été intégrée à cette recherche et analysée au moyen de la méthode développée. Il s'agit d'un matériau composite à base de polyuréthane et de fibre de verre. Ce

VIII

matériau a été recouvert par neuf peintures différentes dont les propriétés radiatives ont été analysées à l'aide de la méthode expérimentale. Les résultats ont montré que la méthode permet de distinguer qualitativement les matériaux en fonction de leur potentiel de participation aux ICU. Elle a aussi permis d'observer les aspects de surfaces qui influencent l'absorption de chaleur : la couleur et la rugosité.

Tous les résultats expérimentaux ont été comparés à des simulations numériques. Celles-ci ont requis la caractérisation de toutes les données d'entrées, à savoir, les flux de transferts thermiques imposés et induits, mais aussi toutes les propriétés thermiques des matériaux qui sont sollicitées par ces transferts thermiques. Les résultats ont montré que les expériences et les simulations sont fortement corrélées, ce qui suggère que toutes les propriétés radiatives et isolantes d'intérêt ont été correctement observées au cours des expériences.

Mots clés : Îlots de chaleur urbains, matériaux frais et isolants, propriétés thermiques, méthode expérimentale de caractérisation, simulation numérique

Development of a method for assessing the radiative and insulating properties of a material intended for exterior building envelopes

Constance LEROY

ABSTRACT

While heatwaves are increasing in intensity and frequency because of climate change, they are exacerbated in urban areas by the urban heat island (UHI) phenomenon. In particular, the absence of vegetation and the concentration of construction materials in buildings and roadways lead to the absorption and retention of heat within the urban area, threatening the health of residents. Among the solutions for adapting urban areas to extreme heat is the use of so-called "cool" coatings for buildings. These coatings have radiative properties that enable them to reduce heat absorption in the building envelope, while facilitating the release of absorbed heat to the outside air. However, in regions with hot summers and cold winters such as Quebec (Canada), it is essential to complement the application of these coatings with insulation measures. Furthermore, the development of exterior building claddings with such radiative and insulating properties is slowed by the need to characterize each of their thermal properties individually. It is therefore essential to provide industries with an adaptable experimental method for efficiently assessing the overall thermal behavior of their products.

This research project presents a method for assessing the radiative and insulating performance of materials intended for exterior building cladding, using common equipment: a heat lamp, expanded polystyrene insulation, a thermal camera and thermocouples. The main heat transfers experienced by a building façade were reproduced and monitored using temperature trends at different points on the material studied.

In addition, a case study was integrated into this research and analyzed using the method developed. This involved a composite material based on polyurethane and fiberglass. This material was coated with nine different paints, whose radiative properties were analyzed using the experimental method. The results showed that the method enables materials to be

distinguished qualitatively according to their potential to contribute to UHI. It also enabled the observation of surface aspects that influence heat absorption: color and roughness.

All experimental results were compared with numerical simulations. These required characterization of all the input data, i.e., the imposed and induced heat transfer flows, as well as all the thermal properties of the materials involved in these heat transfers. The results showed that experiments and simulations were highly correlated, suggesting that all the radiative and insulating properties of interest were correctly observed during the experiments.

Keywords: Urban heat islands, cool and insulating materials, thermal properties, experimental characterization method, numerical simulation

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 ÉTAT DES CONNAISSANCES.....	5
1.1 Présentation du phénomène d'îlots de chaleur urbains et des voies d'adaptations des villes.....	5
1.1.1 Description du phénomène et de ses conséquences.....	5
1.1.2 Revue des causes menant aux ICU	7
1.1.3 Exemples de moyens d'adaptation aux ICU.....	11
1.2 Présentation des transferts thermiques subis par une paroi extérieure de bâtiment.....	16
1.2.1 Transferts thermiques par rayonnement.....	16
1.2.2 Transferts thermiques par conduction et inertie thermique	21
1.2.3 Transferts thermiques par convection.....	26
1.3 Présentation des méthodes de caractérisation du comportement thermique d'un matériau destiné aux enveloppes extérieures de bâtiment	27
1.3.1 Caractérisation des propriétés thermiques du matériau	27
1.3.2 Caractérisation des transferts thermiques subis par un matériau	28
CHAPITRE 2 OBJECTIFS DE LA RECHERCHE, MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE ET ORGANISATION DU DOCUMENT	31
2.1 Objectifs de la recherche.....	31
2.2 Méthodologie expérimentale	32
2.2.1 Proposition d'un montage expérimental pour évaluer les performances radiatives et isolantes d'un matériau.....	32
2.2.2 Évaluation des performances radiatives et isolantes d'échantillons destinés aux façades extérieures de bâtiments, à l'aide de la méthode proposée	33
2.2.3 Comparaison des comportements thermiques observés par l'expérience avec ceux obtenus par simulation numérique	34
2.3 Organisation du document	34
CHAPITRE 3 SIMPLE METHOD FOR CHARACTERIZING THE REFLECTIVE AND INSULATING PERFORMANCE OF MATERIALS DESTINED FOR BUILDING ENVELOPES	37
3.1 Abstract.....	37
3.2 Introduction.....	38
3.2.1 Context.....	38
3.2.2 Properties of building materials contributing to the adaptation to UHI....	39
3.2.2.1 Radiative properties of materials	39
3.2.2.2 Insulation properties of materials.....	42
3.2.3 Current characterization of material's radiative and insulating properties.....	44
3.3 Research objectives.....	45

3.4	Materials and Method	46
3.4.1	Description of the characterization method	46
3.4.2	Description of the tested materials.....	50
3.5	Detailed presentation of results for one test.....	52
3.5.1	Thermocouples' data acquisition	52
3.5.2	Surface temperature measurements	55
3.5.3	Temperature data treatment and analysis.....	57
3.6	Summary and discussion of the results for the tests carried out on sample with different coatings	64
3.7	Conclusion	67
3.8	Acknowledgements.....	68
CHAPITRE 4 RÉSULTATS DES SIMULATIONS NUMÉRIQUES ET COMPARAISON AVEC LES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX.....		69
4.1	Description de la méthodologie de simulation	69
4.1.1	Mise en contexte	69
4.1.2	Identification de la géométrie du système à simuler.....	70
4.1.3	Identification de l'équation à résoudre, des conditions initiales et aux limites.....	71
4.2	Caractérisation du flux émis par la lampe.....	74
4.2.1	Méthode expérimentale de caractérisation de la partie infrarouge du flux émis par la lampe.....	74
4.2.2	Résultats expérimentaux d'évaluation du flux infrarouge	78
4.2.3	Analyse des résultats expérimentaux et confrontation avec la théorie	79
4.3	Évaluation des paramètres liés aux propriétés radiatives et isolantes des échantillons en vue des simulations.....	81
4.4	Obtention des résultats de simulation pour un échantillon et comparaison avec les données expérimentales	86
4.4.1	Données d'entrée nécessaires à la simulation.....	86
4.4.2	Confrontation des données expérimentales et numériques pour un essai.	88
4.5	Analyse comparative des résultats de simulation avec les résultats expérimentaux ...	90
CONCLUSION.....		95
RECOMMANDATIONS		97
ANNEXE I	OBTENTION DE LA POUDRE DE GYPSE	99
ANNEXE II	CALCUL DES MASSES VOLUMIQUES À PARTIR DES MESURES RÉALISÉES AVEC UN PYCNOMÈTRE À GAZ	103
ANNEXE III	FABRICATION DES ÉCHANTILLONS.....	107
ANNEXE IV	MISE EN PLACE DES THERMOCOUPLES SUR LES ÉCHANTILLONS	111

ANNEXE V	ENCASTREMENT DES ÉCHANTILLONS DANS L'ISOLANT POLYSTYRÈNE	115
ANNEXE VI	FONCTIONNEMENT ET UTILISATION DU MTPS POUR LA MESURE DE LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE ET DE L'EFFUSIVITÉ THERMIQUE.....	119
ANNEXE VII	FONCTIONNEMENT ET UTILISATION DU SPECTROPHOTOMÈTRE À SPHÈRE D'INTÉGRATION POUR LA MESURE DE LA RÉFLECTANCE SOLAIRE	123
ANNEXE VIII	CARACTÉRISATION THÉORIQUE DES FLUX DE CONVECTION ET ÉMIS AU COURS DES ESSAIS D'ÉVALUATION DES PERFORMANCES RADIATIVES ET ISOLANTES.....	127
ANNEXE IX	ESTIMATION DES FLUX INCIDENTS INFRAROUGE ET VISIBLE À L'AIDE DE LA THÉORIE DES CORPS GRIS.....	129
ANNEXE X	COMPLÉMENTS D'ESTIMATION EXPÉRIMENTALE DU FLUX INFRAROUGE REÇU AU « HOTSPOT »	141
ANNEXE XI	CODE FLEXPDE POUR LA SIMULATION NUMÉRIQUE DE LA MÉTHODE PROPOSÉE	147
APPENDICE A	COMPRENDRE LES ÎLOTS DE CHALEUR URBAINS ET ADAPTER LES VILLES	155
	LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	165

LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau 2.1	Liste des échantillons accompagnés de leurs nom, composition et photo	33
Tableau 3.1	Detailed information about the equipment used	50
Tableau 3.2	Summary of the coatings studied and nomenclature (Name)	51
Tableau 3.3	Ambient temperature stability indicators at every measurement point over the whole experiment.....	55
Tableau 3.4	Values of interest of the raw and fitted data from the presented test on the White sample.....	63
Tableau 3.5	Summary of the values of interest for each experiment (fitted data only).....	65
Tableau 4.1	Liste des équipements et leur description	77
Tableau 4.2	Valeurs de flux incident obtenues et retenues pour la simulation	81
Tableau 4.3	Sommaire des paramètres caractérisés pour chaque couche des échantillons étudiés, à l'aide des méthodes conventionnelles	85
Tableau 4.4	Coefficient de détermination et différence de température entre l'expérience et la simulation pour le second essai sur l'échantillon blanc, à tous les points de mesure	89
Tableau 4.5	Coefficient de détermination et différence de température entre l'expérience et la simulation pour chaque essai et tous les points de mesure	91

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Visualisation du phénomène d'îlot de chaleur urbain par mesure de la température de surface et de l'air le jour et la nuit Tirée de EPA (2008)....6
Figure 1.2	Représentation schématique du bilan énergétique d'une zone urbaine menant au phénomène d'ICU a) de jour et b) de nuit7
Figure 1.3	Représentation de la propagation des champs électrique et magnétique et de la longueur d'onde Tirée de Kartable (2023)8
Figure 1.4	Irradiance solaire spectrale reçue à la surface de la Terre Obtenue à partir des données de « ASTM G173 » (2023)9
Figure 1.5	Représentation schématique du bilan énergétique d'une zone urbaine adaptée aux fortes chaleurs a) le jour ; b) la nuit12
Figure 1.6	Schématisation de deux bâtiments exposés au même rayonnement solaire plongés dans l'air extérieur à la même température T_{ext} , utilisant la climatisation pour maintenir l'intérieur à la température T_{int}15
Figure 1.7	Représentation de la réflexion, l'absorption et la transmission d'un flux incident φ_i pour un matériau. Les flux réfléchi, absorbé et transmis sont notés respectivement φ_r , φ_a et φ_t Adaptée de Lavigne, Brejon, & Fernandez (1994)16
Figure 1.8	Situation du spectre visible sur la bande des ondes électromagnétiques allant de 10 – 16 à 108 nanomètres Tirée de Gringer (2018, CC BY-SA 4.0)18
Figure 1.9	Superposition des courbes réflectances spectrales de la neige, la végétation, l'eau, la roche et la transmission des ondes électromagnétiques par l'atmosphère, pour les longueurs d'onde allant de 0,25 à 10 μm Tirée de European Space Agency (2013)19
Figure 1.10	Émittances spectrales en échelles logarithmiques de trois corps noirs, en rouge un corps à la température 5500 °C, en vert un corps à 500 °C et en bleu, un corps à 0°C21
Figure 1.11	Schématisation de la masse volumique, la chaleur spécifique et la conductivité thermique.....23

Figure 1.12	Évolutions des températures au cours du temps à l'extérieur d'une paroi et à l'intérieur, selon l'inertie thermique de la paroi Adaptée de « Inertie thermique » (2007)	24
Figure 1.13	Cartographie des températures et mise en avant des effets de l'effusivité entre le bois le métal Tirée de Kierlik (s.d.)	26
Figure 1.14	Représentation schématique du fonctionnement d'un thermocouple montrant un coefficient de proportionnalité k entre la différence de température et la tension mesurée Tirée de Jannot (2011)	29
Figure 1.15	Représentation schématique du fonctionnement global des capteurs de flux exposés à un gradient de température, selon deux configurations : a) le capteur est à la surface du matériau ; b) le capteur est entre deux matériaux différents	30
Figure 2.1	Étapes de la démarche méthodologique suivie pour répondre à l'objectif de la recherche.....	31
Figure 2.2	Montage expérimental proposé pour répondre au premier sous-objectif.....	32
Figure 3.1	Radiation balance on a surface (S) reflecting (φ_r), transmitting (φ_t), absorbing (φ_a) an incident radiative heat flux (φ_i) and emitting (φ_e) heat.....	40
Figure 3.2	Low and high thermal inertia difference Adapted from « Inertie thermique » (2007)	43
Figure 3.3	Schematic representation of the global functioning of the novel experimental setup	45
Figure 3.4	a) Schematic representation of the characterization method; b) schematic representation of the cross-section of the sample and the four different points of measurement.....	47
Figure 3.5	a) Schematic representation of the entire set-up including the Data Acquisition (DAQ) system outside the isolated room; b) Photo of the set-up inside the isolated room	48
Figure 3.6	a) Photo of the Black sample being irradiated by the lamp, showing the two halos; b) schematic and not at scale representation of the sample being irradiated and precisions on the characteristic distances of the system.....	49
Figure 3.7	Aspect of the coated samples (left) and the correspondent powders used as pigments (right).....	52

Figure 3.8	Temperature evolution measured by the different thermocouples during the test; TC.1,2,3 and 4 correspond to the ambient temperature, TC.a,b and c correspond to the temperature at the different measurement positions in the White sample.....	54
Figure 3.9	Extracted images from the video recorded by the infrared camera for the White sample: a) before the heating phase (i.e. initial state); b) three and a half minutes after the Heating phase began; c) stationary state of the Heating phase; d) 17.6 minutes after the Cooling phase began; e) stationary state of the Cooling phase	56
Figure 3.10	Evolution of the temperature measured at SP.c with the infrared camera during a test on the White sample	57
Figure 3.11	a) Superposition of SP.c and TC.a for the test on the White sample; b) zoom on the beginning of the test showing the time gap between the two signals; c) zoom on the end of the test (Cooling phase stationary state) showing the temperature gap between SP.c and the ambient temperature.....	59
Figure 3.12	SP.c values calculated with different surface emissivity values and comparison with the thermocouples' temperature signals at the end of the Cooling phase for a test on the White sample.....	61
Figure 3.13	a) Superposition of all curves for the test on the White sample after suppression of time and temperature gaps; b) zoom on the beginning of the test showing that the curves are adjusted over time; c) zoom on the end of the test showing that the temperatures are in the same range (thermal equilibrium).....	62
Figure 4.1	Bilan des flux sur le système à simuler et identification des conditions aux limites	69
Figure 4.2	Géométrie du système étudié dans FlexPDE séparant les trois composantes (bleu pour la peinture, vert pour le composite et orange pour l'isolant polystyrène) et montrant les longueurs et épaisseur de chacune	71
Figure 4.3	Représentation schématique des conditions aux limites et identification des différents transferts thermiques subis par le système à simuler au cours de la phase de chauffe	73
Figure 4.4	a) Représentation schématique du montage expérimental en vue 3D ; b) en vue de coupe ; c) Photo correspondante du montage avec l'échantillon de peinture blanche	75

Figure 4.5	Bilan des flux subis par les deux capteurs en fonction de leur position dans le système76
Figure 4.6	Superposition des évolutions des flux (traits pleins) et températures (traits pointillés) relevées en dessous (capteur 1) et en surface (capteur 2) du système au cours de l'essai sur l'échantillon blanc avec pâte thermique78
Figure 4.7	Calcul du flux moyen émis par la lampe sur la durée totale de la phase de chauffe.....80
Figure 4.8	Photo du pycnomètre à gaz82
Figure 4.9	Photo du MTPS avec trois gouttes d'eau83
Figure 4.10	Photo de l'extérieur du spectrophotomètre et du compartiment contenant la sphère d'intégration à laquelle est apposé un échantillon83
Figure 4.11	Superposition des courbes d'évolution de la température à chaque point de mesure pour les données expérimentales et de simulation numérique, pour le second essai réalisé sur l'échantillon blanc. Simu = résultat de la simulation, exp = résultat expérimental88

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CLO	Courtes Longueurs d'Onde
CRRC	<i>Cool Roof Rating Council</i>
CVC	Chauffage, Ventilation et Climatisation
EPA	<i>U.S. Environmental Protection Agency</i>
EPS	<i>Expanded Polystyrene</i>
ÉTS	École de Technologie Supérieure
GES	Gaz à Effet de Serre
GHG	<i>Green House Gases</i>
GLO	Grandes Longueurs d'Onde
HVAC	<i>Heating, Ventilation and Air Conditioning</i>
ICU	Îlots de Chaleur Urbains
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IR	Infrarouge
MTPS	<i>Modified Transient Plane Source</i>
QC	Québec
SP	<i>Spot</i>
TC	Thermocouple
UHI	<i>Urban Heat Island</i>
UV	Ultraviolet
VIS	Visible

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

UNITÉS GÉOMÉTRIQUES

Longueur

m	mètre
cm	centimètre
mm	millimètre
nm	nanomètre

Aire

m ²	mètre carré
mm ²	millimètre carré

Volume

m ³	mètre cube
----------------	------------

UNITÉS DE MASSE

Masse

kg	kilogramme
g	gramme
mg	milligramme
µg	microgramme

Masse volumique

kg/m ³	kilogramme par mètre cube
-------------------	---------------------------

UNITÉS CALORIFIQUES

K	kelvin
°C	degré Celsius

UNITÉS DE TEMPS

h	heure
min	minute
s	seconde

UNITÉS MÉCANIQUES

Vitesse

m/s	mètre par seconde
-----	-------------------

Accélération

m/s ²	mètre par seconde carré
------------------	-------------------------

Angle plan

°	degré
---	-------

Énergie, travail, quantité de chaleur

J	joule
---	-------

Puissance

W	watt
---	------

Contrainte, pression

Pa	pascal
----	--------

INTRODUCTION

Du fait de l'augmentation des émissions anthropiques de gaz à effet de serre (GES), la température de surface planétaire moyenne a augmenté de 1,1 °C entre les périodes 1850-1900 et 2011-2020 (IPCC, 2023a). Le changement climatique alors en cours est à l'origine de l'augmentation en fréquence et en intensité d'évènements météorologiques extrêmes dont font partie les canicules (IPCC, 2023b).

En milieu urbain, les canicules sont accentuées par le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) qui a lieu lorsque la température d'une zone urbaine est plus élevée que celle de la zone rurale alentour. En effet, la substitution des sols naturels par des matériaux artificiels, comme le béton, les enrobés bitumineux ou le gypse, confère aux zones urbaines une plus grande capacité de rétention de la chaleur que les zones rurales alentour lorsqu'elles sont exposées au même rayonnement solaire au cours de la journée. La chaleur stockée dans les matériaux artificiels durant la journée est relarguée la nuit, période durant laquelle le phénomène d'ICU est le plus perceptible. Les ICU nuisent à la santé des citoyens et font partie des causes de mortalité (Ulpiani, 2021). La concentration de la chaleur en milieu urbain favorise l'apparition du stress thermique, défini comme l'incapacité du corps à réguler sa température, tout en diminuant la qualité de l'air et en augmentant l'apparition de smog (Rosenfeld et al., 1995). Le phénomène d'ICU concentre donc les risques aggravants pour les maladies pulmonaires, cardiovasculaires et chroniques préexistantes. Dès lors, il convient de trouver des moyens pour adapter les milieux urbains afin de réduire l'intensité des ICU.

Parmi les moyens d'adaptation figurent la végétalisation, l'augmentation de la capacité de la zone urbaine à réfléchir le rayonnement solaire et la réduction de la quantité de chaleur anthropique générée. La cause principale des ICU est le stockage de la chaleur provenant du rayonnement solaire dans les matériaux de construction (EPA, 2008a ; Modest & Mazumder, 2022). Le moyen étudié dans ce mémoire pour diminuer le phénomène d'ICU est de diminuer le stockage de la chaleur dans les matériaux de construction, tout en facilitant le relargage de la partie de chaleur qui a tout de même été absorbée. Cela est réalisé en augmentant la capacité

des matériaux de surface à réfléchir le rayonnement solaire incident, et à émettre ce qui a été emmagasiné. La capacité à réfléchir le rayonnement solaire est communément appelée albédo. Tous les parements extérieurs des bâtiments sont concernés, mais aussi les surfaces au sol : routes, stationnements, etc. La solution de simplicité est de recouvrir les matériaux existants à l'aide d'un enduit ou d'une peinture dits « frais », généralement de couleur blanche. Un co-bénéfice de l'installation de matériaux frais sur les parois extérieures de bâtiment est de réduire la demande en climatisation. Cependant, cela peut avoir comme effet d'augmenter la demande en chauffage dans les régions froides comme le Canada, où l'absorption de chaleur par les matériaux participe au confort thermique intérieur en périodes froides. Pour éviter ce désagrément, il convient d'accompagner l'installation de matériaux frais par des efforts d'isolation de l'enveloppe du bâtiment.

De plus, un matériau composite destiné aux parements extérieurs de bâtiment (verticaux ou horizontaux) en cours d'industrialisation fait l'objet d'un cas d'étude dans ce mémoire. Ce cas d'étude est donc l'occasion de comprendre les étapes de développement d'un produit destiné aux parements extérieurs de bâtiment devant s'inscrire comme solution d'adaptation aux ICU, dans le contexte régional de Montréal au Québec.

Développer des matériaux frais et isolants nécessite la caractérisation des propriétés thermiques individuellement. Les méthodes de caractérisation conventionnelles sont généralement consommatrices de temps et non adaptables aux échantillons étudiés, ce qui en constitue un frein au développement des matériaux. Or, il faut adapter rapidement les zones urbaines aux fortes chaleurs pour limiter le phénomène d'ICU en utilisant des matériaux frais et isolants. Il est donc essentiel d'aider les industries à réaliser de manière efficace des matériaux de façade nécessaires à l'adaptation des villes aux ICU. L'objectif principal de ce mémoire est donc de développer une méthode d'évaluation des performances radiatives et isolantes de matériaux destinés aux parements extérieurs de bâtiments, à l'aide d'équipements communs et adaptables pour faciliter son déploiement en industrie.

Ce mémoire est divisé en quatre chapitres. Le CHAPITRE 1 est un état des connaissances. Le CHAPITRE 2 présente les objectifs principaux, les démarches expérimentales et la structure du document. Le CHAPITRE 3 est un article scientifique soumis pour publication au *Journal of Building Engineering* (en anglais) nommé « *SIMPLE METHOD FOR CHARACTERIZING THE REFLECTIVE AND INSULATING PERFORMANCE OF MATERIALS DESTINED FOR BUILDING ENVELOPES* ». Il présente la méthode d'évaluation développée par cette recherche. Le CHAPITRE 4 présente l'évaluation de la méthode proposée au chapitre précédent à l'aide d'une modélisation numérique. Enfin, une conclusion rassemble les avancées principales de ce mémoire qui se clôture sur des recommandations.

CHAPITRE 1

ÉTAT DES CONNAISSANCES

1.1 Présentation du phénomène d'îlots de chaleur urbains et des voies d'adaptations des villes

1.1.1 Description du phénomène et de ses conséquences¹

Un îlot de chaleur urbain (ICU) se produit lorsque la température d'une zone urbaine est plus élevée que celle de la zone rurale environnante correspondante (EPA, 2008a ; Oke, 2006). La principale différence de la zone urbaine par rapport à la zone rurale réside dans le remplacement des sols naturels par des matériaux artificiels (créations de chaussées et bâtiments), pour regrouper la population et ses activités sur une surface réduite. Or, la température de la zone urbaine augmente avec la concentration de matériaux artificiels, car ceux-ci absorbent davantage la chaleur qu'un sol naturel (Hwang, Lin, & Lin, 2020), intensifiant ainsi le phénomène d'ICU. Ces matériaux absorbent la chaleur durant la journée et la relarguent la nuit, c'est pourquoi les ICU sont plus prononcés la nuit que le jour (Boeters et al., 2012), comme le montre la Figure 1.1.

La mesure de l'intensité d'un ICU est la différence de température entre les zones urbaines et rurales (Zhao, Lee, Smith, & Oleson, 2014). Deux méthodes courantes permettent de mesurer l'intensité d'un ICU et sont représentée à la Figure 1.1 : (i) la différence de température de surface (sol, murs et toits) entre les zones urbaines et rurales, et (ii) la différence de température de l'air ambiant à 2 m au-dessus du sol entre les deux zones (Mills & Stewart, 2021).

¹ Cette section est reprise de l'article présenté au chapitre 3 et approfondie.

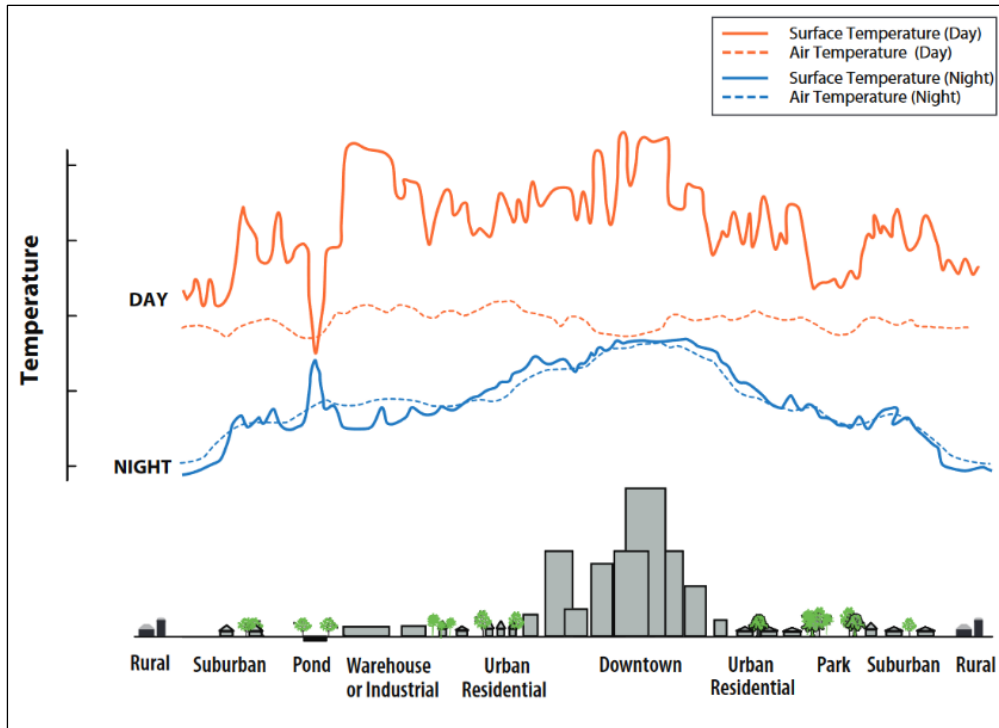


Figure 1.1 Visualisation du phénomène d'îlot de chaleur urbain par mesure de la température de surface et de l'air le jour et la nuit
Tirée de EPA (2008)

Les ICU sont néfastes pour la santé et entraînent une augmentation de la mortalité (Giguère, 2009 ; Ulpiani, 2021) en favorisant l'apparition du stress thermique, défini comme l'incapacité du corps à réguler sa température, tout en réduisant la qualité de l'air (H Akbari, Pomerantz, & Taha, 2001 ; Desplat et al., 2016 ; Rosenfeld et al., 1995). Le phénomène d'ICU est particulièrement visible en été, et encore plus pendant les vagues de chaleur, où la différence de température entre les zones urbaine et rurale peut atteindre jusqu'à 12 °C dans des régions comme l'Amérique du Nord et l'Europe (Oke, 2006). Dans la province canadienne du Québec, une vague de chaleur est définie comme la succession d'au moins trois jours au cours desquels les températures minimales et maximales atteignent respectivement les seuils de 16-20 °C et 31-33 °C, selon les régions administratives (Poitras, 2018). En juillet 2010, une vague de chaleur dans la ville de Québec a fait augmenter le nombre de décès de 33 % et le nombre d'admissions aux urgences de 4 %, par rapport aux périodes correspondantes de 2005 à 2009 (Bustinza, Lebel, Gosselin, Bélanger, & Chebana, 2013). Avec le changement climatique, ces

vagues de chaleur ont déjà augmenté en fréquence et en intensité et continueront à le faire (IPCC, 2023b). Il est donc nécessaire d'adapter les environnements urbains pour limiter le phénomène d'ICU qui intensifie les conséquences des vagues de chaleur sur les populations urbaines.

1.1.2 Revue des causes menant aux ICU

En vue d'adapter les zones urbaines aux ICU, il est nécessaire d'en comprendre les causes. Cette partie identifie d'où vient la chaleur qui est absorbée par les matériaux artificiels et pourquoi elle y est retenue.

Vue d'ensemble sur les causes des ICU

La Figure 1.2 présente le bilan d'énergie d'une ville type et met en avant les différentes causes du phénomène d'ICU. Le jour (Figure 1.2.a), les matériaux artificiels absorbent une partie du rayonnement solaire (flèches jaunes) et de la chaleur émise par les activités anthropiques (flèches oranges) comme l'utilisation de systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (CVC) ou le trafic. La nuit (Figure 1.2.b), ces matériaux relarguent l'énergie (flèches rouges) pour retrouver un équilibre thermique avec l'air ambiant. De plus, l'imperméabilité à l'eau et au vent de la zone urbaine empêche l'évacuation de la chaleur.

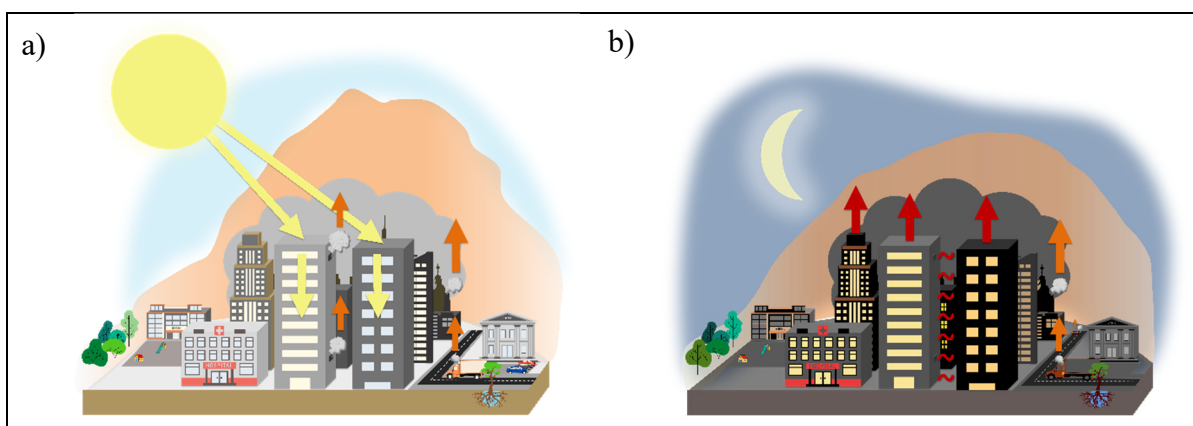


Figure 1.2 Représentation schématique du bilan énergétique d'une zone urbaine menant au phénomène d'ICU a) de jour et b) de nuit

Réception de chaleur issue du rayonnement solaire

La chaleur absorbée par les matériaux artificiels provient en majeure partie du rayonnement solaire (EPA, 2008a ; Modest & Mazumder, 2022 ; Wald, 2018). Le Soleil émet un rayonnement d'ondes électromagnétiques de différentes longueurs qui est perçu comme source de lumière et de chaleur. Une onde électromagnétique est une propagation de champs électriques et magnétiques perpendiculaires entre eux et perpendiculaires à la direction de la propagation (Favenec, 2020). Comme montré à la Figure 1.3, ces ondes résultent de l'interaction entre les champs électriques et magnétiques, générant une énergie transportée à travers l'espace sous forme d'oscillations périodiques. Les ondes électromagnétiques peuvent se propager dans le vide et à travers divers milieux. La longueur d'onde est la distance entre deux crêtes successives (ou deux creux) de l'oscillation (voir Figure 1.3).

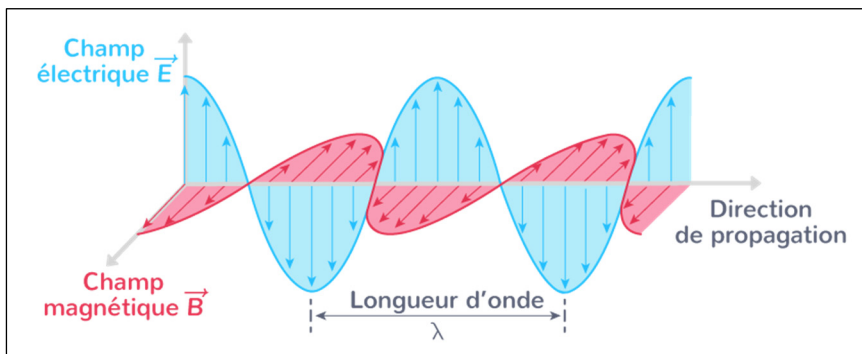


Figure 1.3 Représentation de la propagation des champs électrique et magnétique et de la longueur d'onde
Tirée de Kartable (2023)

En plus du modèle ondulatoire, les ondes électromagnétiques peuvent également être interprétées à travers le modèle corpusculaire, où elles sont considérées comme des particules appelées photons. Ces photons transportent des quantités discrètes d'énergie et leur comportement est décrit par la mécanique quantique (Benallou, 2018).

Le spectre solaire montré à la Figure 1.4 est composé d'ondes de longueurs comprises entre 0 et 4000 nm (Wald, 2019), dont ressortent trois groupes : l'ultraviolet (UV), le visible (VIS) et l'infrarouge (IR). La perception de la lumière est due à la partie visible du spectre solaire, pour

des longueurs d'onde de 380 à 780 nm. La sensation de chaleur est due majoritairement à la partie infrarouge du spectre solaire, au-delà des 780 nm. L'UV en dessous des 380 nm est responsable des coups de Soleil. La puissance émise par une onde varie selon sa longueur. La puissance totale délivrée par le rayonnement solaire par unité de surface est nommée émittance solaire totale E_{ST} en $W \cdot m^{-2}$. L'émittance solaire totale est la somme des puissances émises par chaque onde par unité de surface, ce qui est traduit par l'équation (1.1), où λ est la longueur d'onde en nanomètre.

$$E_{ST} = \int_0^{\infty} E_{ST}(\lambda) d\lambda \quad (1.1)$$

L'irradiance solaire est la puissance totale reçue soit en haut de l'atmosphère, soit au sol, comme présenté à la Figure 1.4. Ainsi, il est habituel de mesurer la distribution spectrale de l'irradiance solaire pour déterminer la participation de chaque onde à la puissance totale reçue. En moyenne, l'irradiance solaire en haute atmosphère est composée de 7 % d'UV, 49 % de visible et 44 % d'IR (Wald, 2019).

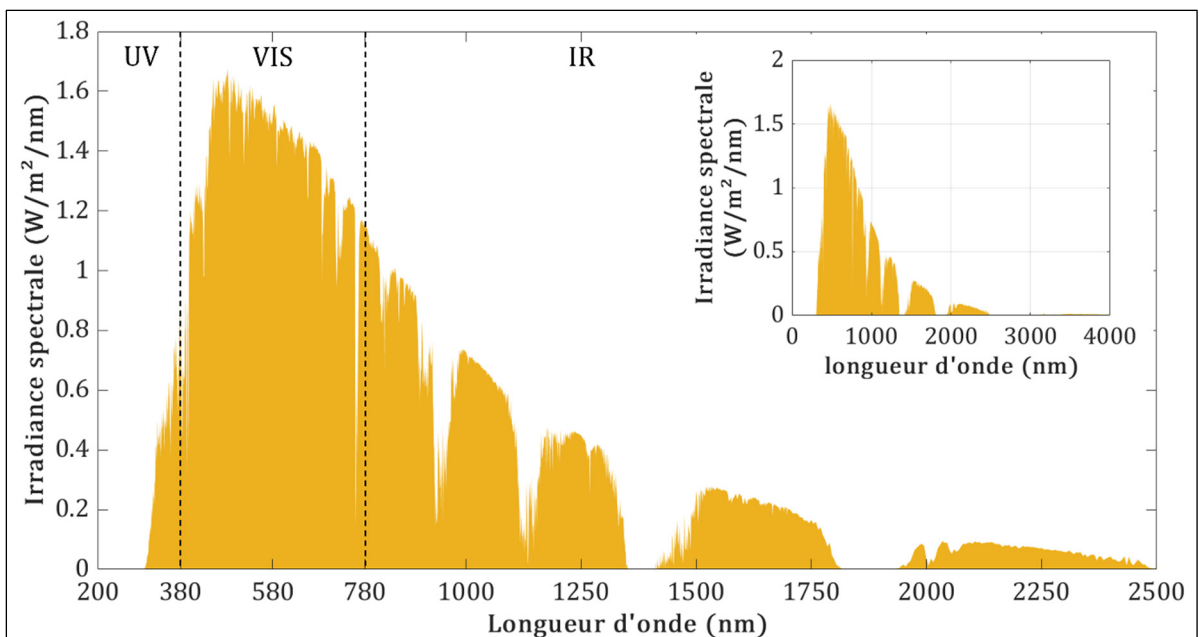


Figure 1.4 Irradiance solaire spectrale reçue à la surface de la Terre
Obtenu à partir des données de « ASTM G173 » (2023)

Selon la surface atteinte, un rayonnement incident n'est pas redirigé de la même façon. Par exemple, une surface sombre absorbe une grande partie du rayonnement incident, tandis qu'une surface claire en réfléchit une grande partie. De plus amples explications sont données à la section 1.2.1. Ainsi, les matériaux sombres emmagasinent plus de chaleur que les matériaux clairs lorsqu'ils sont exposés au même rayonnement. En zone urbaine, de nombreuses surfaces sont sombres : les toits, les routes, les stationnements, etc. Ce sont autant de matériaux qui absorbent la chaleur durant la journée.

Production de chaleur par les activités anthropiques

Une zone urbaine, en plus d'emmagasiner l'énergie thermique du Soleil, produit sa propre chaleur par les biais des activités humaines. Le trafic routier et les systèmes CVC font partie des sources de chaleur anthropique dont la concentration est plus importante en zone urbaine qu'en zone rurale (Allen, Lindberg, & Grimmond, 2011). Par ailleurs, la climatisation est d'autant plus utilisée lors d'une vague de chaleur. Son utilisation alimente l'ICU, puisque la climatisation a pour principe de transférer la chaleur de l'intérieur des bâtiments vers l'extérieur (Mills & Stewart, 2021). Une étude du cas de Paris (de Munck et al., 2010) montre que, dans une situation future, la climatisation pourrait être à l'origine d'une augmentation de la température ambiante nocturne comprise entre 0,5 °C et 3 °C, ainsi qu'un étalement de l'ICU du centre-ville vers la banlieue. De plus, la climatisation nécessite une alimentation électrique dont la production peut être émettrice de GES. Par exemple, la climatisation était indirectement responsable de l'émission de 110 millions de tonnes de CO₂ en 1995 aux États-Unis d'Amérique (Rosenfeld et al., 1995). Par ailleurs, la climatisation étant coûteuse, elle n'est pas utilisée par les foyers défavorisés qui sont alors en proie à un plus grand stress thermique (Bernstein, 2022 ; Brook et al., 2023).

Évacuation de la chaleur par le biais de l'eau et de l'air

Suite à l'apport d'énergie thermique par le rayonnement solaire et les activités anthropiques, les surfaces tendent à retrouver un équilibre énergétique avec leur environnement. Ainsi, tout matériau ayant emmagasiné de l'énergie thermique finit par relarguer l'énergie excédante par

rapport à son environnement. Plusieurs phénomènes naturels faisant intervenir le climat ambiant permettent d'atteindre cet équilibre.

L'eau issue des précipitations, d'arrosages ou de l'humidité ambiante fait partie des acteurs du refroidissement (Lemonsu, 2012). En effet, au contact d'une surface chaude, l'eau liquide absorbe de la chaleur par conduction. Une partie de l'énergie thermique absorbée par l'eau permet d'augmenter sa température (chaleur sensible), et une autre partie permet le changement d'état de liquide à vapeur (chaleur latente) (Venkateshan, 2021). Il se passe exactement la même chose avec la neige lorsque cette eau solide passe à l'état liquide. Un autre phénomène naturel permettant le refroidissement des surfaces est le transfert thermique par convection. En effet, si une surface est plus chaude que l'air qui l'entoure, alors elle lui cède de l'énergie thermique. L'air ainsi chauffé, monte et échange sa place avec de l'air plus frais. Cependant, les masses d'air chaud ont peine à être évacuées de la zone urbaine, car elles restent coincées dans les rues étroites qui séparent de hauts bâtiments (Droege, 2018), ce qui intensifie le phénomène d'ICU.

1.1.3 Exemples de moyens d'adaptation aux ICU

La compréhension des mécanismes influençant les ICU permet d'identifier différents leviers d'action pour rendre les zones urbaines résilientes face aux épisodes de chaleur extrême. Ainsi, limiter la libération de chaleur anthropique, diminuer la concentration en matériaux artificiels dans la zone urbaine, favoriser l'évacuation de la chaleur et éviter l'absorption de chaleur par les matériaux de construction sont des voies d'adaptation possibles. Ce dernier point est au cœur de ce mémoire.

Vue d'ensemble sur les moyens d'adaptation et précision de l'objet d'étude

Les moyens d'adaptation aux fortes chaleurs d'une zone urbaine existante sont la végétalisation, la perméabilisation, le réfléchissement et la limitation des activités productrices de chaleur. Une zone urbaine rassemblant toutes ces adaptations pourrait ressembler à celle

représentée dans la Figure 1.5. Le jour, peu de chaleur est produite et emmagasinée (voir Figure 1.5.a), la nuit, il reste peu de chaleur à évacuer, alors la température diminue (voir Figure 1.5.b).

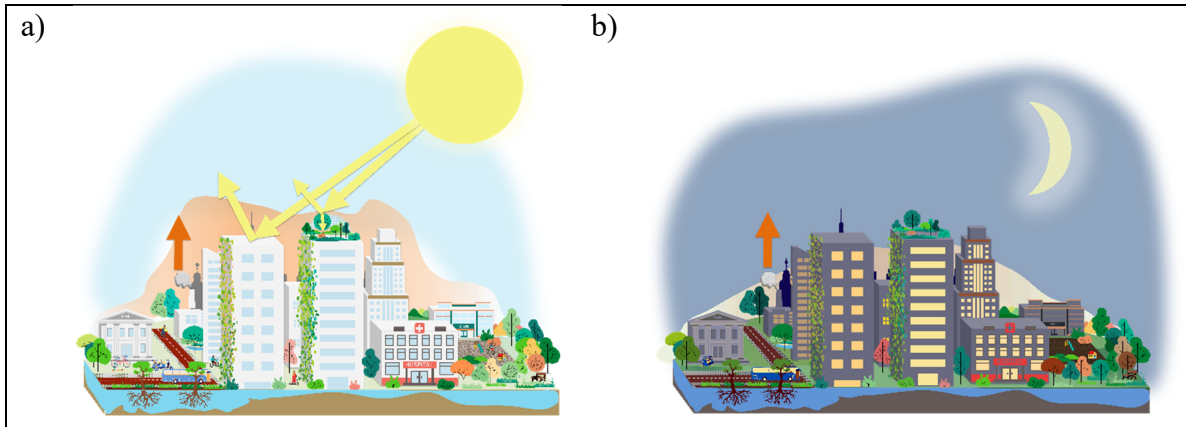


Figure 1.5 Représentation schématique du bilan énergétique d'une zone urbaine adaptée aux fortes chaleurs a) le jour ; b) la nuit

Limitation de la production de chaleur par les activités anthropiques

Comme exposé précédemment, les activités humaines telles que le trafic routier et l'utilisation de systèmes CVC, produisent de l'énergie thermique qui participe à l'intensification du phénomène d'ICU. Limiter cette production de chaleur peut être réalisé par l'aménagement du territoire, par exemple en favorisant les espaces dédiés aux modes doux (vélos, piétons) ou aux transports en commun, plutôt qu'aux voitures. Pour ce qui est des systèmes CVC, il est préférable de permettre aux bâtiments de réguler leur température de manière passive plutôt que de limiter l'utilisation des systèmes. Pour encourager la régulation thermique passive des bâtiments, certaines villes telles que Toronto (Ville de Toronto, 2017), proposent des aides financières pour l'installation de toits végétalisés ou de toits dits « frais ».

Végétalisation et perméabilisation des surfaces construites

Pour rappel, l'une des différences majeures entre une zone urbaine et une zone rurale est la proportion de surface végétalisée par rapport à la surface construite. Or, la végétation participe à réfléchir le rayonnement solaire, en plus de fournir de l'ombre. Aussi, elle utilise le rayonnement solaire pour créer ses nutriments, c'est la photosynthèse. La chaleur absorbée par un plant n'est donc pas relarguée. Enfin, l'eau transpirée par les feuilles s'évapore (c'est

l'évapotranspiration) et participe à refroidir l'air ambiant. Toutefois, pour que ce système fonctionne, le sol doit être alimenté en eau, c'est-à-dire, perméable.

Végétaliser les zones urbaines est donc un moyen efficace de réduire les ICU (Canada & Santé Canada, 2020 ; Lemonsu, 2012 ; Rosenfeld et al., 1995). Végétaliser peut aussi avoir d'autres bénéfices, comme améliorer la santé des habitants ou bien augmenter l'attractivité d'un quartier (Morckel, 2015 ; Roberts, Irvine, & McVittie, 2021) voire, limiter les dommages causés par les inondations (Desplat et al., 2016). Seulement, la végétalisation est difficilement réalisable dans les quartiers les plus denses et donc les plus chauds et vulnérables aux épisodes caniculaires (Shiab & Bouchard, 2022).

Ventilation de la zone urbaine

Comme expliqué à la section 1.1.2, il est possible d'augmenter l'efficacité de l'évacuation de la chaleur absorbée dans les matériaux en favorisant les mouvements d'air à leur contact. Pour cela, il est notamment possible de jouer sur la structure urbaine soit, la hauteur des bâtiments, la largeur et l'orientation des rues, ce qui peut être fait au cours du design d'un quartier (Boeters et al., 2012 ; Droege, 2018). Il s'agit de s'assurer que l'air peut s'écouler à l'intérieur du quartier au travers de couloirs : le quartier doit être perméable au vent. Cependant, il s'agit là d'une adaptation préconstruction d'un quartier, ce qui n'aide pas les quartiers déjà en proie aux fortes chaleurs.

Régulation passive de la température ambiante par le choix des matériaux ²

Un autre moyen efficace pour diminuer le phénomène d'ICU est d'utiliser, pour les surfaces exposées au rayonnement solaire, des matériaux qui gardent une température de surface fraîche comparée aux matériaux conventionnels, alors dits « frais » (EPA, 2008a ; Synnefa, Dandou, Santamouris, Tombrou, & Soulakellis, 2008). Cette solution est généralement appliquée aux toits, qui sont alors nommés « cool roofs ». Ces matériaux ont la particularité de réfléchir une grande partie du rayonnement solaire, donc ils en absorbent peu et émettent plus efficacement ce qui a été absorbé que les matériaux conventionnels (Fitria, Kim, Baik, & Choi, 2019 ;

² Certains paragraphes proviennent de l'article présenté au chapitre 3.

Mourou, Zamorano, Ruiz, & Martín-Morales, 2022 ; Rosenfeld et al., 1995). La capacité d'une surface à réfléchir le rayonnement solaire est connue sous le nom d'albédo. Cette propriété correspond également à la réflectance solaire r_s (sans dimension) (« ASTM E772-21 », 2021). La capacité à émettre efficacement l'énergie thermique absorbée est appelée émissivité thermique ε (*s. d.*). Ces deux propriétés dépendent du matériau et sont explorées en détail à la section 1.2.1.

La solution de simplicité est de recouvrir les matériaux existants à l'aide d'un enduit ou peinture frais. Ces matériaux sont souvent blancs pour réfléchir le spectre visible du rayonnement solaire. Par exemple, en Californie, un enduit blanc ajouté sur différents toits a permis de réduire le pic de température journalier de 33-42 °C à la surface des toits (Hashem Akbari, Levinson, & Rainer, 2005). Il existe aussi des solutions pour les surfaces qui doivent être non éblouissantes ou respecter des contraintes esthétiques, en utilisant des pigments colorés qui réfléchissent en partie le spectre infrarouge du rayonnement solaire (Levinson, Berdahl, & Akbari, 2005b ; Synnefa, Santamouris, & Apostolakis, 2007).

Les bénéfices apportés par l'utilisation de matériaux frais pour les enveloppes de bâtiment sont : (i) la diminution de la température de surface (H Akbari et al., 2001 ; Simpson & McPherson, 1997); (ii) la diminution de la température moyenne de l'air extérieur (Lemonsu, 2012); (iii) l'augmentation du confort thermique intérieur (EPA, 2008b); (iv) la diminution de l'utilisation de système de climatisation (Hosseini, Tardy, & Lee, 2018 ; Sedaghat et al., 2023 ; Simpson & McPherson, 1997). Dans l'ensemble, les bénéfices et impacts issus de l'installation de matériaux frais dépendent toujours de la région du monde concernée, selon le climat (quantité de rayonnement solaire reçu, présence d'humidité, saisons, etc.) (Fitria et al., 2019 ; Zhao et al., 2014), les habitudes (utilisation du chauffage et de la climatisation) (Hosseini et al., 2018) et des sources d'énergie (charbon, solaire, etc.) (Ritchie, 2021 ; Ritchie & Rosado, 2021). En fait, l'augmentation de l'albédo (réflectance solaire) peut être problématique dans les régions froides, car cela peut engendrer une augmentation de la demande en énergie de chauffage durant les périodes froides (Hosseini et al., 2018). Ainsi, l'utilisation de matériaux frais pour les bâtiments doit être accompagnée par des efforts d'isolation pour éviter le report de la consommation d'énergie de climatisation sur celle du chauffage. Les détails techniques liés à l'isolation sont présentés à la section 1.2.2.

Les bénéfices thermiques issus de l'ajout d'un revêtement frais et d'une isolation supplémentaire sont schématisés à la Figure 1.6. La Figure 1.6.a représente un bâtiment au revêtement extérieur sombre dont la surface est à la température $T_{S_{sombre}}$. La Figure 1.6.b représente un bâtiment avec une couche d'isolation supplémentaire et un revêtement extérieur clair dont la surface est à la température $T_{S_{clair}} < T_{S_{sombre}}$. Les flèches jaunes représentent le rayonnement solaire depuis sa source vers les surfaces atteintes. Les flèches blanches représentent le flux de chaleur nécessaire pour maintenir l'intérieur à T_{int} . Les flèches bleues représentent les flux de chaleur par conduction.

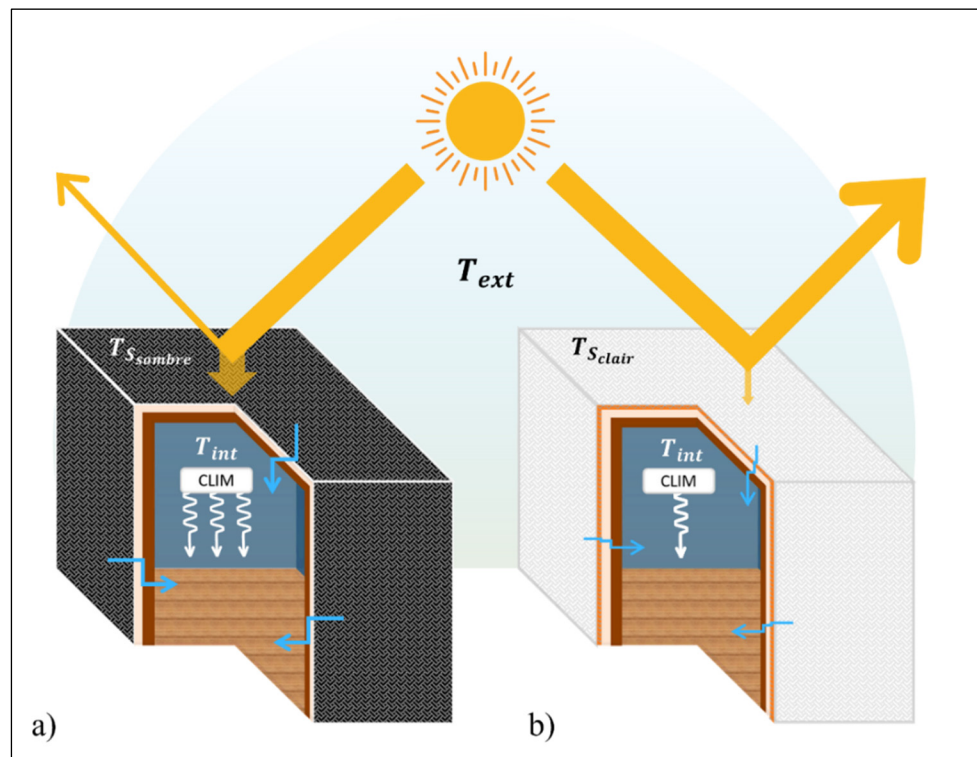


Figure 1.6 Schématisation de deux bâtiments exposés au même rayonnement solaire plongés dans l'air extérieur à la même température T_{ext} , utilisant la climatisation pour maintenir l'intérieur à la température T_{int}

1.2 Présentation des transferts thermiques subis par une paroi extérieure de bâtiment

Dans le but d'inscrire un matériau parmi les solutions d'adaptation passives des zones urbaines aux fortes chaleurs, il est nécessaire de comprendre les principes physiques des échanges thermiques subis par une enveloppe de bâtiment. Il existe trois types de transferts thermiques : le rayonnement, la conduction et la convection. Ces trois types de transferts thermiques sont subis par une enveloppe de bâtiment.

1.2.1 Transferts thermiques par rayonnement

Réception d'un rayonnement

Un corps qui reçoit un rayonnement -celui du Soleil par exemple- est appelé récepteur. Un récepteur a trois réactions possibles, il peut réfléchir le rayonnement incident, l'absorber et le transmettre, ce qui est schématisé à la Figure 1.7.

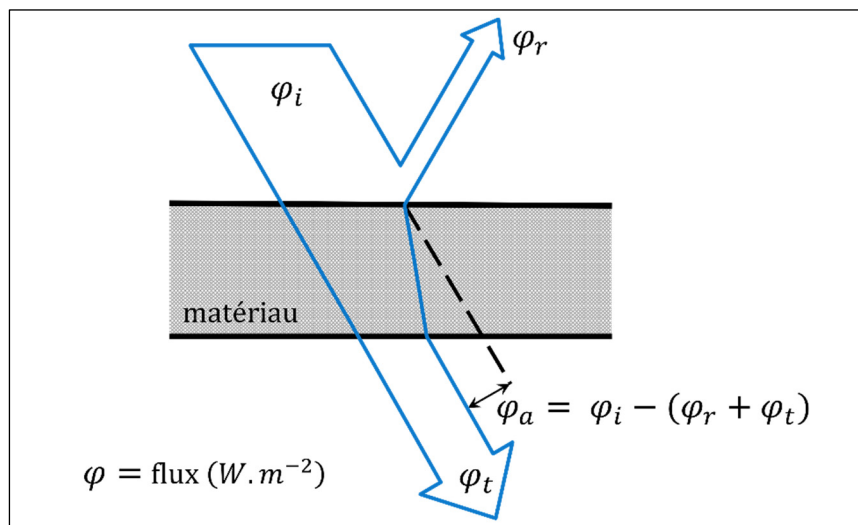


Figure 1.7 Représentation de la réflexion, l'absorption et la transmission d'un flux incident φ_i pour un matériau. Les flux réfléchi, absorbé et transmis sont notés respectivement φ_r , φ_a et φ_t
Adaptée de Lavigne, Brejon, & Fernandez (1994)

Les capacités à réfléchir, absorber et transmettre sont propres au matériau. À partir des notations proposées à la Figure 1.7 , ces trois capacités sont définies comme suit :

- La réflectance d'un matériau est la proportion du flux incident qu'il peut réfléchir à sa surface. Elle est calculée suivant l'équation (1.2) ;

$$r = \frac{\varphi_r}{\varphi_i} \quad (1.2)$$

- L'absorbance d'un matériau est la proportion du flux incident qu'il peut absorber en son sein. Elle est calculée suivant l'équation (1.3) ;

$$\alpha = \frac{\varphi_a}{\varphi_i} \quad (1.3)$$

- La transmittance d'un matériau est la proportion du flux incident qu'il peut transmettre par la face opposée au rayonnement incident. Elle est calculée suivant l'équation (1.4) et est nulle si le matériau est opaque.

$$\tau = \frac{\varphi_t}{\varphi_i} \quad (1.4)$$

Aussi, la loi de la conservation de l'énergie indique que la somme des flux d'arrivée équivaut à la somme des flux de sortie, alors :

$$r + \alpha + \tau = 1 \quad (1.5)$$

D'après les équations (1.2), (1.3) et (1.4), la capacité d'un matériau à réfléchir, absorber et transmettre un rayonnement dépend de ce même rayonnement, notamment de sa longueur d'onde. Par exemple, un objet éclairé par une lumière blanche (spectre visible entier) apparaît bleu s'il absorbe le rayonnement de toutes les longueurs d'onde visibles sauf celles responsables de la couleur bleue, à savoir celles entre 450 et 495 nanomètres comme montré à

la Figure 1.8. Éclairé par une lumière uniquement rouge, cet objet absorberait tout le rayonnement incident et apparaîtrait noir. Les coefficients d'absorbance et de réflectance ne sont pas les mêmes dans les deux cas.

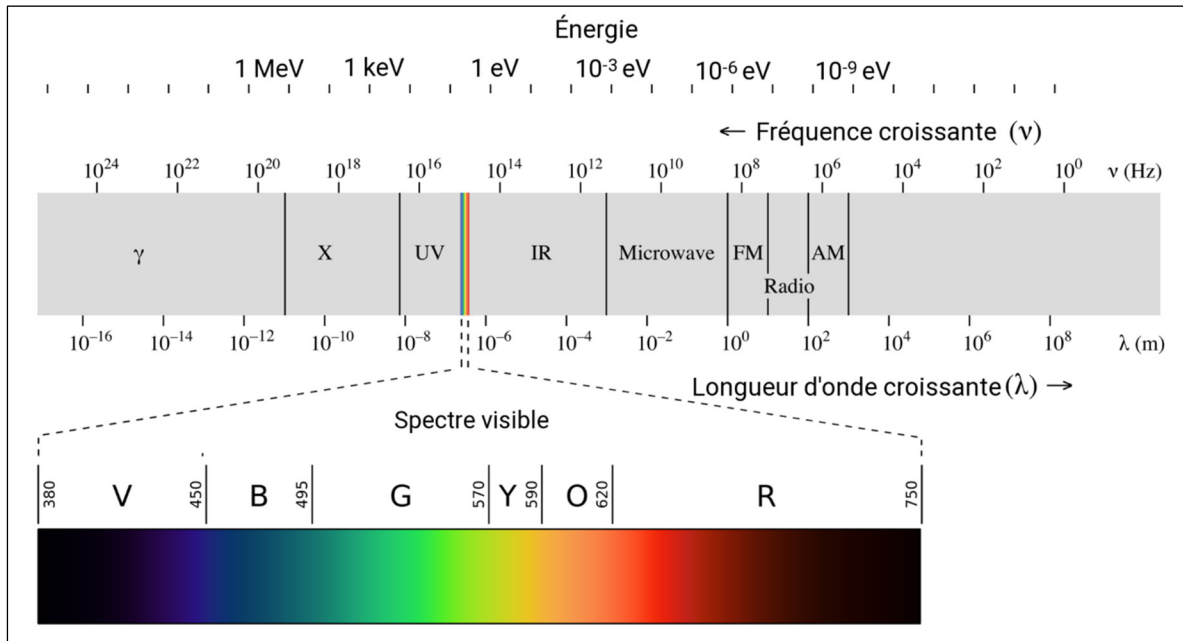


Figure 1.8 Situation du spectre visible sur la bande des ondes électromagnétiques allant de 10^{-16} à 10^8 nanomètres
Tirée de Gringer (2018, CC BY-SA 4.0)

De la même manière quel'adjectif « spectral » est ajouté à l'irradiance solaire pour montrer sa dépendance aux différentes longueurs d'onde, sont aussi définies une absorbance, une réflectance et une transmittance, toutes trois spectrales. L'indice λ est ajouté pour marquer la dépendance d'un paramètre à la longueur d'onde, mais l'équation (1.6) reste vraie et devient pour une longueur d'onde λ :

$$r_{\lambda} + \alpha_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1 \quad (1.6)$$

Cela est particulièrement utile pour identifier des matériaux, car chacun a sa propre « signature spectrale ». Par exemple, la Figure 1.9 montre que la neige a une réflectance élevée dans les courtes longueurs d'onde, mais basse dans les ondes plus lointaines.

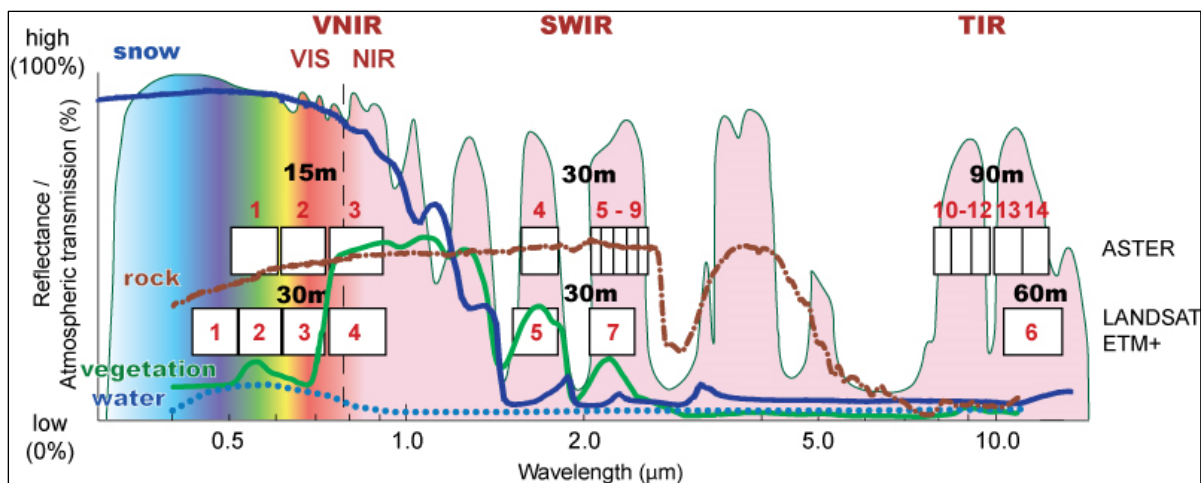


Figure 1.9 Superposition des courbes réflectances spectrales de la neige, la végétation, l'eau, la roche et la transmission des ondes électromagnétiques par l'atmosphère, pour les longueurs d'onde allant de 0,25 à 10 μm
Tirée de European Space Agency (2013)

Chaque matière réfléchit, absorbe et transmet un rayonnement incident en des proportions qui lui sont propres. En général, ces capacités sont mesurées pour correspondre au rayonnement solaire comme rayonnement incident. Une seule valeur est alors donnée à la réflectance, l'absorbance et la transmittance, et il s'agit de l'aire sous la courbe spectrale de chacune d'elles. Par exemple, la réflectance solaire (ou albédo) de la neige est l'aire sous la courbe de réflectance bleue à la Figure 1.9 qui tient compte de la totalité du spectre solaire.

Émission d'un rayonnement

Tous les objets, même s'ils ne brillent pas, rayonnent. Autrement dit, ils émettent un rayonnement électromagnétique pour certaines longueurs d'onde et cela dépend de leur température. Seuls les objets à la température de 0 Kelvin ne rayonnent pas.

Un « corps noir » désigne un objet purement théorique qui absorberait parfaitement toutes les radiations électromagnétiques incidentes (lumière, chaleur, etc.) et qui émettrait un rayonnement continu et optimal pour une large bande de longueurs d'onde, uniquement en fonction de sa température. L'émittance totale d'un corps noir E_o (en $W \cdot m^{-2}$) est régie par la loi de Stefan-Boltzmann (1.7), fonction de la température T du corps noir (en K) et de la constante de Stefan-Boltzmann σ (en $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$).

$$E_o = \sigma T^4 \quad (1.7)$$

Même si cet objet idéal n'existe pas, le Soleil est généralement assimilé à un corps noir dont la température de surface avoisine les 5 800 K (Modest & Mazumder, 2022 ; Wald, 2019). Mais les objets réels ne sont pas de parfaits absorbeurs et émetteurs. Est alors défini le corps gris qui, comme le corps noir, émet un rayonnement continu, mais avec une efficacité plus faible. Son émittance totale E_{gris} correspondrait aux émissions du corps noir à la même température T , mais multipliée par un coefficient compris entre 0 et 1, appelé émissivité thermique ε , sans dimension. La loi de Stefan-Boltzmann pour ce corps gris s'écrit alors :

$$E_{gris} = \varepsilon \sigma T^4 \quad (1.8)$$

En réalité, les objets terrestres émettent un rayonnement discontinu et plus faible qu'un corps noir à la même température. Est alors défini le corps complexes dont l'émissivité thermique ε_λ dépend de la longueur d'onde. Par ailleurs, l'émissivité d'un corps est toujours égale à son absorbance : $\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$ et vaut toujours 1 pour le corps noir, puisqu'il absorbe en totalité le rayonnement incident. Pour simplifier, les comportements d'absorption et d'émission sont généralement distingués selon deux spectres (Jannot & Moyne, 2016 ; Lavigne et al., 1994) :

- les courtes longueurs d'onde (CLO) correspondant au rayonnement solaire ($\lambda < 3 \mu m$);
- les grandes longueurs d'onde (GLO) correspondant au rayonnement infrarouge plus lointain que celui du Soleil ($\lambda > 3 \mu m$).

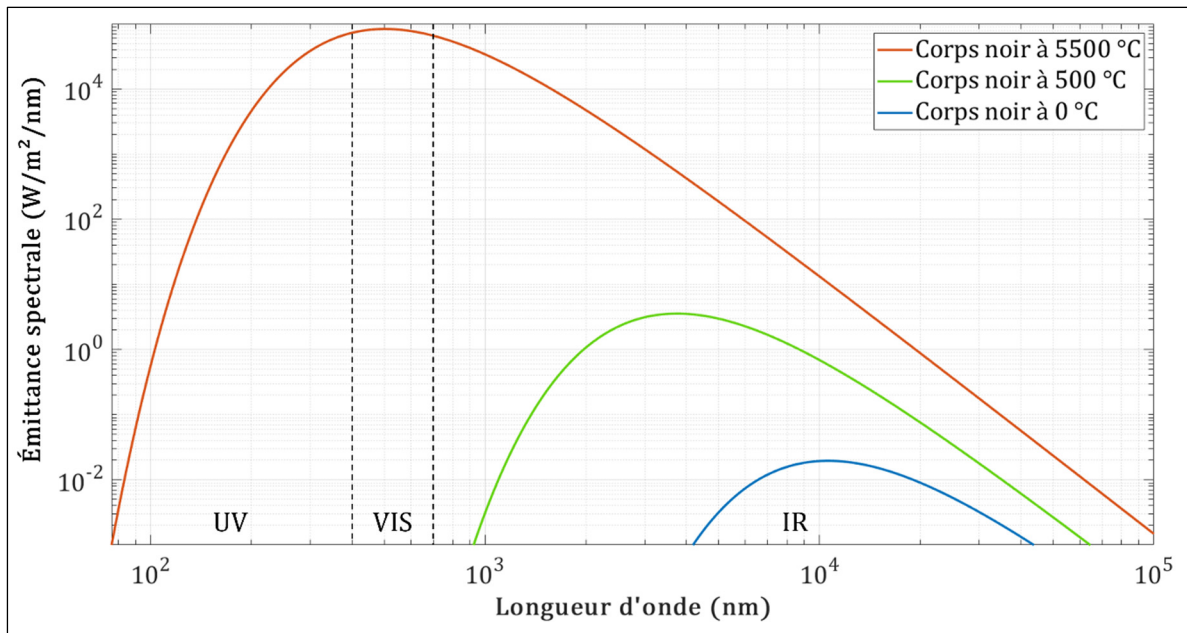


Figure 1.10 Émittances spectrales en échelles logarithmiques de trois corps noirs, en rouge un corps à la température 5500 °C, en vert un corps à 500 °C et en bleu, un corps à 0°C

La Figure 1.10 montre qu'un corps noir à la température proche de celle du Soleil émet majoritairement dans les CLO (courbe rouge), tandis que les corps terrestres (autour de 20 °C) émettent uniquement dans les GLO. Pour un matériau terrestre, deux comportements sont alors distingués : la réception du rayonnement solaire dans les CLO et l'émission par rayonnement dans les GLO. Ainsi, les matériaux dits « frais » ont une réflectance solaire proche de 1 (soit, une absorbance solaire proche de 0) et une émissivité thermique (dans les GLO) proche de 1 (CRRC, 2021 ; EPA, 2008a). Ces propriétés leur permettent d'éviter d'absorber le rayonnement solaire et d'émettre avec efficacité le peu d'énergie thermique qu'ils ont absorbé, pour que le matériau retrouve rapidement une température d'équilibre avec l'extérieur au cours de la nuit.

1.2.2 Transferts thermiques par conduction et inertie thermique

Le transfert d'énergie thermique par conduction désigne la transmission d'énergie au sein de la matière, particule à particule, sans déplacement de la matière, induit par la présence d'un

gradient de température. Pour rappel, la température est définie en tout point et à tout instant, elle est donc soumise à l'équation (1.9):

$$T = f(x, y, z, t) \quad (1.9)$$

Où T est la température en *Kelvin*, (x, y, z) sont les coordonnées d'un point dans l'espace (en m) et t est un instant en secondes. Si la température est constante en tout point, alors le système est en régime stationnaire (ou permanent). Dans le cas contraire, il est en régime transitoire (ou variable). Dans le cas du transfert thermique par conduction dans un matériau suivant la direction x , le flux thermique est défini par la loi de Fourier (1.10) :

$$\varphi_{conduction} = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1.10)$$

Où φ est la densité de flux thermique (en $W.m^{-2}$), k est la conductivité thermique en $W.K^{-1}.m^{-1}$ du matériau et $\frac{\partial T}{\partial x}$ est le gradient de température (en $K.m^{-1}$). La conductivité thermique, schématisée à la Figure 1.11, est la quantité d'énergie qui peut être transmise de particule à particule (c'est-à-dire par conduction) en 1 seconde entre deux faces du même matériau, distantes de 1 mètre et dont l'écart de température est de 1 degré Kelvin. Donc, pour éviter de conduire la chaleur d'une paroi à une autre, le matériau doit avoir une conductivité thermique la plus faible possible. Par exemple, le polystyrène expansé a une conductivité thermique comprise entre 0,036 et 0,047 $W.K^{-1}.m^{-1}$, tandis qu'elle vaut 386 $W.K^{-1}.m^{-1}$ pour le cuivre (Jannot & Moyne, 2016).

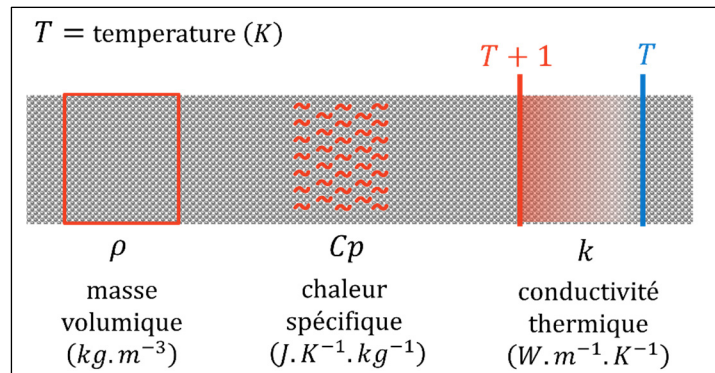


Figure 1.11 Schématisation de la masse volumique, la chaleur spécifique et la conductivité thermique

Pour augmenter sa température, un matériau doit augmenter son énergie interne, c'est-à-dire, stocker de l'énergie thermique en son sein. Cette faculté dépend de deux propriétés du matériau : sa masse volumique ρ (en $kg \cdot m^{-3}$) et sa chaleur spécifique Cp (en $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$). La masse volumique est la masse en kilogramme de matière nécessaire pour occuper 1 mètre cube. La chaleur spécifique caractérise la quantité d'énergie thermique que 1 kilogramme de matériau doit absorber pour augmenter sa température de 1 degré Kelvin (voir Figure 1.11). Ainsi, la quantité de chaleur stockée chaque seconde (en $J \cdot s^{-1}$) dans un volume V (en m^3) de matériau est décrite par l'équation (1.11) :

$$\phi_{stockée} = \rho \cdot Cp \cdot V \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.11)$$

Enfin, au sein d'un matériau soumis à un transfert thermique par conduction, la température en tout point et tout temps peut être déterminée à l'aide de l'équation de la chaleur :

$$div \left(k \cdot \overrightarrow{grad}(T) \right) = \rho \cdot Cp \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.12)$$

Ou bien sous sa forme 2D cartésienne :

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = \rho \cdot Cp \frac{\partial T}{\partial t}$$

La capacité d'une enveloppe de bâtiment à résister aux variations de température extérieure est appelée inertie thermique (Izard, 2006). Comme représenté à la Figure 1.12, plus l'inertie est importante, moins les variations de températures extérieures sont transmises à l'intérieur. À l'inverse, plus l'inertie est faible, moins la température intérieure est stable.

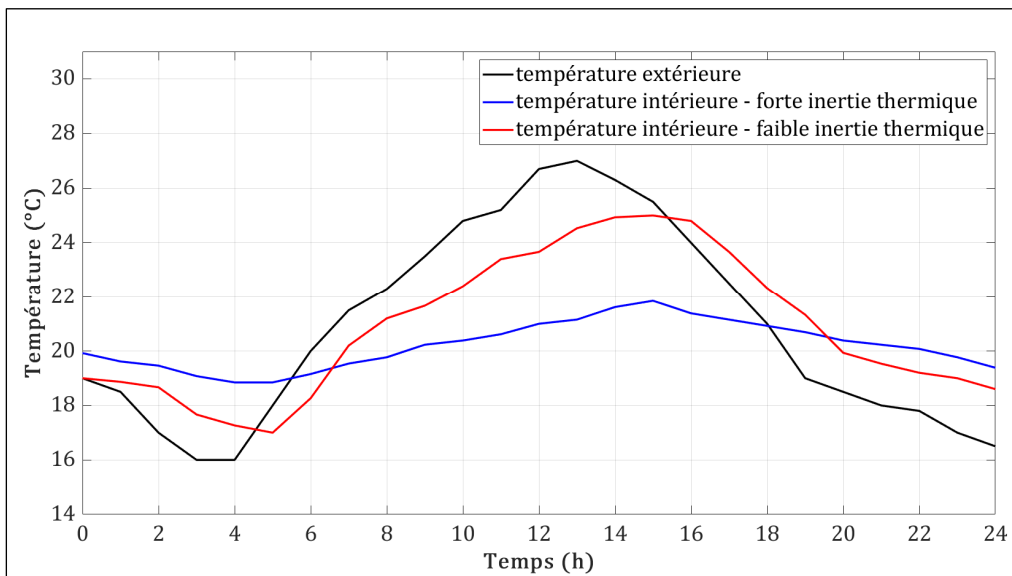


Figure 1.12 Évolutions des températures au cours du temps à l'extérieur d'une paroi et à l'intérieur, selon l'inertie thermique de la paroi
Adaptée de « Inertie thermique » (2007)

Les paramètres propres au matériau caractérisant l'inertie thermique sont la diffusivité thermique et l'effusivité thermique. La diffusivité thermique notée a détermine la vitesse à laquelle une variation de température est transmise au travers du matériau. Elle se calcule à partir de la conductivité thermique, de la chaleur spécifique et de la masse volumique du matériau selon l'équation (1.13).

$$a = \frac{k}{\rho \cdot Cp} \quad (m^2 \cdot s^{-1}) \quad (1.13)$$

En effet, la vitesse de propagation d'une variation est grande si l'aptitude du matériau à conduire l'énergie thermique est grande : la diffusivité est donc proportionnelle à la conductivité. Cependant, si le matériau a une grande capacité à stocker de l'énergie thermique, la variation se propage lentement, la diffusivité est donc inversement proportionnelle à la chaleur spécifique.

L'effusivité thermique notée E détermine la capacité d'un matériau à échanger de l'énergie thermique avec son environnement. Elle se calcule avec les mêmes paramètres que la diffusivité thermique, mais selon l'équation (1.14) :

$$E = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot Cp} \left(J \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \cdot s^{-\frac{1}{2}} \right) \quad (1.14)$$

Si un matériau a une température inférieure à son environnement, il absorbe plus rapidement la chaleur s'il a une grande capacité à la stocker puis à la conduire en son sein. Ainsi, l'effusivité thermique évolue dans les mêmes sens que la conductivité thermique et la chaleur spécifique du matériau. L'effusivité peut être aisément observée, car elle est responsable de la sensation de chaud ou froid de différents matériaux à température ambiante. Par exemple, toucher du bois et de l'acier, tous deux à la température de 20 °C, donnera la sensation que le bois est plus chaud que l'acier. Comme illustré à la Figure 1.13, au bout de 20 secondes, l'extrémité du doigt a perdu environ 5 °C au contact du bois, tandis qu'il en a perdu 10 au contact du métal. Cela est dû à la différence d'effusivité entre les deux matériaux qui est plus grande pour l'acier que pour le bois, ce qui lui permet d'absorber en plus grande quantité l'énergie thermique du corps que le bois, dans le même temps.

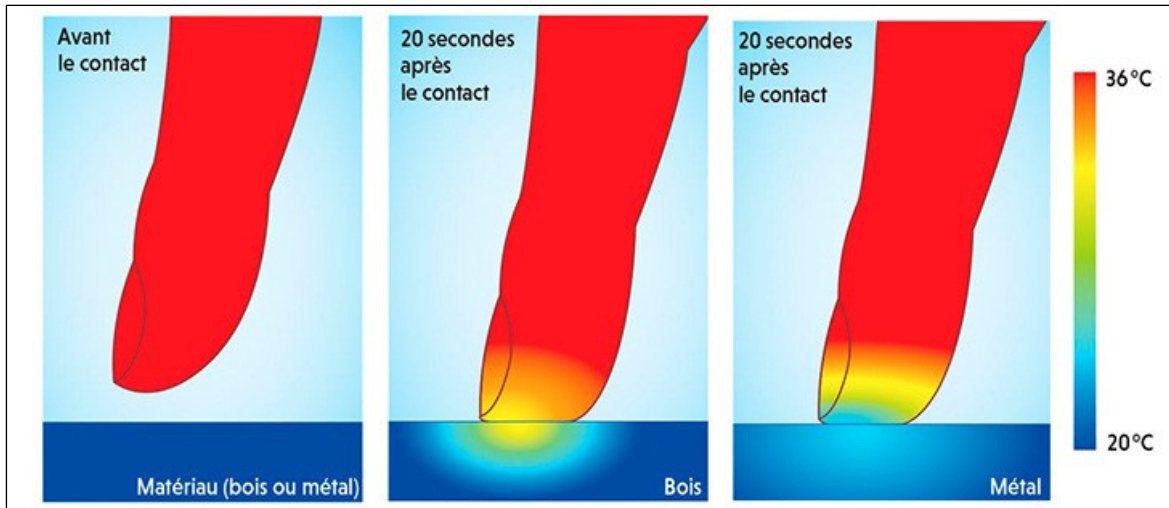


Figure 1.13 Cartographie des températures et mise en avant des effets de l'effusivité entre le bois et le métal
Tirée de Kierlik (s.d.)

1.2.3 Transferts thermiques par convection

Le transfert thermique par convection s'opère entre un fluide en mouvement et une surface solide. Dans le cas où le fluide est l'air, le transfert thermique par convection dépend de la température de la surface, celle de l'air et h le coefficient de convection, qui sont reliés par la loi de Newton (1.15) :

$$\varphi_{conv} = h \times (T_{surface} - T_{air\ ambient}) \quad (W.m^{-2}) \quad (1.15)$$

Le coefficient de convection h ($W.K^{-1}.m^{-2}$) traduit en quelque sorte l'efficacité de la convection : plus il est élevé plus le transfert d'énergie thermique par convection entre la surface et l'air est élevé. Le coefficient de convection dépend notamment de la nature du fluide (ici l'air), sa vitesse, de la géométrie et l'orientation de la surface par rapport à celle du fluide (ASHRAE, 2021). La convection forcée est de ce nom donné à la convection qui a lieu alors que le fluide est mis en mouvement par une source extérieure (par exemple à l'aide d'un ventilateur). La convection naturelle fait référence à l'échange thermique où le mouvement du fluide est généré seulement par la différence de densité des masses chauffées par rapport aux

masses froides. La valeur de h est comprise entre 2 et 10 $W.K^{-1}.m^{-2}$ dans le cas de la convection naturelle, et comprise entre 10 et 200 pour la convection forcée (Jannot & Moyne, 2016). Pour déterminer sa valeur dans un cas précis, il est possible d'utiliser les tables d'équation proposées par American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). En effet, le coefficient de convection est relié au nombre de Nusselt (Nu) par l'équation (1.16).

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad (1.16)$$

Où L_c est la longueur caractéristique du système étudié et k est la conductivité thermique de l'air. En convection naturelle, le nombre de Nusselt, est fonction du nombre de Rayleigh (Ra) et du nombre de Prandtl (Pr), tous trois sans dimension. Cette fonction dépend du contexte d'étude, et les cas généraux sont donnés dans les tables de l'ASHRAE (2021).

1.3 Présentation des méthodes de caractérisation du comportement thermique d'un matériau destiné aux enveloppes extérieures de bâtiment

1.3.1 Caractérisation des propriétés thermiques du matériau ³

Pour la conception d'un revêtement permettant de lutter contre les ICU, les cinq variables à évaluer sont les suivantes :

- la réflectance solaire r_s (*s. d.*) ;
- l'émissivité thermique ε (*s. d.*) dans les infrarouges lointains (GLO) ;
- la conductivité thermique k ($W.m^{-1}.K^{-1}$) ;
- la chaleur spécifique Cp ($J.kg^{-1}.K^{-1}$) ;
- la masse volumique ρ ($kg.m^{-3}$).

³ Certains paragraphes proviennent de l'article présenté au chapitre 3.

La mesure de ces paramètres peut se faire suivant des normes, notamment celles de l'organisme international ASTM. Selon le contexte expérimental, il peut exister plusieurs normes différentes pour mesurer un même paramètre.

La réflectance solaire peut être mesurée sur le terrain à l'aide d'un pyranomètre, ce qui requiert un échantillon d'au moins 4 m de diamètre (« ASTM E1918-21 », 2021); ou bien elle peut être mesurée en laboratoire à l'aide d'un spectrophotomètre à sphère intégrée créant un rayonnement incident sur une bande de [200; 2500] nanomètres (« ASTM E903 », 2020). L'échantillon alors requis a généralement un diamètre de 100 mm maximum et doit être plat. L'émissivité thermique peut être mesurée sur le terrain ou en laboratoire à l'aide d'un émissomètre (« ASTM C1371 », 2022). Cet appareil est cependant peu commun.

La masse volumique peut être mesurée de nombreuses façons, et cela dépend de la nature de l'échantillon étudié (Pratten, 1981). Par exemple, pour les échantillons qui ne peuvent pas être plongés dans l'eau, il est possible d'utiliser un pycnomètre à gaz, la mesure se fait donc en laboratoire sur des échantillons de l'ordre du microgramme ou de centaines de grammes selon l'équipement (« ASTM D4892 », 2019).

La chaleur spécifique est généralement mesurée à l'aide d'un Differential Scanning Calorimetry (DSC) sur des échantillons de l'ordre du gramme (« ASTM E1269 », 2018).

Enfin, la conductivité thermique est généralement mesurée à l'état stationnaire à l'aide d'une plaque chauffante ou d'un système de fil chaud, mais il existe également des méthodes transitoires telles que la méthode flash ou le Modified Transient Plane Source (MTPS) (MTPS) (« ASTM D7984 », 2021 ; Jannot, 2011).

1.3.2 Caractérisation des transferts thermiques subis par un matériau

Les cinq paramètres cités précédemment sont sollicités en tout temps par les transferts thermiques (rayonnement, conduction et convection) subis par une enveloppe de bâtiments. Le choix de la méthode de mesure de chacun de ces paramètres dépend fortement du matériau étudié et chaque méthode nécessite un format d'échantillon différent. Par ailleurs, sur des matériaux hétérogènes, une méthodologie spécifique au cas d'étude doit être établie pour choisir le nombre et la position des mesures à réaliser afin d'obtenir une idée globale du

comportement thermique du matériau (Ruuska, Vinha, & Kivioja, 2017 ; Wilk, Smusz, & Filip, 2023). Mesurer chaque paramètre isolément est donc généralement complexe et consommateur de temps. C'est pourquoi il est aussi possible d'observer directement les flux thermiques. Pour rappel, un transfert de chaleur est caractérisé par l'évolution de la température dans l'espace et dans le temps (Jannot & Moyne, 2016). L'observation d'un flux peut donc être réalisée à l'aide de sondes de température. De nombreuses sondes existent, ce qui permet de couvrir un large panel de configurations. Par exemple, la mesure de la température en surface de matériaux peut se faire à l'aide de la thermographie, soit la cartographie des températures à l'aide d'une caméra thermique (Paljak & Pettersson, 1972). La caméra thermique capte le rayonnement infrarouge émis par une surface auquel elle associe une température grâce à la théorie des corps gris. Elle ne peut cependant être utilisée que pour les mesures de températures en surface. Pour les mesures au sein du matériau ou des surfaces non accessibles, il est possible d'utiliser un thermocouple par exemple. Un thermocouple est l'assemblage de deux fils de métaux différents soudés sur une extrémité, comme montré à la Figure 1.14. L'extrémité soudée est la sonde. Lorsque la soudure est chauffée et l'autre extrémité est gardée à température ambiante, l'énergie thermique est conduite vers l'extrémité la plus froide. Ainsi, selon la conductivité du milieu, la quantité d'électrons qui se retrouvent à l'extrémité froide est différente pour les deux fils, ce qui induit une différence de tension, c'est l'effet Seebeck (Van Herwaarden & Sarro, 1986). La mesure de cette tension, qui est proportionnelle à la différence de température, permet de retourner à la température de la soudure.

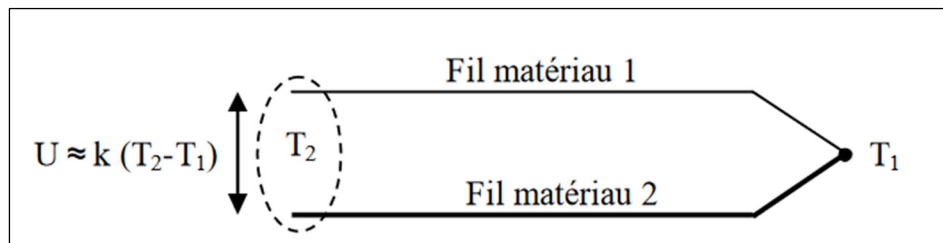


Figure 1.14 Représentation schématique du fonctionnement d'un thermocouple montrant un coefficient de proportionnalité k entre la différence de température et la tension mesurée

Tirée de Jannot (2011)

Il est aussi possible de mesurer directement un flux thermique, à l'aide de capteurs de flux. Il existe notamment les capteurs de flux thermiques de type thermopiles. Ces capteurs se présentent sous la forme de fines plaques, parfois souples, et sont constitués d'une multitude de thermocouples (Singh, Yadav, & Khandekar, 2017). Ainsi, le flux thermique est mesuré à l'aide du gradient de température mesuré entre les deux faces du capteur, à l'aide de l'effet Seebeck. Comme représenté à la Figure 1.15, ces capteurs mesurent le flux global qui les traverse, soit, la somme de tous les flux à leurs surfaces. Si le capteur est en surface du matériau étudié, alors la somme des transferts thermiques par rayonnement, convection et conduction est mesurée (voir Figure 1.15.a). S'il est pris entre deux matériaux, c'est le flux de conduction au travers des deux matériaux qui est mesuré (voir Figure 1.15.b). Cela ne permet donc pas de distinguer les différents types de flux. De plus, le fondement utilisé pour ces capteurs (effet Seebeck) est sensible seulement à la partie infrarouge d'un rayonnement (Yala, 2007).

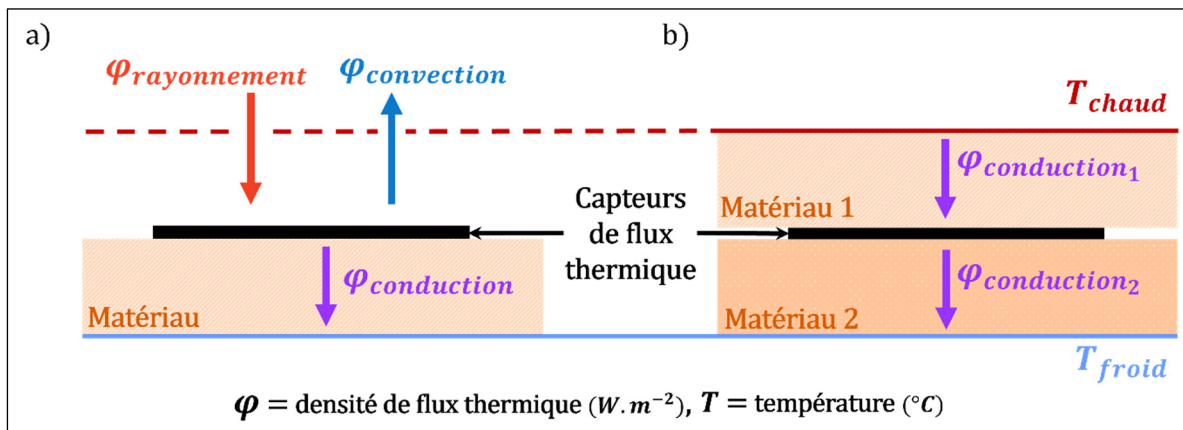


Figure 1.15 Représentation schématique du fonctionnement global des capteurs de flux exposés à un gradient de température, selon deux configurations : a) le capteur est à la surface du matériau ; b) le capteur est entre deux matériaux différents

CHAPITRE 2

OBJECTIFS DE LA RECHERCHE, MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE ET ORGANISATION DU DOCUMENT

2.1 Objectifs de la recherche

L'état des connaissances a permis d'identifier cinq propriétés régissant le comportement thermique d'un matériau : i) sa conductivité thermique k ; ii) sa chaleur spécifique Cp ; iii) sa masse volumique ρ ; iv) sa réflectance solaire r_s ; v) son émissivité thermique ε . Différentes méthodes pour mesurer ces paramètres ont aussi été explorées et ont montré que, selon le matériau, cela peut s'avérer complexe et consommateur de temps. Il est donc essentiel d'apporter à l'industrie une méthode d'évaluation des performances radiatives et isolantes de tout matériau destiné aux façades de bâtiment, qui soit facile à mettre en œuvre et adaptable à l'échantillon. Ainsi, l'objectif principal et les trois sous-objectifs qui en découlent sont décrits à la Figure 2.1.

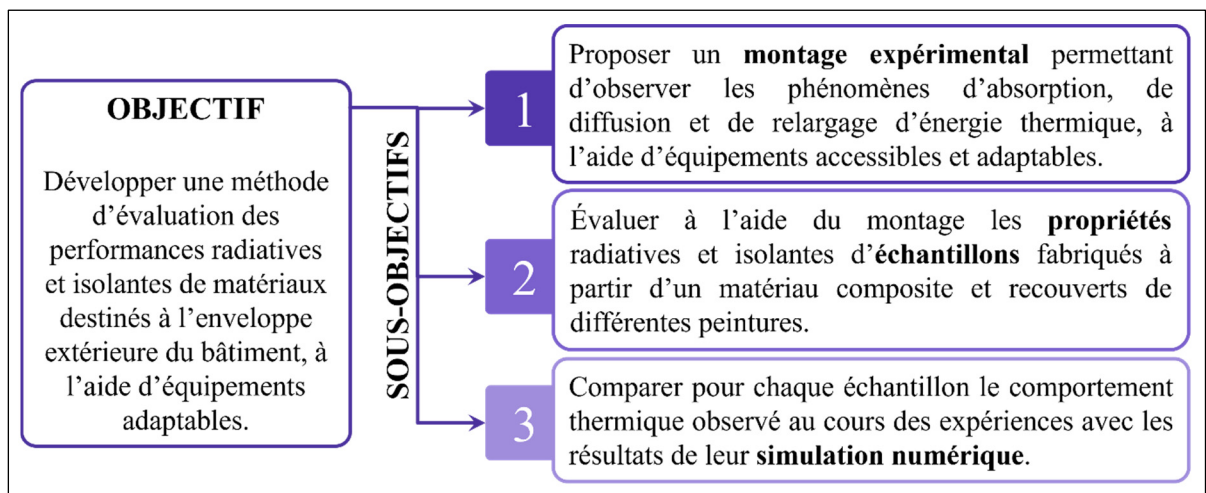


Figure 2.1 Étapes de la démarche méthodologique suivie pour répondre à l'objectif de la recherche

2.2 Méthodologie expérimentale

2.2.1 Proposition d'un montage expérimental pour évaluer les performances radiatives et isolantes d'un matériau

Cette section traite du premier sous-objectif, qui est de proposer un montage expérimental. Ce montage vise à : (i) exposer un matériau à un rayonnement diurne et nocturne; (ii) observer sa capacité à réfléchir et absorber le rayonnement incident ; (iii) observer l'énergie thermique conduite d'une face à une autre ; (iv) observer la capacité à réémettre l'énergie thermique emmagasinée. Pour assurer le contrôle des conditions expérimentales, les échantillons évalués étaient encastrés dans un isolant de polystyrène et irradiés par une lampe (voir Figure 2.2). Les mesures ont été réalisées à l'aide d'une caméra thermique et des thermocouples. Ainsi, le comportement thermique global des échantillons faisant intervenir les cinq propriétés r_s , ε , k , Cp et ρ de manière simultanée a pu être observé. Le système est décrit en détail dans le CHAPITRE 3.

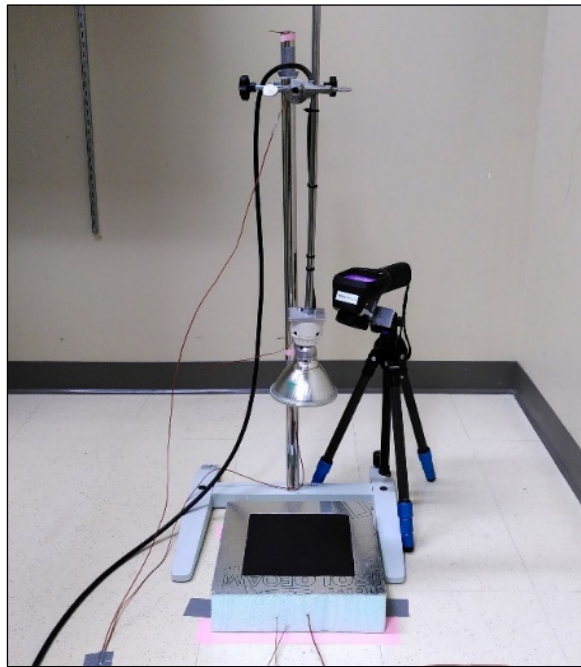











Figure 2.2 Montage expérimental proposé pour répondre au premier sous-objectif

2.2.2 Évaluation des performances radiatives et isolantes d'échantillons destinés aux façades extérieures de bâtiments, à l'aide de la méthode proposée

Le cas d'étude pour ce projet était un matériau composite de type polyuréthane additionné de fibre de verre. Ce matériau est destiné à la fabrication de panneaux de revêtements extérieurs pour les bâtiments. Dans le cadre de ce projet, les performances radiatives et isolantes de neuf échantillons ont été évaluées à l'aide du montage expérimental. Les échantillons étaient constitués du matériau composite et recouverts de peintures différentes (voir Tableau 2.1). Les peintures ont été choisies pour couvrir un panel de réflectances solaires. Six d'entre elles étaient un mélange de peinture transparente et d'une poudre. Les poudres ont été choisies soit pour leur grande réflectance (TiO_2 et BaSO_4), soit pour leur provenance du recyclage de matériaux post-consommation et de couleur pâle (verre et gypse recyclés).

Tableau 2.1 Liste des échantillons accompagnés de leurs nom, composition et photo

N°	Nom	Composition	Photo
1	<i>Black</i>	Composite recouvert de peinture noire	
2	<i>White</i>	Composite recouvert de peinture blanche	
3	<i>Clear</i>	Composite recouvert de peinture transparente	
4	<i>pBaSO₄</i>	Composite recouvert d'un mélange peinture transparente et poudre de sulfate de baryum (BaSO_4).	
5	<i>pTiO₂</i>	Composite recouvert d'un mélange peinture transparente et poudre de dioxyde de titane (TiO_2).	
6	<i>pEG1</i>	Composite recouvert d'un mélange peinture transparente et verre recyclé fin (0,04-0,0125 mm).	
7	<i>pEG2</i>	Composite recouvert d'un mélange peinture transparente et verre recyclé moyen (0,25-0,5 mm).	
8	<i>pGP</i>	Composite recouvert d'un mélange peinture transparente et poudre de verre .	
9	<i>pGypsum</i>	Composite recouvert d'un mélange peinture transparente et poudre de gypse .	

2.2.3 Comparaison des comportements thermiques observés par l'expérience avec ceux obtenus par simulation numérique

De manière à répondre au troisième et dernier sous-objectif, les résultats expérimentaux obtenus à l'aide du montage expérimental ont été comparés avec les résultats obtenus à la suite de simulations numériques. Pour cela, le logiciel FlexPDE a été choisi pour reproduire chaque essai réalisé avec le montage expérimental et obtenir les mesures correspondantes par résolution de l'équation de la chaleur (1.12) à l'aide des éléments finis. Le but de cette reproduction numérique était de constater si tous les paramètres thermiques énoncés dans l'état des connaissances et régissant les comportements thermique global des matériaux ont bien été sollicités au cours de l'expérience, et donc, de valider le potentiel du montage expérimental développé.

2.3 Organisation du document

À ce stade, l'état des connaissances présenté au CHAPITRE 1 a permis de cerner la problématique principale de ce mémoire et mené aux objectifs et méthodologies expérimentales générales exposés au CHAPITRE 2.

Par la suite, le CHAPITRE 3 répond aux deux premiers sous-objectifs (proposer un montage expérimental et évaluer les performances radiatives et isolantes d'échantillons à l'aide de ce montage) en présentant le montage expérimental développé ainsi que les neuf échantillons évalués. Ce chapitre est un article intitulé « *SIMPLE METHOD FOR CHARACTERIZING THE REFLECTIVE AND INSULATING PERFORMANCE OF MATERIALS DESTINED FOR BUILDING ENVELOPES* », soumis au journal « *Journal of Building Engineering* ».

Le troisième sous-objectif (comparer les résultats obtenus par l'expérience et la simulation) est adressé au CHAPITRE 4. Il est suivi d'une conclusion et d'un chapitre de recommandations.

Enfin, l'Appendice A reprend un article publié en août 2022 dans la revue « *Via Bitume* » dans le cadre de ce mémoire, qui avait permis de cerner le contexte d'étude. Il est intitulé « *COMPRENDRE LES ÎLOTS DE CHALEUR URBAINS ET ADAPTER LES VILLES* ».

CHAPITRE 3

SIMPLE METHOD FOR CHARACTERIZING THE REFLECTIVE AND INSULATING PERFORMANCE OF MATERIALS DESTINED FOR BUILDING ENVELOPES

Constance Leroy ^a, Éric Lachance-Tremblay ^a and Diego Ramirez Cardona ^a

^a Department of Construction Engineering, École de Technologie Supérieure (ÉTS),
1100 rue Notre Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada, H3C 1K3

Article soumis pour publication au *Journal of Building Engineering*, août 2023

3.1 Abstract

The urban heat island (UHI) phenomenon affects air quality and increases the risk of hyperthermia, a leading cause of death in urban areas. Faced with growing urban populations and climate change, it is imperative to adapt cities to extreme heat. Preventing the storage of incident radiative energy by the urban infrastructures is one of the possible adaptation measures, which is achieved by increasing the urban area's albedo (solar radiation reflection efficiency) and its capacity to quickly release the remaining absorbed energy. Materials with both these radiative capabilities are commonly referred to as "cool materials". However, in cold regions, such as Canada, this must be accompanied by efforts to insulate buildings. It is therefore appropriate to develop exterior cladding that is both "cool" and insulating. In addition, cladding should be made of materials with a reduced carbon footprint, such as recycled ones, in order to further contribute to the reduction of GHG⁴ emissions by the construction sector. Characterizing a material's radiative and insulating performances comes down to determining five of its properties: solar reflectance, thermal emissivity, density, specific heat and thermal conductivity ($r_s, \varepsilon, \rho, Cp$ and k). At present, this requires five independent experiments, defined according to the complexity of the cladding, which could have multidimensional heterogeneity. To avoid the characterization of these five properties

⁴ Green House Gases

independently, this article proposes a method for simultaneously characterizing the radiative and insulating behavior of materials intended for cladding elements. In this method, a thermal camera and thermocouples are used to record the temperature of the surface of the specimen as a function of time when exposed to simulated day and night radiation conditions. The results of this research show that it is possible to use the innovative method to compare samples with each other and to qualitatively assess which ones tend towards promising thermal behavior for UHI adaptation.

Keywords : UHI, cool insulating materials, infrared camera, composite

3.2 Introduction

3.2.1 Context

An urban heat island (UHI) occurs when the temperature of an urban area is higher than the corresponding surrounding rural area (EPA, 2008a ; Oke, 2006). Regarding UHI potential, the major distinction between rural and urban areas lies in the substitution of natural soils by artificial materials that absorb more heat. Indeed, it has been observed that the temperature of the urban area increases with the concentration of artificial materials (Hwang et al., 2020), thus intensifying the UHI phenomenon. Solar radiation is the main source of heat captured by these artificial materials (EPA, 2008a ; Modest & Mazumder, 2022). It consists of 7 % ultraviolet (250 to 380 nanometers), 49 % visible light (380 to 780 nm) and 44 % infrared (780 to 4000 nm) (« ASTM G173 », 2023 ; Wald, 2019). However, the origin of UHIs derives not only from solar absorption by artificial materials, but also from heat generated by anthropogenic activities such as the use of heating, ventilation and air conditioning (HVAC) systems in buildings (Allen et al., 2011). Moreover, the absence of ventilated corridors in cities, due to the construction of tall buildings separated by narrow streets, favors heat trapping by slowing down the nightly release of heat stored during the day (Droege, 2018 ; Hadavi & Pasdarsahri, 2021). This is why UHI are more pronounced at night than during the day (Boeters et al., 2012). Two common methods of measuring the intensity of an UHI are: (i) the difference in surface temperature (ground, walls and roofs) between urban and rural areas, and (ii) the difference

between the two areas in ambient air temperature 2 m above ground level (Mills & Stewart, 2021).

UHIs are detrimental to the health and cause an increase in mortality (Giguère, 2009) as they favor the appearance of heat stress, defined as the body's inability to regulate its temperature, while reducing air quality (H Akbari et al., 2001 ; Desplat et al., 2016 ; Rosenfeld et al., 1995). The UHI phenomenon is particularly noticeable in summer, and even more during heatwaves, when the temperature difference between urban and rural areas can reach values up to 12 °C in regions like North America and Europe (Oke, 2006). In the Canadian province of Quebec, a heat wave is defined as the succession of at least three days during which minimum and maximum temperatures reach the thresholds of 16-20 °C and 31-33 °C, respectively and depending on the region (Poitras, 2018). During July 2010, a heat wave in Quebec City increased the number of deaths by 33 % and patient admissions to emergency departments by 4 %, compared with the corresponding periods from 2005 to 2009 (Bustinza et al., 2013). With Climate Change, these heatwaves have already increased in frequency and intensity and will continue to do so (IPCC, 2023b). It is therefore essential to adapt urban environments to limit the UHI phenomenon which intensifies the effect of heat waves on urban populations. This research is related to the use of innovative construction materials as means of adaptation to UHI.

3.2.2 Properties of building materials contributing to the adaptation to UHI

3.2.2.1 Radiative properties of materials

One way of reducing the potential of UHI is to prevent heat storage in building materials while facilitating the release of the remaining absorbed energy. This translates respectively into: (i) increasing the ability of artificial materials to reflect solar radiation, so less is absorbed; and (ii) increasing their ability to emit heat in the form radiation, so heat is released more quickly at night (CRRC, 2021 ; EPA, 2008a ; Mourou et al., 2022 ; Zhao et al., 2014). These two are radiative surface properties of materials, called solar reflectance r_s (*n. d.*) – also known as albedo – and thermal emissivity ε (*n. d.*), respectively (Howell, Mengüç, & Siegel, 2016).

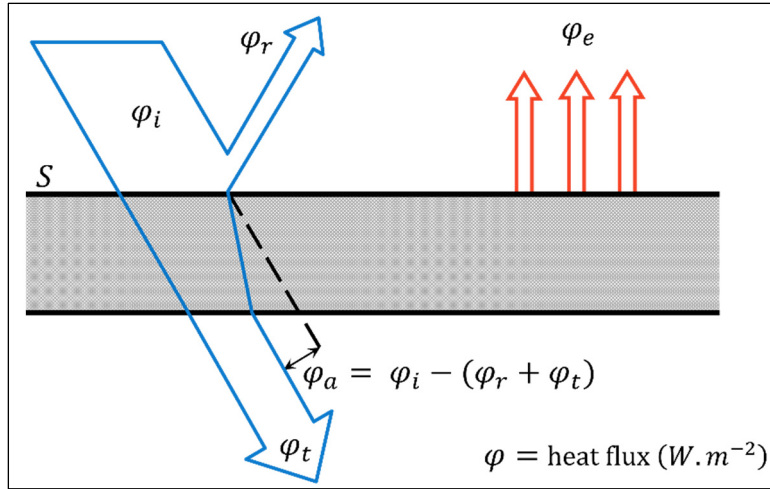


Figure 3.1 Radiation balance on a surface (S) reflecting (φ_r), transmitting (φ_t), absorbing (φ_a) an incident radiative heat flux (φ_i) and emitting (φ_e) heat

Figure 3.1 shows the radiative flux balance on a surface. Incident flux (φ_i), in this case solar radiation, is partly reflected (φ_r), partly absorbed (φ_a) and partly transmitted (φ_t) (Lavigne et al., 1994). And according to the law of energy conservation, the sum of incoming flows equals the sum of outgoing flows (3.1). The absorbed part is responsible for increasing the material's internal energy, and therefore its temperature. The transmitted part is null if the surface is opaque to the total incident radiation and depending on its thickness. The energy absorbed by the material is then partly re-emitted (φ_e) in the form of far-infrared radiation (beyond the range of solar radiation).

$$\varphi_i = \varphi_r + \varphi_a + \varphi_t \quad (3.1)$$

Solar reflectance is therefore the proportion of solar radiation that has been reflected, defined according to equation (3.2). Thermal emissivity is the efficiency of the surface to emit radiation compared to a perfectly emissive body called “black body” (Howell et al., 2016). It is described by equation (3.3). These two properties range from 0 to 1 and depend on the wavelength of the flux in question.

$$r_s = \frac{\varphi_r}{\varphi_i} \quad (3.2)$$

where φ_i is the sun's (incident) radiation

$$\varepsilon = \frac{\varphi_e}{\varphi_{black\ body}} \quad (3.3)$$

Solar reflectance can be increased by using light color materials which will reflect at least the visible part of the solar irradiance (Santamouris, 2014). It is considered that the black color has a solar reflectance close to 0, and that the white color is close to 1. Surface roughness can also impact the capacity to reflect an incident radiation, as more photons get trapped in rough surfaces than in smooth ones (Berdahl & Bretz, 1997). Light colored and smooth surfaces are then preferred to increase solar reflectance.

Regarding thermal emissivity, paints generally present high values. In contrast, metals present very low emissivity at long wavelengths, unless they have been oxidized (ME, 2011). Non metallic materials are then preferred to increase thermal emissivity.

“Cool materials” is the name given to materials with high solar reflectance and high emissivity (CRRC, 2021 ; EPA, 2008a) as they maintain a lower surface temperature when exposed to solar radiation than the conventional ones (Synnefa et al., 2008). For example, in California, the addition of white coating (high reflectance and emissivity) to various roofs reduced the daily temperature peak of 33-42 °C on the roof surface (Hashem Akbari et al., 2005).

Reducing the surface temperature (i.e., reducing the amount of heat absorbed) ultimately leads to a lower ambient temperature (Lemonsu, 2012). For example, in the city of Montreal (Canada), increasing the albedo of the urban area (i.e. roads, walls and roofs) from 0.2 to 0.8 would result in a reduction of the ambient temperature of 1 °C (at 2 m above ground level) (Touchaei & Akbari, 2013). In like manner, increasing the albedo and emissivity of facade materials in Paris (France) to a value close to 1 would reduce by 1 °C the ambient temperature (Lemonsu, 2012).

Benefices of using cool materials on buildings envelopes include: (i) decreasing surface temperatures (H Akbari et al., 2001 ; Simpson & McPherson, 1997), (ii) decreasing average exterior air temperature (Lemonsu, 2012), (iii) improving thermal comfort by avoiding heat

transfer from the exterior to the interior (EPA, 2008b), and (iv) decreasing the use of air conditioning (Hosseini et al., 2018 ; Sedaghat et al., 2023 ; Simpson & McPherson, 1997). The latter can have a significant impact on UHIs as air conditioning can be responsible for an average air temperature increase of 0.5 to 2 °C due to the transfer of indoor heat to the outdoors (De Munck et al., 2013 ; Mills & Stewart, 2021). In the United States of America, air conditioning was responsible for the emission of 110 million metric tons of CO₂ (Mtc) in 1995 and approximately 135 Mtc in 2015 (Rosenfeld et al., 1995). However, increasing the albedo can be problematic in cold regions, as it increases the demand for heating to assure indoors thermal comfort during cold periods (Hosseini et al., 2018). Overall, the impacts and benefits of installing cool materials always depend on the region of the world concerned, depending on climate (amount of solar radiation received, presence of humidity, season, etc.) (Fitria et al., 2019 ; Zhao et al., 2014), customs (use of heating and air conditioning) (Hosseini et al., 2018) and energy sources (coal, solar, etc.) (Ritchie, 2021 ; Ritchie & Rosado, 2021).

3.2.2.2 Insulation properties of materials

Energy consumption associated with the use of heating, ventilation and air conditioning (HVAC) in buildings can be reduced by increasing their envelope's thermal inertia, meaning their capacity to resist outside temperature variations (see Figure 3.2) (Izard, 2006). This is commonly referred to as thermal insulation.

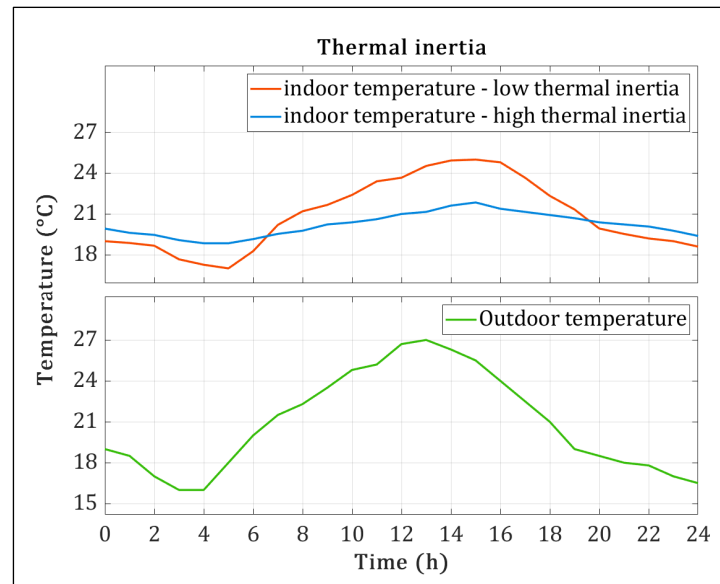


Figure 3.2 Low and high thermal inertia difference
Adapted from « Inertie thermique » (2007)

Thermal inertia can be assessed using two parameters (Verbeke & Audenaert, 2018): (i) thermal diffusivity a ($m^2 \cdot s^{-1}$), which is the speed at which a material's temperature fluctuates as a function of external loads; and (ii) thermal effusivity E ($J \cdot K^{-1} \cdot m^{-2} \cdot s^{-\frac{1}{2}}$), which is a material's capacity to exchange thermal energy with its environment. Thermal diffusivity and effusivity depend on the material's density ρ ($kg \cdot m^{-3}$), specific heat Cp ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) and thermal conductivity k ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$). Density is the mass of material required to occupy one (1) cubic meter (Venkateshan, 2021). Specific heat characterizes the amount of thermal energy a kilogram of material must absorb to raise its temperature by one degree Kelvin (Venkateshan, 2021). Thermal conductivity is the amount of energy that can be transmitted particle to particle (i.e. by conduction) in one second between two faces of the same material, one (1) meter apart and one (1) degree Kelvin apart (Venkateshan, 2021). These three properties related with the thermal inertia of materials are referred to as “insulating properties” in this article.

A very good insulator readily available on Earth is air (Evans, 2015), which is why expanded polystyrene (EPS), a rigid, light, air-filled material, is often used for insulation (Casini, 2020). Metals, on the other hand, are excellent conductors, and are therefore avoided in the manufacture of insulating materials (Thermtest Inc., 2023). To increase thermal inertia,

insulating materials can be added to the building envelope, particularly from the outside, as this prevents the exchange of thermal energy with the outside air (Izard, 2006).

3.2.3 Current characterization of material's radiative and insulating properties

The preceding paragraphs underscore the relationship between heat transfer and five material-dependent properties: (i) solar reflectance r_s , (ii) thermal emissivity ε , (iii) density ρ , (iv) specific heat C_p and (v) thermal conductivity k . To develop cool, insulating materials, it is therefore necessary to evaluate those five thermal properties. On a laboratory scale, solar reflectance is generally determined using an integrating sphere spectrophotometer in accordance with ASTM E903 (« ASTM E903 », 2020). Thermal emissivity can be determined in the laboratory or in the field using an emissometer (« ASTM C1371 », 2022). Density measurement depends on the nature of the material, and a wide range of methods and equipment are available, including gas pycnometers (« ASTM D4892 », 2019 ; Pratten, 1981). Specific heat can be measured using Differential Scanning Calorimetry (DSC) (« ASTM E1269 », 2018). Finally, thermal conductivity is generally measured in a stationary state using a hot-guarded plate or hot-wire system, but there are also transient methods such as the flash method or the Modified Transient Plane Source (MTPS) (« ASTM D7984 », 2021 ; Jannot, 2011). The choice of the methods to measure these five properties is highly dependent on the nature of the material. Moreover, these methods require each a different size of sample, generally small. In the case of composite materials, which are commonly used for cladding, it is therefore often necessary to do a significant number of tests to represent the material on a large scale (Ruuska et al., 2017), which requires a specific methodology for the sample studied and time-consuming. The complexity and slowness of material characterization are obstacles to the development of cool, insulating materials. It is therefore necessary to propose a reliable method for assessing the radiative and insulating performance of any material destined for building envelopes.

3.3 Research objectives

The objective of this research is to develop a reliable, fast method that allows R&D services in the construction industry to evaluate the radiative and insulating performances of materials destined to building envelopes. Therefore, a laboratory test method based on the work of Rosati, Fedel, & Rossi (2021), was developed in order to recreate the heat transfers experienced by an external building envelope under controlled environmental conditions. This novel method allows avoiding climate variations that occurs outdoors, which are difficult to take into account and not controllable. It characterizes heat transfer as the evolution of the material's temperature in time and space (Jannot & Moyne, 2016). The experimental setup developed in this research (Figure 3.3) includes: (i) a white heat lamp as a radiation source, (ii) a thermal camera to measure the temperature of the irradiated surface, and (iii) thermocouples to measure the temperature at various location of the sample. This equipment was chosen for its affordability and common market presence, making it easy to implement in the industry.

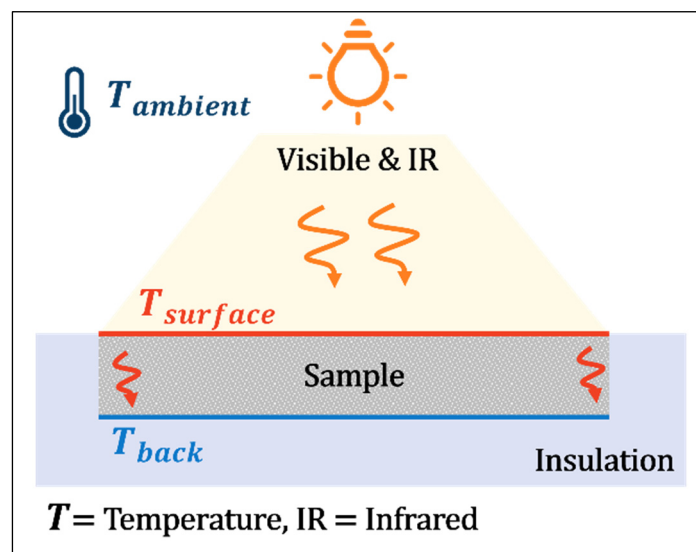


Figure 3.3 Schematic representation of the global functioning of the novel experimental setup

3.4 Materials and Method

3.4.1 Description of the characterization method

Figure 3.4 presents a schematic representation of the developed characterization method and a detail of the samples' instrumentation with the thermocouples. Figure 3.5 presents a schematic representation and an actual picture of the whole test setup.

The test set-up (sample, heat lamp, thermal camera and thermocouples) was placed in an isolated room without any ventilation mechanism and with opaque walls. After initiating the tests, no entering the room was possible to ensure temperature stability and no other radiation than the lamp one. Thus, the heat lamp was controlled from outside the room, where monitors showing the real time temperature allowed identifying the moment when a stationary state was obtained. During the test, the exterior surface of the samples is exposed to the perpendicular and centered radiation of the bulb until the temperature reaches a stationary state. The bulb is then turned off and the temperature measurement remains active until the temperature reaches a new stationary state. In this article, these two steps are named "Heating phase" and "Cooling phase", respectively. They represent day and night contexts, each presenting a transient and a stationary state. In real situations, building envelope materials are only exposed to solar radiation on their outer surface. This is why, in the experimental set-up, the sample is embedded in polystyrene insulation, as represented in Figure 3.4.a, so that only the exterior surface of the material is exposed to the lamp's radiation.

In this specific project, samples of a composite building envelope material (polyurethane with glass fiber) with different coatings were tested. The coating of all coated samples is 1.5 mm thick. There are three positions of interest where the temperature is measured in the sample: (i) at its surface $T_{surface}$ (reflection, absorption and emission), (ii) at the interface between coating and composite material $T_{interface}$ (conduction between two materials), and (iii) at the bottom of the sample T_{bottom} (conduction inside the composite material). These measure points are presented in Figure 3.4.a. Temperature at these positions is monitored in function of time by an infrared camera ($T_{surface}$) and thermocouples ($T_{interface}, T_{bottom}$). Details about the equipment used are presented in Tableau 3.1. Temperature data from these positions is

required to estimate the insulating performance of the composite materials and to analyze the surface temperature data obtained from the infrared camera.

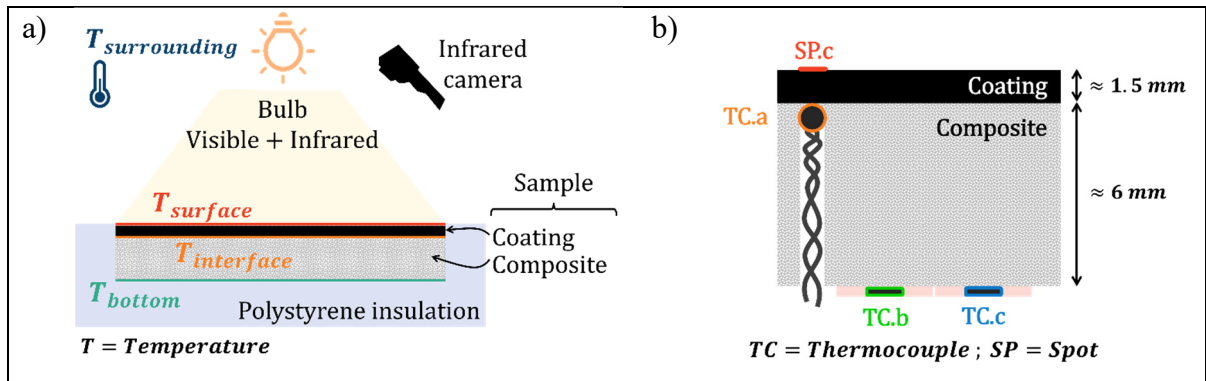


Figure 3.4 a) Schematic representation of the characterization method; b) schematic representation of the cross-section of the sample and the four different points of measurement

Thermocouples

A round thermocouple (called TC.a, see Figure 3.4.b) was used to measure $T_{interface}$. TC.a was placed under the coating by digging a hole reaching the interface between coating and composite. To assure the contact between the sensor and the material, a thermal paste was added into the hole before inserting TC.a.

Two flat thermocouples (called TC.b and TC.c) measured the temperature at the bottom of the sample (T_{bottom}). Placed 25 mm apart from each other (see Figure 3.6.b), these two measurement points allow taking into consideration the effects of horizontal conduction, the discontinuities formed by the incrustation of TC.a and the non-homogeneous flux of the bulb. In order to monitor the ambient temperature ($T_{surrounding}$), four thermocouples were placed around the set-up (i.e., TC.1, 2, 3 and 4). The first three thermocouples were placed at 1 m from the floor at different horizontal positions around the bulb, the fourth thermocouple was placed at the bulb height and at a horizontal distance of 150 mm from the bulb. A schematic representation of the positioning of the four thermocouples to monitor the ambient temperature is shown on Figure 3.5.a.

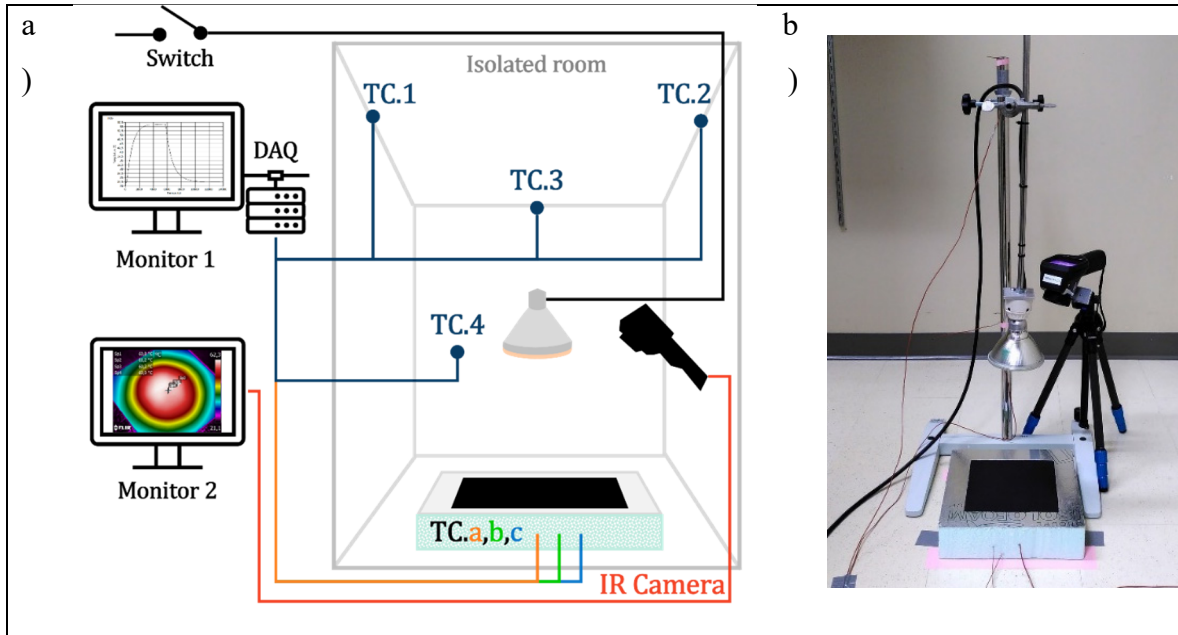


Figure 3.5 a) Schematic representation of the entire set-up including the Data Acquisition (DAQ) system outside the isolated room; b) Photo of the set-up inside the isolated room

Infrared camera

The surface temperature was recorded by the infrared camera in video format, including thermographic data. This allows to register the temperature evolution at any point of the surface during experiment. To get an accurate measurement of the surface temperature, the following parameters needed to be input into the camera software: (i) ambient temperature, (ii) optics temperature, (iii) thermal emissivity (ϵ) of the targeted surface and iv) distance from the surface to the camera. In this study, ambient temperature was $22 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ for every test according to the results from TC.1,2,3 and 4 (see Figure 3.5). The optics temperature was set as equal to the ambient temperature. Thermal emissivity (ϵ) values varied between 0.90 and 1 depending on the sample. The distance to the camera was set to 0 m as it was less than one meter (0.5 m) and the camera only accepts integer numbers. In Figure 3.4.b, SP.c is the spot at the center of the sample where the temperature is measured using the infrared camera ($T_{surface}$), this spot is also right above TC.a.

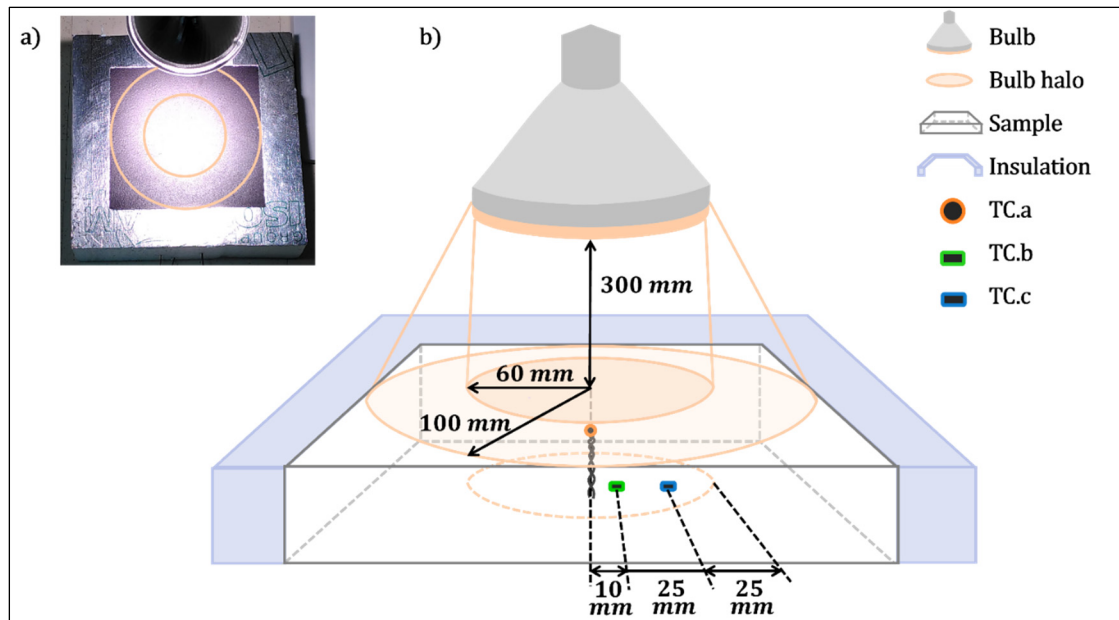


Figure 3.6 a) Photo of the Black sample being irradiated by the lamp, showing the two halos; b) schematic and not at scale representation of the sample being irradiated and precisions on the characteristic distances of the system

Heat lamp

The used white infrared lamp (Figure 3.4.a) emits both visible (white light) and infrared (heat) radiation. As shown in Figure 3.6.b, the heat lamp was placed at a distance of 300 mm from the sample surface. This distance between the heat lamp and the surface of the sample was chosen to ensure that the heat source doesn't burn the surface. Moreover, it ensures a homogeneous incident flux on sample surface. At this distance, and due to the bulb's shape (i.e. its beam angle), the diameter of the halo where the intensity is the highest and homogenous is equivalent to the bulb's (i.e. 120 mm), as represented in Figure 3.6. This halo is generally called the hotspot (TigerhawkT3, 2023). A second halo can be observed that covers a larger diameter with a lower intensity (diameter: 200 mm), which is called the corona halo.

Those two halos dictate the dimensions of the samples since the surface radiated must be larger than the hotspot. Therefore, square samples with dimension equal to the corona's diameter ($200 \times 200 \text{ mm}^2$) were fabricated. The position of each thermocouple (TC.a,b and c, Figure 3.6.b) was also determined to ensure that they are within the area delimited by the hotspot halo,

with a margin of 25 mm for the farthest one. This way, TC.a is at the center of both the sample and the halos. TC.b and TC.c are on the same radius.

Tableau 3.1 Detailed information about the equipment used

Material	Description
<i>Bulb</i>	Visible and infrared spectra, 90 W, Capsylite [®] halogen PAR38 model from Sylvania [®] , 121 mm diameter (4.75-inch), 30 ° angle beam.
<i>Infrared camera</i>	Model E60 bx from FLIR [®] , precision < 0.05 °C at 30 °C, range -20 to 650 °C, connection to computer by USB-mini port, FLIR Tools + [®] software to record videos.
<i>Tripod</i>	Pivoting head, Benro [®]
<i>Thermocouples</i>	13 round welded thermocouple type T and 18 flat welded thermocouples type T with fiberglass and silicone adhesive pad (TC-SA IOThrifty [™]), precision ±0.5 °C
<i>Thermal paste</i>	120 Series Silicone Oil-Based thermal joint compound, Wakefield-Vette [®] , thermal conductivity $k = 0.735 (W.m^{-1}.K^{-1})$ at 36 °C, operating temperatures -40 to 200 °C.
<i>Acquisition system</i>	16 channels high-density thermocouple module NI 9213 from National Instruments [™] , accuracy ±0.8 °C using LabView [™] software to record temperature's evolution.
<i>Insulator</i>	3-inch expanded polystyrene panel covered with a reflective membrane Isofoil [®] from Isofoam [®] , dimensions for one sample: 300 × 300 × 76 mm

3.4.2 Description of the tested materials

As previously mentioned, the cladding material investigated in this research is a composite made primarily of polyurethane and glass fiber. Nine different surface coatings were applied to this composite material to prepare the samples studied in this research (Tableau 3.2). Two of the coatings are considered as representing extreme reflection capacities: black paint (lowest reflection) and white paint (highest reflection). One coating is clear paint, and the six other coatings are various mixes of clear paint and powders. The powders play the role of pigments.

Four of them were chosen considering two aspects: (i) their color needs to approximate white, (ii) they have to be sourced from the recycling chain. These consist of recycled glass and gypsum. Additionally, two other powders were chosen as they are considered highly reflective pigments: barium sulfate and titanium dioxide (Berdahl & Bretz, 1997 ; Knighton & Bugbee, 2005 ; Levinson, Berdahl, & Akbari, 2005a ; Li, Peoples, Yao, & Ruan, 2021). Tableau 3.2 gives a summary of the composition of the coatings studied as well as the nomenclature used in this paper. Figure 3.7 presents the different powders used as pigments as well as the aspect of the final coating obtained. The pigments' concentration was chosen in order to obtain an opaque coating that allowed application on the surface.

Tableau 3.2 Summary of the coatings studied and nomenclature (Name)

Coating N°	Name	Composition
1	<i>Black</i>	Black paint.
2	<i>White</i>	White paint.
3	<i>Clear</i>	Clear paint.
4	<i>pBaSO₄</i>	Clear paint mixed with barium sulfate (BaSO ₄) powder.
5	<i>pTiO₂</i>	Clear paint mixed with rutile titanium dioxide (TiO ₂) powder.
6	<i>pEG1</i>	Clear paint mixed with small diameter recycled glass (noted EG1 here).
7	<i>pEG2</i>	Clear paint mixed with medium diameter recycled glass (noted EG2 here).
8	<i>pGP</i>	Clear paint mixed with recycled Glass Powder (GP).
9	<i>pGypsum</i>	Clear paint mixed with grinded recycled gypsum.

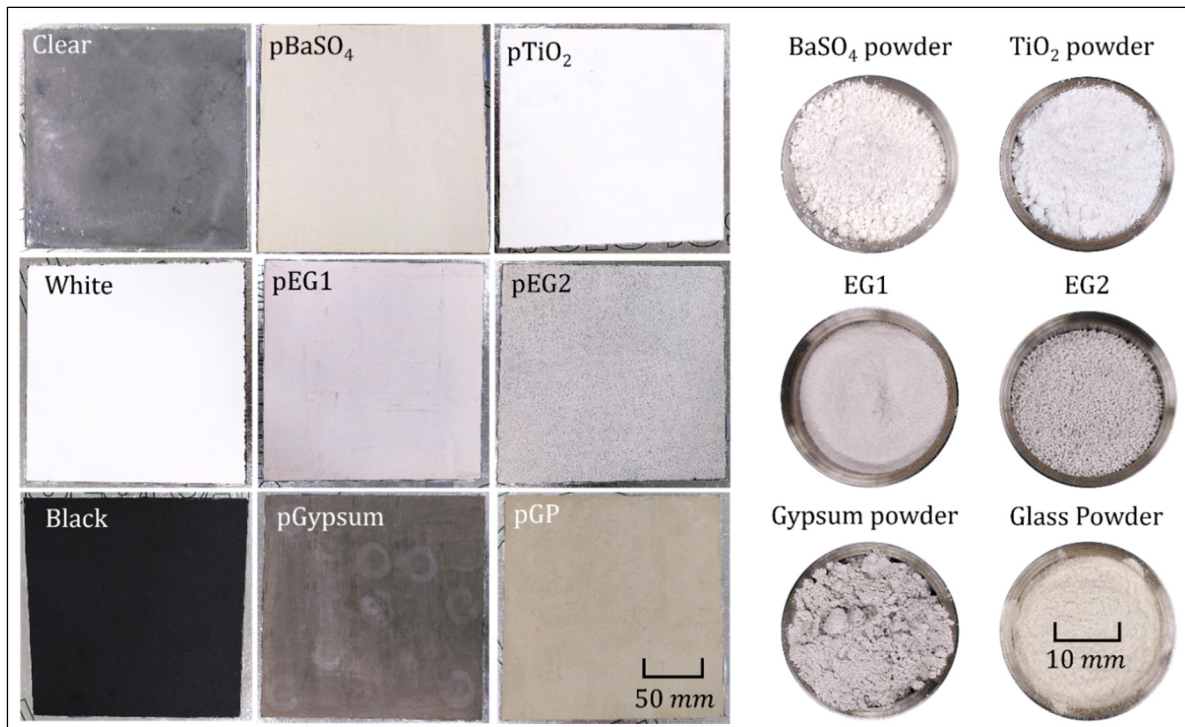


Figure 3.7 Aspect of the coated samples (left) and the correspondent powders used as pigments (right)

3.5 Detailed presentation of results for one test

In this section, a detailed presentation of the results from one test (White sample) will be presented. First, the various measurements from the thermocouples will be addressed in section 3.5.1. Second, surface temperature measurements made with the thermal camera will be treated in section 3.5.2. Third, a detailed analysis of the measurements and results will be presented in section 3.5.3.

3.5.1 Thermocouples' data acquisition

For all thermocouples (TC.1,2,3,4,a,b and c), the sampling rate was set to 30 seconds and the maximum acquisition duration was set to 5 hours. Thermocouples (and thermal camera) data acquisition began before starting the heat lamp so that the ambient temperature and the initial state of the sample were recorded for about 3 minutes.

The lamp was then turned on to start the Heating phase of the test. The acquisition software recorded and displayed the temperature evolution over time, enabling the detection of when a stationary state was reached. The stationary state is recognized when the temperature reaches a maximum and stable value (plateau, see Figure 3.8). Subsequently, by assimilating the system to an electrical circuit composed of a Resistor and a Capacitor (RC) subjected to a direct electric current, it is possible to approximate the characteristic time τ which corresponds to the instant when the system temperature reaches 63 % of the maximum temperature (Lévêque, Arer, & Berthelot, 2020). The RC circuit then reaches a stationary state after five times this characteristic time ($5 \times \tau$) has elapsed (Geandrot, s.d.). This makes it possible to predict approximately the instant at which the stationary state begins.

The lamp is then turned off after another five times the characteristic time to start the Cooling phase of the test. The end of the experiment is again marked by the appearance of a temperature plateau, this time equivalent to room temperature.

By looking at Figure 3.8, it is possible to verify the methodology of assimilation to an RC system. Focusing on TC.a, the maximum temperature measured was 57 °C. Therefore, the temperature reached at the characteristic time was 36 °C, which corresponds to 63 % of the maximum value. The characteristic time is then approximately 500 s, meaning that the stationary state is reached at 2 500 s. Figure 3.8 presents a clear plateau for TC.a at around 5 000 seconds.

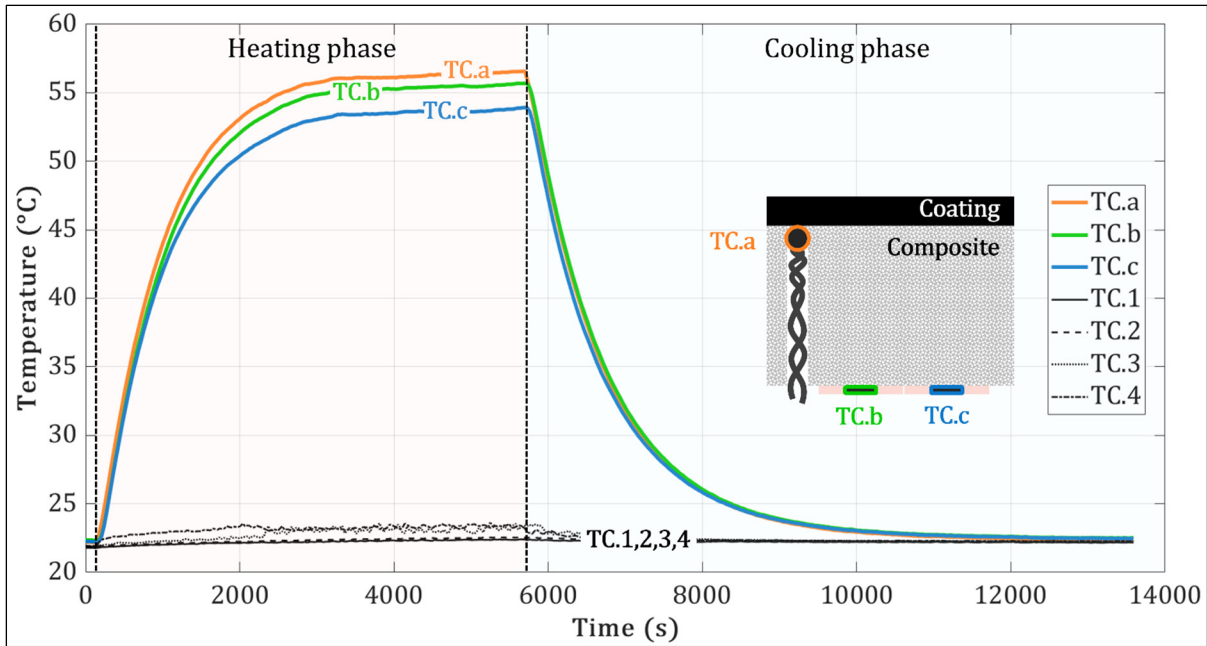


Figure 3.8 Temperature evolution measured by the different thermocouples during the test; TC.1,2,3 and 4 correspond to the ambient temperature, TC.a,b and c correspond to the temperature at the different measurement positions in the White sample

As seen on Figure 3.8, the shape of the temperature curves measured by thermocouples TC.a,b and c are equivalent, showing consistency in the thermal behavior of the system. However, depending on the position of the thermocouple, the maximum temperature reached varies. TC.a, which is the closest one to the surface of the sample, reaches the highest temperature. This will be discussed in greater detail in section 3.5.3.

The stability of the ambient temperature measured by thermocouples TC.1,2,3 and 4 was assessed by analyzing three indicators: (i) temperature variability, i.e., the difference between the minimal (T_{min}) and maximal (T_{max}) temperatures recorded during the test, (ii) the average temperature and (iii) its standard deviation. The results are presented in Tableau 3.3.

Tableau 3.3 Ambient temperature stability indicators at every measurement point over the whole experiment

$T_{surrounding}$ Stability indicator	TC.1	TC.2	TC.3	TC.4
Variability ($^{\circ}C$) [$T_{max} - T_{min}$]	0.6	0.7	1.8	1.7
Mean value ($^{\circ}C$)	22.2	22.3	22.6	22.7
Standard Deviation ($^{\circ}C$)	0.1	0.1	0.4	0.4

From Tableau 3.3, it can be concluded that TC.1 and TC.2 have a more stable temperature than TC.3 and TC.4. This is justified by their position in space: TC.1 and TC.2 are located farther away from the lamp, while TC.3 and TC.4 are located closer to the lamp (see Figure 3.5), making them directly exposed to the flux generated by the lamp. The average temperature of the four thermocouples is $22.4^{\circ}C$, which is $0.5^{\circ}C$ above the initial ambient temperature. A variation is therefore observed, but it remains below one degree, on average. By comparison, the sample's surface reaches a temperature of $65^{\circ}C$, which allows considering an ambient temperature variation of $0.5^{\circ}C$ in average as negligible. The assumption of stable ambient temperature is therefore not refuted.

3.5.2 Surface temperature measurements

Prior to commencing the thermal camera recording, the focus was fine-tuned by briefly placing a hand on the sample. This allowed heat to be transferred to the sample's surface, enabling the camera to be accurately focused, resulting in a clear depiction of the hand's outline. It was then necessary to wait around 15 minutes for the heat to dissipate before starting the recording. The sampling rate for the whole test was chosen to 7.5 images per second.

The thermographic video record began before the heating phase so that the initial state was taken into account. Figure 3.9.a shows thermal discontinuities with an amplitude of $0.5^{\circ}C$ on the sample's surface during the initial state. These are due to the focus process.

Figure 3.9.b and c present examples of the recorded images at the transition and stationary states of the Heating phase of the tests. In turn, Figure 3.9.d and e present examples of both states of the Cooling phase.

The center spot SP.c is easily identifiable in Figure 3.9.b as a darker (colder) point at the center of the sample. This is due to the fact that the hole made to insert the thermocouple TC.a creates a discontinuity and makes this point cooler, especially during the transition state of the Heating phase. Then, SP.c does not represent the maximal temperature reached at the surface. Nonetheless, since SP.c is right above TC.a, this is the only point coming from the thermographic record that will be considered in this article for the analysis of temperature measurements. However, it is important to note that SP.c might under-estimate the surface temperature of the sample exposed to the hotspot halo.

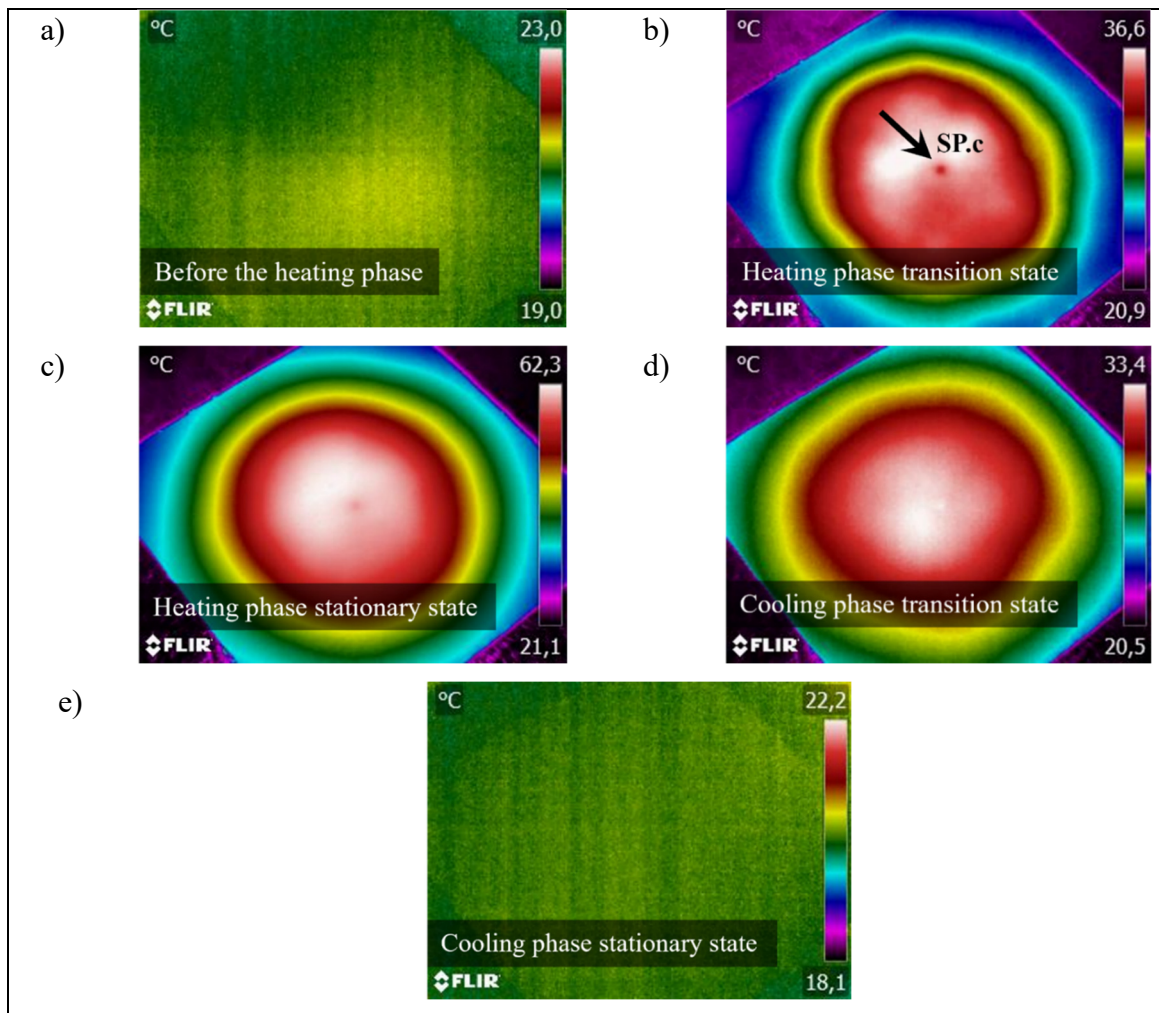


Figure 3.9 Extracted images from the video recorded by the infrared camera for the White sample: a) before the heating phase (i.e. initial state); b) three and a half minutes after the Heating phase began; c) stationary state of the Heating phase; d) 17.6 minutes after the Cooling phase began; e) stationary state of the Cooling phase

Temperatures at SP.c were extracted from the video recordings in table format and displayed in function of the time. To do so, extreme values that could interfere with data analysis were first identified. In this study, the tests presented from none to four extreme values. For the test presented in this article, two extreme temperature values were noticed at 5 405 and 13 466 seconds with amplitudes of 96.5 and 56.5 °C, respectively, which is about 30 °C above the mean temperature at these instants. On average, the number of acquisitions was 100 471 per test, so four acquisitions showing extreme values represent only 0.005 % of the test, which is considered negligible. Thus, these extreme values were removed from the analysis. After data treatment, the evolution of the temperature at SP.c can be plotted as observed on Figure 3.10.

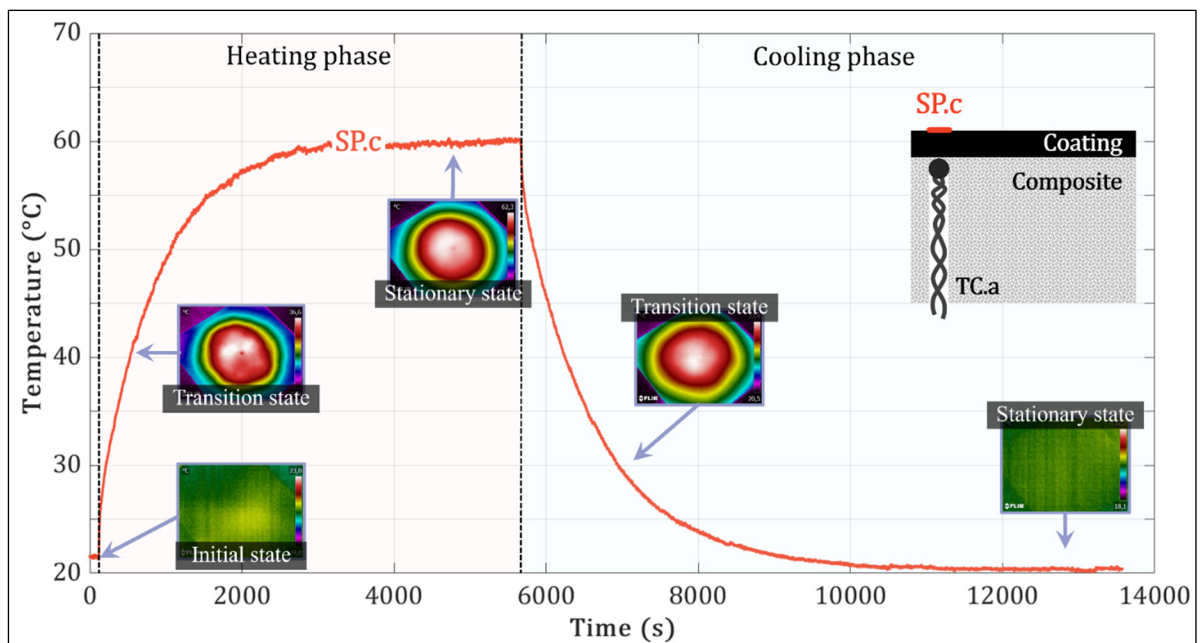


Figure 3.10 Evolution of the temperature measured at SP.c with the infrared camera during a test on the White sample

3.5.3 Temperature data treatment and analysis

As the temperatures were measured by two means during the experiment, the two acquisition systems were not perfectly synchronized: there was a time lag between the data from the thermal camera and that from the thermocouples. To compare measurements from these two acquisition methods, it is necessary to synchronize them retrospectively.

The superposition of temperatures evolutions at points SP.c and TC.a in Figure 3.11.a and b allow to see this temporal difference. The time difference in this case is about 30 seconds. On the same figure, it appears that the initial temperatures at the two points do not coincide. This temperature difference is even more marked during the stationary state of the Cooling phase where it averages 1.9 °C, as shown in Figure 3.11.c. Moreover, Figure 3.11.c shows surface temperature values at SP.c that are lower than the ambient temperature, which is incompatible with the nature of the stationary state of the Cooling phase where the sample reaches a thermal equilibrium with the surrounding air (i.e. reaches ambient temperature).

This temperature anomaly pointed out to a possible inconsistency in the data input to the thermal camera software (ambient and optics temperature, thermal emissivity) prior to carrying out the experiment. The following paragraphs present the actions carried out to suppress the time and temperature gaps between thermal camera and thermocouples.

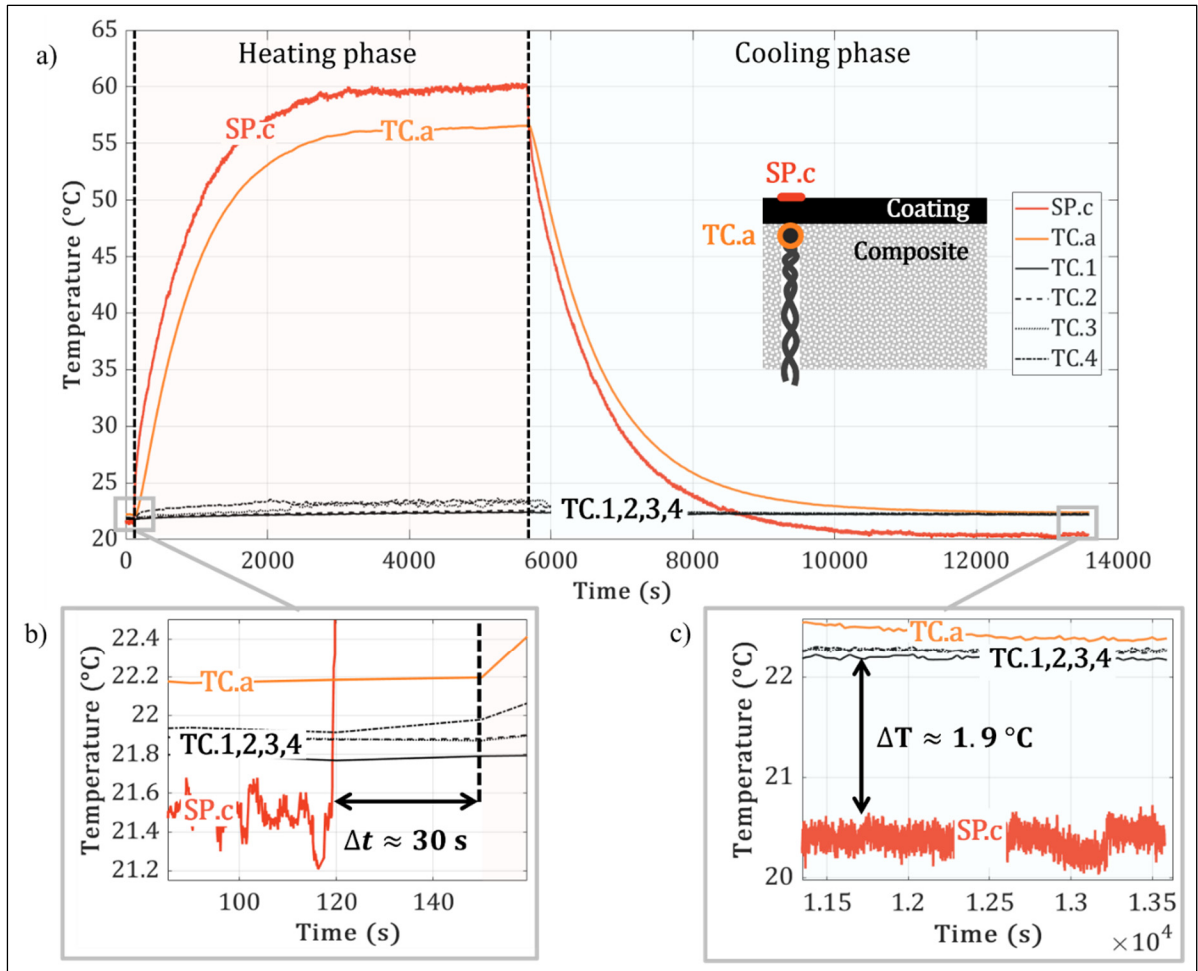


Figure 3.11 a) Superposition of SP.c and TC.a for the test on the White sample; b) zoom on the beginning of the test showing the time gap between the two signals; c) zoom on the end of the test (Cooling phase stationary state) showing the temperature gap between SP.c and the ambient temperature

Time gap suppression

To suppress the time gap, three steps were followed:

- Step 1: estimating the instant corresponding to the start of the lamp for both thermocouples and infrared camera acquisitions. These are called $t_{TC_{on}}$ and $t_{cam_{on}}$, respectively. The time difference d_1 (s) is then calculated using equation (3.4).

$$d_1 = |t_{TC_{on}} - t_{cam_{on}}| \quad (3.4)$$

- Step 2: trimming the thermocouples' signal. As a reminder, the thermocouples' sampling rate $step_{TC}$ (s) is larger than the thermal cameras. The number of acquisitions n_{TC} (*n. d.*) to be removed from the thermocouples' signals is calculated from equation (3.5).

$$n_{TC} = euclid_q\left(\frac{d_1}{step_{TC}}\right)\left(+1 \text{ if } euclid_r\left(\frac{d_1}{step_{TC}}\right) > 0\right) \quad (3.5)$$

Where $euclid_q\left(\frac{d_1}{step_{TC}}\right)$ is the quotient of the Euclid division of d_1 by $step_{TC}$, and $euclid_r\left(\frac{d_1}{step_{TC}}\right)$ is the rest of the same division. If the rest is superior to 0, 1 must be added.

- Step 3: trimming the infrared camera signal by d_2 seconds, which corresponds to n_{cam} acquisitions (equation (3.6)). As a reminder, the sampling rate of the camera is 7.5 images per second.

$$n_{cam} = d_2 \times 7.5 + 1 \quad (3.6)$$

where: $d_2 = n_{TC} \times step_{TC} - d_1$

Temperature gap suppression

To suppress the temperature gap, the parameters entered in the thermal camera software were verified using the ambient temperatures analysis. In this case, the adjustable temperatures on the software (ambient temperature and optics temperature) were already correctly set to 21.9 °C, the initial average temperature measured by TC1.2.3 and 4. The last parameter to be modified was therefore the thermal emissivity of the surface under study, which was unknown. To get an approximate value of the surface's emissivity, the temperature evolution over time at SP.c was extracted using different emissivity values. In this case, emissivities of 0.90 and 0.91 were tested in addition to 0.98, the original emissivity. All SP.c extractions were then plotted on the same graph (see Figure 3.12), along with the thermocouples' signals. Figure 3.12 presents the end of the Cooling phase. The instant marking the start of the stationary state of the Cooling phase is noted (12 000 s). The average temperature for each extraction of SP.c

was calculated for the period between this instant and the last record. The average ambient temperature is calculated over the same period for each thermocouple. An emissivity value of 0.91 was retained as it gives the closest average surface temperature to the average ambient temperature.

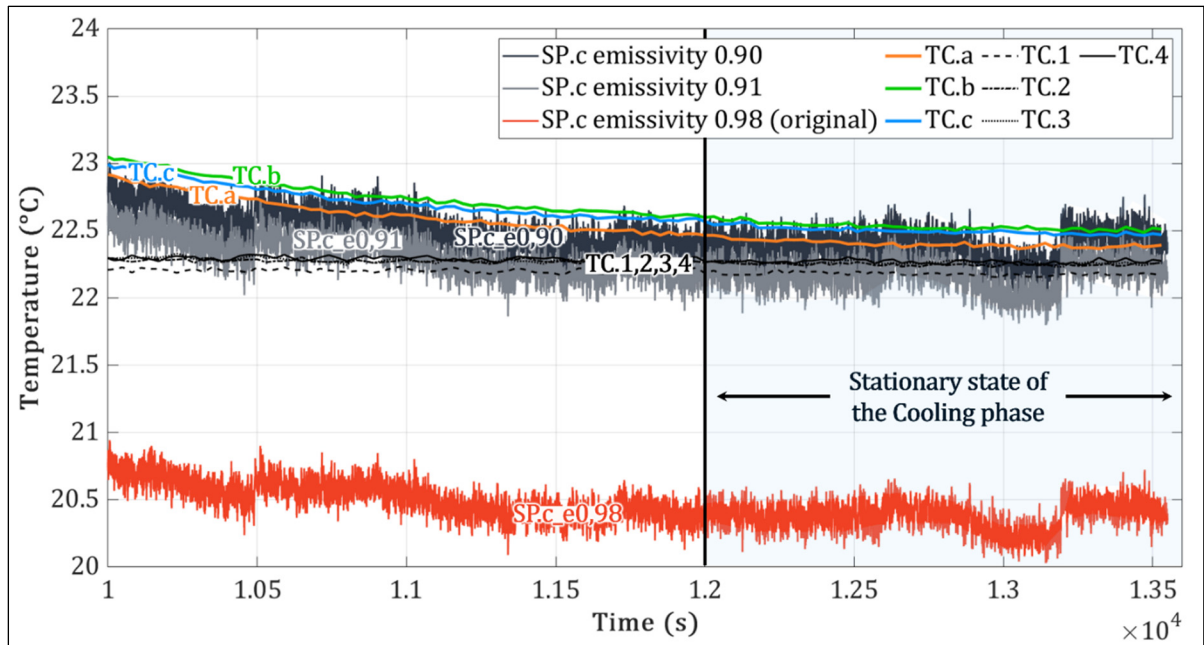


Figure 3.12 SP.c values calculated with different surface emissivity values and comparison with the thermocouples' temperature signals at the end of the Cooling phase for a test on the White sample

Values of interest for data analysis

After time shifting and emissivity adjustment, the temperature curves at each measuring point were superimposed (see Figure 3.13.a). Figure 3.13.b shows that the time gap no longer exists, but that there is once again a temperature difference between SP.c and the ambient temperature during the initial state. This may be due to the thermal transfers generated during the fine-tuning of the camera's focus as explained in section 3.5.2. It is therefore not certain that the initial state was at thermal equilibrium. Nevertheless, the end of the test presents a clear thermal equilibrium (see Figure 3.13.c), where the temperatures of all the measurement points coincide.

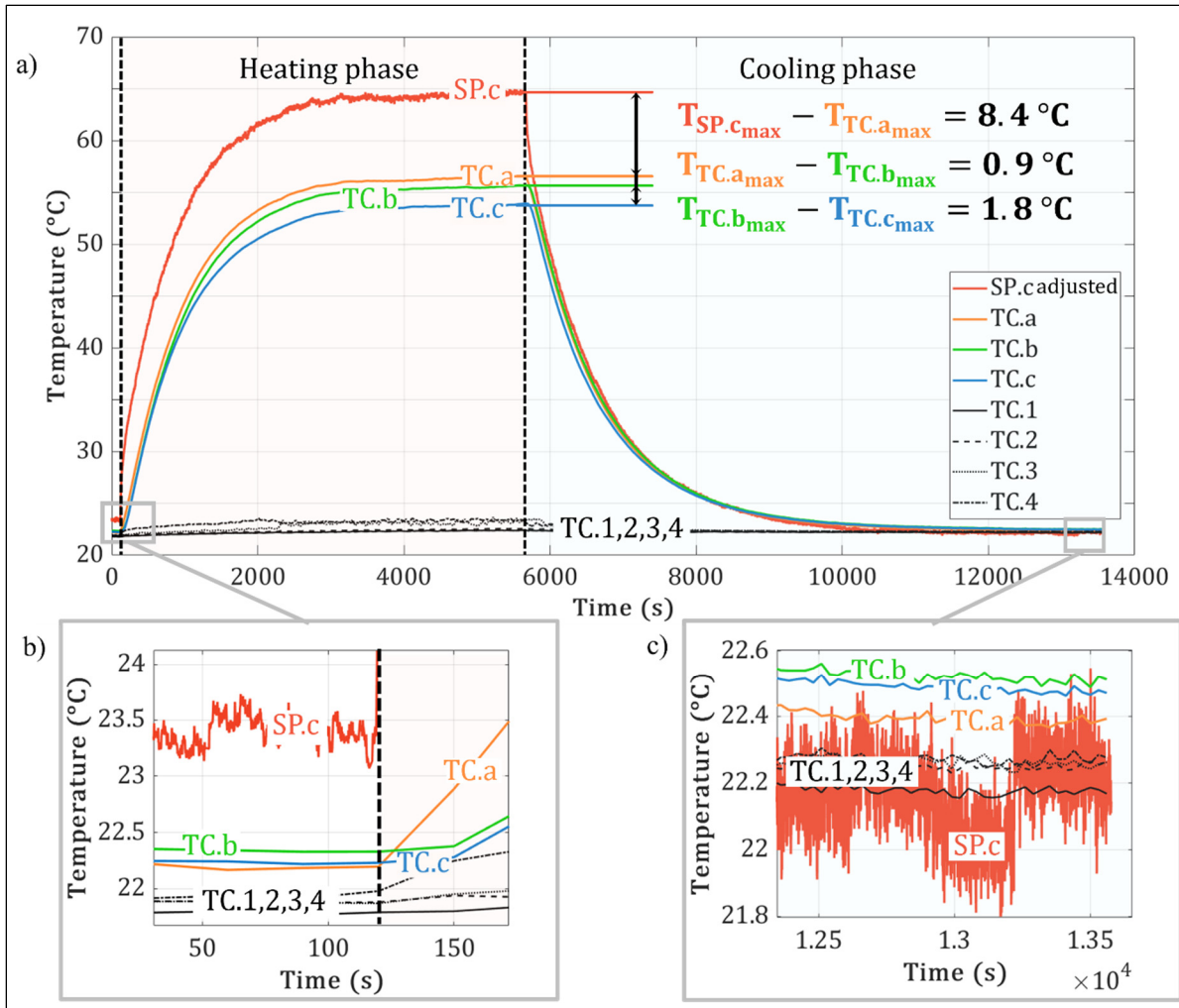


Figure 3.13 a) Superposition of all curves for the test on the White sample after suppression of time and temperature gaps; b) zoom on the beginning of the test showing that the curves are adjusted over time; c) zoom on the end of the test showing that the temperatures are in the same range (thermal equilibrium)

The values of interest that are used for data analysis are listed in Tableau 3.4. The "raw data" line refers to values extracted from the plots before adjustment of the temperature gap (i.e., emissivity adjustment) (see Figure 3.11.c). The "fitted data" line corresponds to values extracted from the plots after the time and temperature adjustments described in the previous paragraphs.

As presented in Tableau 3.4, the ambient temperature difference between the initial and final states of the test is 0.3 °C. In contrast, the maximum temperature measured at SP.c (after

emissivity adjustment) is 65 °C at the surface, i.e., a variation of 43 °C compared with the initial state. Thus, the variation in ambient temperature (0.3 °C) corresponds to 0.7 % of the variation in temperature at SP.c (43 °C) during the test. The hypothesis that the ambient temperature is stable during the test is therefore validated.

Tableau 3.4 Values of interest of the raw and fitted data from the presented test on the White sample

Treatment state	Initial ambient temperature measured (°C)	Final ambient temperature measured (°C)	Emissivity (<i>n. d.</i>)	Maximum temperature measured (°C)			
				Surface SP.c	Under paint TC.a	Back TC.b	Back TC.c
<i>Raw data</i>			0.98	60.4			
<i>Fitted data</i>	21.9	22.2	0.91	65.0	56.6	55.7	53.9

Discussion on the results from one test

The complete methodology of the proposed original test allowing to evaluate the radiative and insulating performances of materials destined for building envelopes was presented in section 3.5 using a test on the White sample as case study. The following discussion concerns the test methodology and applies to all other samples studied in this research.

A difference of 8.4 °C is observed between the surface (SP.c) and the underside of the coating (TC.a) (see Figure 3.13.a). However, the hole created to insert TC.a under the paint creates a discontinuity visible on the thermal camera (see Figure 3.9.b). Thus, the temperature difference between the surface (SP.c) and the interface (TC.a) may be strongly influenced by this discontinuity. This hypothesis will be investigated in a future study using numerical simulation analysis.

On the other hand, the temperature difference between TC.a and TC.b was observed to be of 0.9 °C (see Figure 3.13.a). Since these two thermocouples are positioned to estimate the

insulating performance of the composite slab, it can be concluded that the white coating has a greater impact on the sample's heat transfer properties than the slab itself.

A temperature difference of 1.8 °C was observed between TC.b and TC.c, which may be due to heat diffusion from the hottest point (center of the sample) to the coldest one (edges of the sample). Indeed, as described in section 3.4.1, the intensity of the radiation received at the surface of the sample decreases with the distance from the center of the hotspot.

In terms of insulating performance, it would first appear that the composite layer was less effective than the coating layer in protecting the hidden face from incident flux. However, the discontinuity created by TC.a changes the local thermal behavior of the system, and the temperature at this point may not be representative of the temperature at the actual interface between the coating and the composite.

In terms of radiation reflection, it is difficult to conclude on the reflective performance of the White sample without comparing it to others. As it is coated with white paint, it is expected to have absorbed less energy than a darker sample. Thus, its surface temperature should be lower than that of a darker sample subjected to the same radiation and under the same conditions.

As the same composite was used for all the samples in this study, this test was compared with the tests carried out on the other samples (Tableau 3.2) to verify this hypothesis by means of the proposed test procedure.

3.6 Summary and discussion of the results for the tests carried out on sample with different coatings

The same procedures as described in section 3.5 were applied to the samples prepared with the coatings described in Tableau 3.2. The obtained values of interest from the “fitted data” are presented in Tableau 3.5. For some samples, two tests were carried out, enabling assessing the repeatability of the method. Thus, thirteen tests are presented in this section.

With the exception of the second test on the Clear sample, the ambient temperature in all tests increased by 0.1 to 0.4 °C between the start and end of the experiment (see Tableau 3.5). This variation is considered negligible, thus validating the hypothesis of ambient temperature stability for this experimental set-up. While thermal emissivity values ranged from 0.90 to 1 at the start of each experiment, post-experiment adjustments resulted in values ranging from 0.90

to 0.91 for all samples. This coincides with the emissivity value of 0.90 attributed to paints and general roofing materials in the literature (Anand, Sailor, & Baniassadi, 2021 ; ME, 2011 ; Santamouris, Synnefa, & Karlessi, 2011). The method described in this article can therefore be used to estimate the emissivity of the surfaces studied, provided that the ambient temperature is known. It is also observed that if the surface temperature increases, so do the temperatures below the paint and at the bottom of the samples (see Tableau 3.5). Maximum measured surface temperature ranges from 60 to 120 °C, depending on the coating.

Tableau 3.5 Summary of the values of interest for each experiment (fitted data only)

Sample	Initial ambient temperature measured (°C)	Final ambient temperature measured (°C)	Emissivity (<i>n. d.</i>)	Maximum temperature measured (°C)			
				Surface SP.c	Under paint TC.a	Back TC.b	Back TC.c
<i>pTiO₂</i>	21.5	21.7	0.90	63.4	54.2	53.8	52.8
<i>White 2*</i>	21.9	22.2	0.91	65.0	56.6	55.7	53.9
<i>White 1*</i>	22.0	22.2	0.91	65.7	56.0	55.0	52.4
<i>pEG1</i>	21.8	22.2	0.90	76.1	66.0	64.9	61.5
<i>pBaSO₄</i>	21.8	21.9	0.90	78.5	69.5	67.9	63.4
<i>pEG2</i>	21.5	21.9	0.90	83.2	72.6	71.0	66.4
<i>pGP</i>	21.8	22.2	0.90	96.1	83.0	80.3	75.4
<i>Black 1*</i>	21.9	22.2	0.90	104.4	87.1	84.4	76.2
<i>pGypsum 1*</i>	21.5	21.8	0.90	106.2	94.0	91.3	85.7
<i>pGypsum 2*</i>	22.3	22.4	0.91	108.4	95.7	93.2	87.3
<i>Black 2*</i>	22.4	22.5	0.91	109.6	93.7	91.4	86.7
<i>Clear 1*</i>	22.1	21.9	0.91	114.6	99.5	96.4	90.5
<i>Clear 2*</i>	21.9	22.2	0.91	114.6	100.9	97.5	90.7

* 1 stands for the first test and 2 for the second test runned on the sample. When no number is mentioned, only one test was carried out.

The first conclusion to be drawn from Tableau 3.5 is that the darker the color of the sample, the higher its surface temperature. However, an exception must be made for the Clear sample, which, despite its light color (see Figure 3.7), shows the highest surface temperature for both

tests. This sample therefore absorbed a greater amount of thermal energy than the others. Its ability to reflect incident radiation is therefore the lowest of all the samples, which is counter-intuitive given its color. The surface temperature is then an indicator of the sample's ability to reflect incident radiation: the lower the reflection, the higher the absorption, and therefore the higher the temperature (Jannot & Moyne, 2016). Ranking the samples by maximum surface temperature gives an idea of their relative reflective performance. Even though it is not possible to assign a value to this reflectance, a coherent qualitative assessment based on the comparison with other samples is possible.

Furthermore, reflectance is directly dependent on the flux received, as it is defined as the ratio of reflected to received flux (see Figure 3.1) (« ASTM E772-21 », 2021). The reflectance classification of the samples obtained in this study, is therefore valid for the incident radiation generated by a white halogen-tungsten lamp, which emits visible and far-infrared radiation close to that of the Sun, giving it properties close to those of solar radiation (Davidson, s.d. ; Modest & Mazumder, 2022 ; Osman, 2022 ; Wald, 2019).

The results of tests on samples coated with recycled glass powder (pEG1 and pEG2), which have the same composition and color but different grain sizes, suggests that the proportion of incident flux absorbed is greater with a larger grain size than with a finer one. This would be in line with the assumption that rougher surfaces present less reflection capabilities than smooth ones. Large grain sizes increase surface roughness, enhancing the likelihood that an incident photon will have to bounce off the surface several times before being reflected back, which leads to a higher probability of absorbing energy. This could explain why the coarser pEG2 sample absorbed more energy than the finer pEG1 one. This confirms that the finest particles are the preferred choice for reflective paint. This is not to mention other effects associated with increased surface roughness, such as increased susceptibility to soiling and reduced self-cleaning capacity. The appearance of dirt on a surface generally reduces its reflectance over time (Bretz & Akbari, 1997).

In this article, the samples investigated differ in their coating, but the substrate is made of the same composite material. In this particular case, the dispersion of the various components in the polyurethane matrix is not guaranteed to be constant, so it is likely that the composition will change slightly between two samples. In order to limit the effects of this situation on the

test results, the samples' size was chosen to be 20 times greater than the size of the composite material's components. This allows assuming that, on average, all substrates have the same composition. Temperature differences between two samples are therefore considered to be attributed solely to their different coating finishes.

To estimate the insulating performance of a sample, a temperature gradient must necessarily be studied between two points located on opposite faces of planes perpendicular to the incident flux, i.e. one point on each face of the insulation in its intended direction of insulation. In this study, only points SP.c and TC.a fulfill these conditions (i.e. they are facing each other) (see Figure 3.4.b). Nonetheless, they are also aligned with the material discontinuity made by the hole dug to insert TC.a, generating uncertainties about the reliability of the measurements taken at these points. Therefore, to understand the insulating performance of the samples, it would be necessary to record the temperatures of surfaces located above TC.b and TC.c, which would give two temperature gradient values across the thickness of the samples, exempt from the material discontinuity. This will be addressed in a future study.

3.7 Conclusion

Short-term adaptation of urban areas to UHIs requires the development of low-cost, reflective and insulating building envelopes. To this end, it was identified that an inexpensive and rapid test method was needed to assess the thermal behavior of cladding materials, regardless of their composition or complexity. This study proposes a such a test method using common laboratory equipment to reproduce the daytime and night-time exposure conditions of an exterior building envelope, and to assess its thermal behavior. The equipment chosen is affordable and available on the market.

In this article, the proposed method was carried out on nine samples of a composite cladding material with nine different coatings. The novel test method allowed to distinguish materials that absorb the most heat from those that absorb the least, thus enabling, by means of a process of elimination, to find the materials that best meet UHI adaptation objectives. Certain physical phenomena, such as the influence of color or particle size on surface temperature, were also observed with the proposed test method. Interestingly, unforeseen results were obtained for the

sample coated with a clear paint, which presented higher radiation absorption than darker samples in spite of its light color and smooth surface. This proves the importance of testing thermal behavior, as intuition might lead to wrong conclusions. The capacity of the proposed test method to detect this unexpected behavior testifies to its potential usefulness for the industry.

However, this method provides only qualitative means of assessing thermal behavior and is based on the comparison of materials that have been subjected to the same test. It was also pointed out that, for the same material, more than one test should be carried out before drawing any conclusions.

The method is adaptable to any type of material, as long as it's flat. In fact, the test can be adapted to samples with different thicknesses and widths. It is also possible to reduce the intensity of the incident flux by moving it away from the sample's surface, or by choosing a less powerful bulb. However, care should always be taken to compare materials that have been subjected to the same test conditions and configurations.

The novel test method allowed to assess surface thermal emissivity through the use of an infrared camera to measure surface temperature and its comparison with ambient temperature measured by thermocouples. This methodology needs to be further evaluated by applying it to materials with known surface emissivity.

3.8 Acknowledgements

This work was supported by Mitacs through the Mitacs Accelerate program and the company Rinnox[©] (3155 boul. Entreprises Terrebonne, QC, Canada, J6X 4J9T).

CHAPITRE 4

RÉSULTATS DES SIMULATIONS NUMÉRIQUES ET COMPARAISON AVEC LES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

4.1 Description de la méthodologie de simulation

4.1.1 Mise en contexte

L'objectif de ce chapitre est de vérifier si la méthode expérimentale proposée permet d'observer les transferts thermiques sollicitant les cinq propriétés d'intérêt ($r_s, \varepsilon, k, C_p, \rho$) soulevées au CHAPITRE 1. Pour cela, une modélisation numérique des expériences a été réalisée à l'aide du logiciel FlexPDE. Les équations impliquant les cinq propriétés ont été intégrées dans le logiciel ainsi que les conditions aux limites illustrées à la Figure 4.1, qui sont le moteur des variations de température observées lors des expériences.

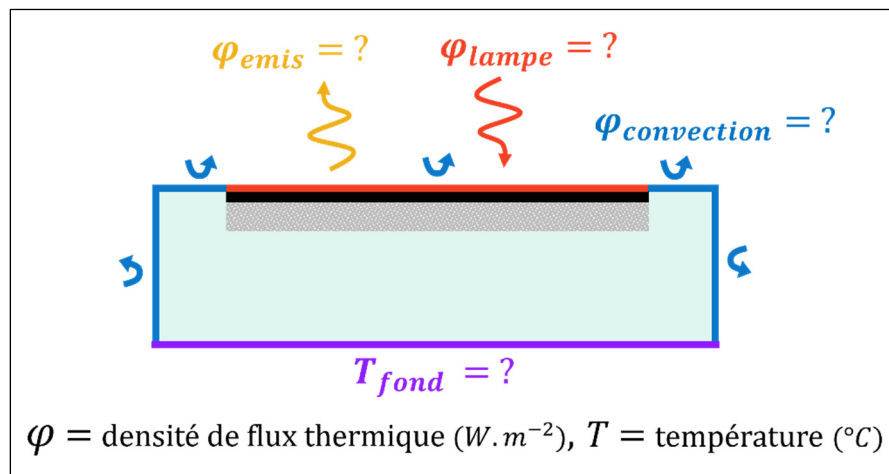


Figure 4.1 Bilan des flux sur le système à simuler et identification des conditions aux limites

Par conséquent, pour réaliser les simulations numériques, les paramètres suivants ont été identifiés et caractérisés :

- (i) la géométrie du système à simuler comprenant l'échantillon et l'isolant polystyrène ;
- (ii) les équations à résoudre ;
- (iii) l'état initial du système à simuler ;
- (iv) le flux émis par la lampe (par rayonnement) ;
- (v) le flux émis par la surface irradiée (relargage de chaleur par l'échantillon) ;
- (vi) le flux de convection sur les faces au contact de l'air (évacuation de la chaleur dans l'air) ;
- (vii) la température au contact du sol (voir T_{fond} à la Figure 4.1) du système à simuler ;
- (viii) les propriétés thermiques du système à simuler qui apparaissent dans les équations à résoudre ($r_s, \varepsilon, k, Cp, \rho$), pour chaque matière.

Ce chapitre présente les étapes qui ont permis d'évaluer ces paramètres et comment la méthode proposée au CHAPITRE 3 a été simulée pour finalement confronter les résultats obtenus par l'expérience et la simulation.

4.1.2 Identification de la géométrie du système à simuler

Le système à simuler était constitué de trois composantes : (i) le composite polyuréthane/fibre de verre ; (ii) la peinture ; (iii) l'isolant polystyrène dans lequel était encastré l'échantillon (matériau composite et la peinture). Chacune de ces composantes devait être représentée dans la simulation avec sa géométrie réelle. Pour la simulation, seule une section (2D) du système a été représentée, de manière à simplifier le problème. Comme montré à la Figure 4.2, les composantes ont été délimitées à l'aide des épaisseurs de l'isolant polystyrène (e_{isol}), le composite (e_{comp}) et la peinture (e_{peint}), ainsi que des longueurs du composite (L_{comp}) et de la section d'isolant polystyrène autour (L_{isol}).

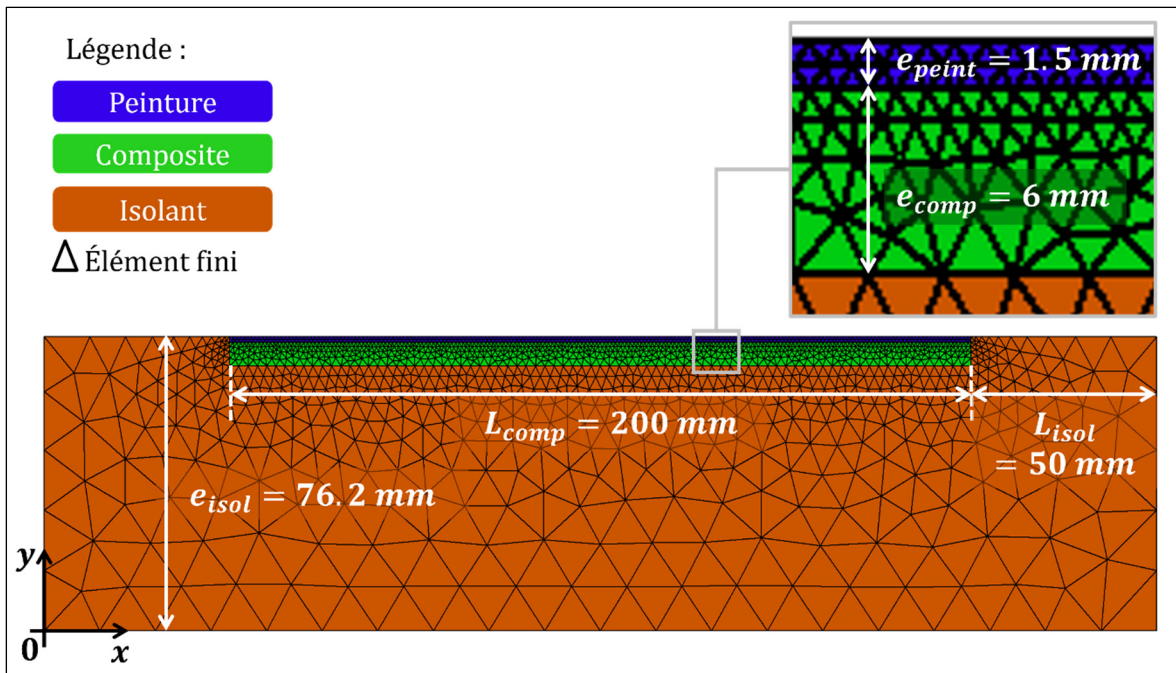


Figure 4.2 Géométrie du système étudié dans FlexPDE séparant les trois composantes (bleu pour la peinture, vert pour le composite et orange pour l'isolant polystyrène) et montrant les longueurs et épaisseur de chacune

FlexPDE (PDE Solutions Inc, 2022) est un logiciel de résolution d'équations différentielles (l'inconnue est une fonction du temps et/ou de l'espace), à l'aide des éléments finis : les solutions sont approchées sur des subdivisions du système étudié. Les éléments finis sont créés en maillant le système, et ici, chaque élément était un triangle. Plus le maillage est dense, plus la résolution est précise. Il y avait besoin d'une grande précision pour la couche de peinture puisque celle-ci est très fine, c'est pourquoi le maillage était plus dense dans cette composante comme montré à la Figure 4.2.

4.1.3 Identification de l'équation à résoudre, des conditions initiales et aux limites

Comme expliqué au CHAPITRE 1, la température au sein d'un matériau, soumis à un transfert thermique par conduction, peut être déterminée à l'aide de l'équation de la chaleur. Cette équation a été résolue à chaque élément du maillage par le logiciel. Comme le système a été modélisé sous une forme 2D, alors l'équation de la chaleur a été résolue sous sa forme 2D :

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = \rho \cdot Cp \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.1)$$

où T est la température en K, k est la conductivité thermique ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$), ρ la masse volumique ($kg \cdot m^{-3}$), Cp la chaleur spécifique ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$), x, y les positions dans l'espace en m et t l'instant en secondes.

Pour déterminer la température en tout point du système et à chaque instant, une valeur de départ doit être spécifiée. Au temps initial, tout le système est à la température T_0 environnante. Les limites où s'appliquent les sources d'énergie thermique qui engendrent les variations de la température doivent également être spécifiées. Les conditions aux limites représentées à la Figure 4.3 sont les suivantes :

- (i) la température ambiante est constante et vaut T_0 (vérifié à la section 3.6) ;
- (ii) le flux radiatif incident est plus intense au « hotspot » que sur la couronne (voir section 3.4.1) ;
- (iii) le flux incident est décomposé en une partie visible et une partie infrarouge ;
- (iv) le flux visible est en partie réfléchi suivant la réflectance solaire (r_s) de l'échantillon ;
- (v) le flux infrarouge est absorbé suivant l'émissivité thermique (ε) ;
- (vi) la convection a lieu sur toutes les faces en contact avec l'air ;
- (vii) le flux émis provient de la surface de l'échantillon seulement ;
- (viii) la face en contact avec le sol reste à température constante (hypothèse à vérifier).

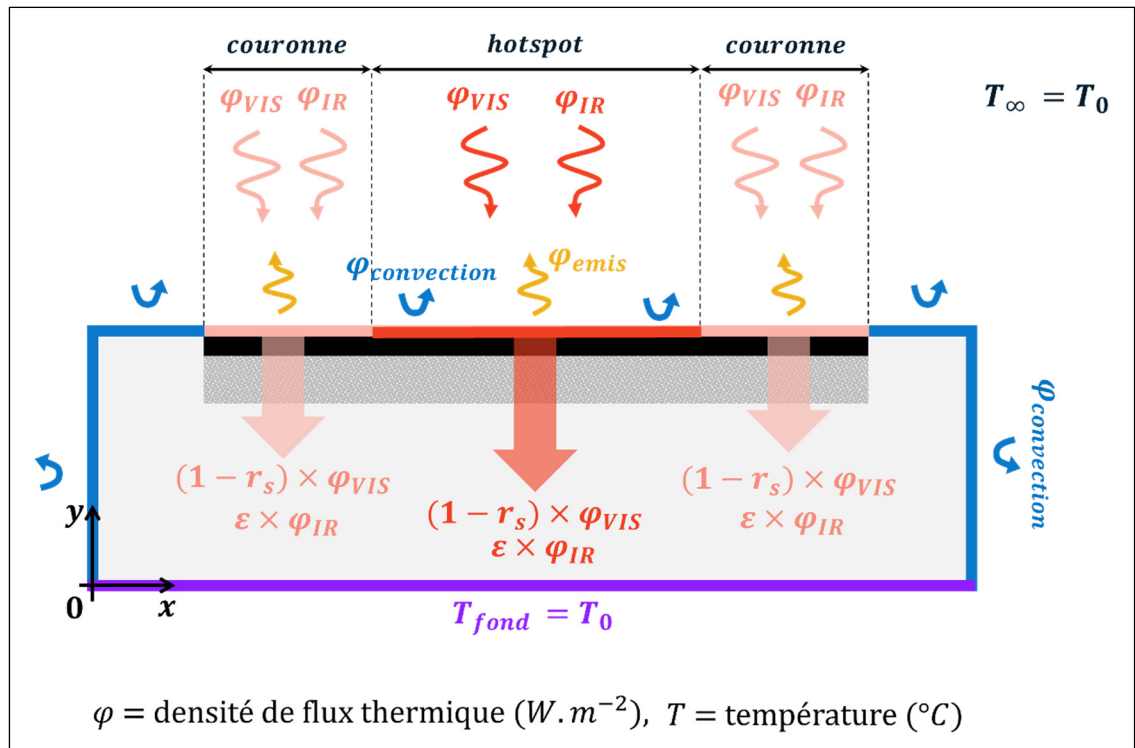


Figure 4.3 Représentation schématique des conditions aux limites et identification des différents transferts thermiques subis par le système à simuler au cours de la phase de chauffe

Pour attribuer une valeur au coefficient de convection, les équations proposées par l'ASHRAE (2021) ont été utilisées. La méthodologie employée pour le calcul du coefficient de convection est décrite à la section A-VIII.1 de l'ANNEXE VIII et la valeur obtenue est $h = 7,9 (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$. Ainsi le flux convection sur toutes les faces à la température T_s en contact avec l'air ambiant à la température T_∞ a été déterminé par l'équation (4.2).

$$\varphi_{convection} = 7,9 \cdot (T_s - T_\infty) \quad (4.2)$$

Le flux émis par la surface a été exprimé en fonction de sa température et son émissivité thermique suivant l'équation (4.3), où $\varepsilon = 0,905$. Les détails sont expliqués à la section A-VIII.2 de l'ANNEXE VIII.

$$\varphi_{emis} = \varepsilon(T_s^4 - T_\infty^4) \text{ (W.m}^{-2}\text{)} \quad (4.3)$$

Pour donner une valeur aux flux visibles et infrarouges de la lampe, des mesures expérimentales ont été réalisées et ont été complétées par des évaluations théoriques. Elles sont expliquées à la section 4.2.

Enfin, les valeurs des propriétés radiatives et isolantes des échantillons (face exposée et face cachée) ont été mesurées à l'aide de méthodes conventionnelles, ce qui est expliqué à la section 4.3.

4.2 Caractérisation du flux émis par la lampe

Deux méthodes ont été utilisées pour estimer le flux émis par la lampe. La méthode expérimentale utilisant des capteurs de flux, dont le fonctionnement a été décrit à la section 1.3.2, a permis de caractériser la partie infrarouge du flux émis par la lampe. La partie visible a été calculée à l'aide de la théorie des corps noirs.

4.2.1 Méthode expérimentale de caractérisation de la partie infrarouge du flux émis par la lampe

La méthode expérimentale de caractérisation du flux émis par la lampe utilise des capteurs de flux. Ces capteurs mesurent à la fois la température moyenne de la surface et le flux qui la traverse. Comme représenté à la Figure 4.4, un premier capteur (Capteur 1) a été placé entre le sol et l'isolant polystyrène. Ce capteur a permis de mesurer le flux qui a été transmis à travers l'entièreté du système (échantillon et isolant, voir Figure 4.5) et de vérifier l'hypothèse de stabilité de la température à cet endroit. Un second capteur (Capteur 2) a été placé à la surface de l'échantillon et au centre, assurant sa position au centre du hotspot (voir Figure 4.4). Ce capteur a permis de mesurer le flux infrarouge émis par la lampe là où l'intensité est maximale (au hotspot). Les thermocouples mesurant la température ambiante en quatre points (TC1,2,3 et 4, voir Figure 3.5) ont également été sollicités durant ces essais. La liste des équipements utilisés est disponible au Tableau 4.1.

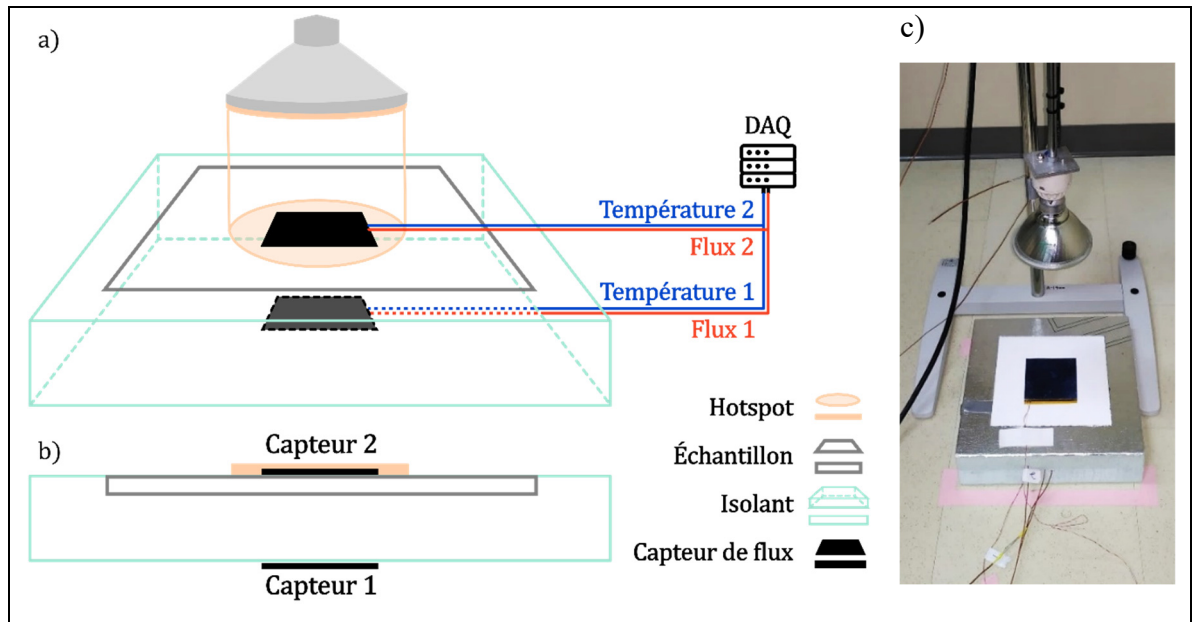


Figure 4.4 a) Représentation schématique du montage expérimental en vue 3D ; b) en vue de coupe ; c) Photo correspondante du montage avec l'échantillon de peinture blanche

Comme expliqué à la section 1.3.2, les capteurs de flux mesurent la somme des flux à leur contact. Ainsi, le Capteur 1 entre le sol et l'isolant a mesuré le flux thermique de conduction venant de la surface et celui partant vers le sol (s'il y en a un), comme montré à la Figure 4.5. Le Capteur 2 placé en surface a mesuré la somme du flux infrarouge émis par la lampe, le flux de convection et le flux conduit vers l'échantillon (voir Figure 4.5). Du point de vue du capteur, si de l'énergie vient sur l'une de ses surfaces, le flux mesuré est positif. À l'inverse, si de l'énergie est arrachée de sa surface, le flux est négatif.

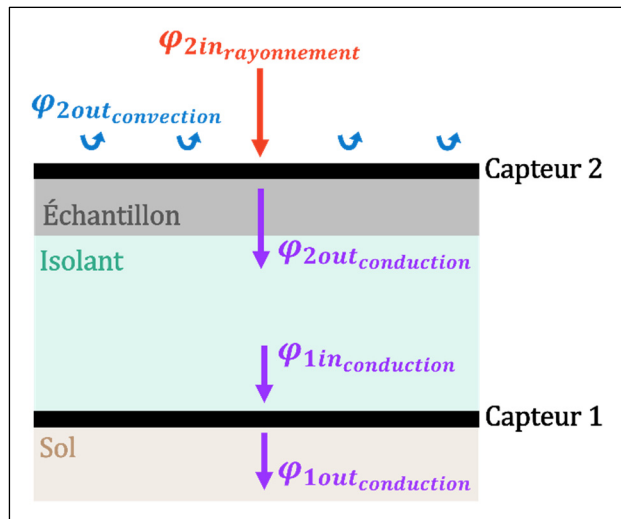


Figure 4.5 Bilan des flux subis par les deux capteurs en fonction de leur position dans le système

Deux configurations ont été étudiées pour ces essais : avec ou sans pâte thermique pour assurer le contact entre les capteurs et les matériaux qui leur font face. Ces essais ont été menés sur trois échantillons : (i) l'échantillon recouvert de peinture blanche (White) encastré dans l'isolant ; (ii) l'échantillon recouvert de peinture noire (Black) ; (iii) un carré d'isolant seul (sans trou) recouvert d'une feuille d'aluminium. Ainsi, avec les deux configurations et les trois échantillons, un total de six essais ont été menés. Le même déroulement que celui présenté au CHAPITRE 3 a été réalisé, avec une phase de chauffe suivie d'une phase de refroidissement.

Tableau 4.1 Liste des équipements et leur description

Équipement	Description
<i>Ampoule</i>	Spectres visible et infrarouge, 90 W, Capsylite® modèle halogène PAR38 de Sylvania®, diamètre 121 mm (4.75-inch), angle 30 °
<i>Capteur de flux</i>	Type thermopile, modèle PHFS-09e de Fluxteq®, bande opératoire $\pm 150 \text{ kW/m}^2$, thermocouple de surface type T, bande opératoire $[-50 ; 120]^\circ\text{C}$, aire 84 cm^2 . Sensibilité $16.36 \pm 0.29 \mu\text{V}/(\text{W/m}^2)$, précision 5 %.
<i>Système d'acquisition</i>	Modèle CR100 de Campbell Scientific®, 8 entrées analogues, précision $\pm(0.06\% \text{ de la lecture} + \text{offset})$, 0° à 40°C , utilisant le logiciel PC200W® pour enregistrer les évolutions du flux de chaleur et de la température.
<i>Thermocouples</i>	13 thermocouples de soudure ronde type T et 18 thermocouples plats de type T avec un adhésif à base de silicone (TC-SA IOThrifty™), précision $\pm 0.5^\circ\text{C}$
<i>Pâte thermique</i>	À base d'huile, 120 Series de Wakefield-Vette®, conductivité thermique $k = 0.735 \text{ W/mK}$ à 36°C , bande opératoire -40 à 200°C .
<i>Système d'acquisition</i>	16 entrées thermocouple, module NI 9213 de National Instruments™, précision $\pm 0.8^\circ\text{C}$ utilisant le logiciel LabView™ pour enregistrer l'évolution de la température.
<i>Isolant</i>	Polystyrène expansé avec une membrane aluminium d'épaisseur 76 mm, Isofoil® de Isofoam®.

4.2.2 Résultats expérimentaux d'évaluation du flux infrarouge

Pour chaque essai, la durée a été déterminée par l'obtention de régimes stationnaires pour les phases de chauffe et de refroidissement. Pour l'essai sur l'échantillon White dans la configuration avec pâte thermique, l'évolution des flux et températures mesurées à chaque capteur de flux est présentée à la Figure 4.6.

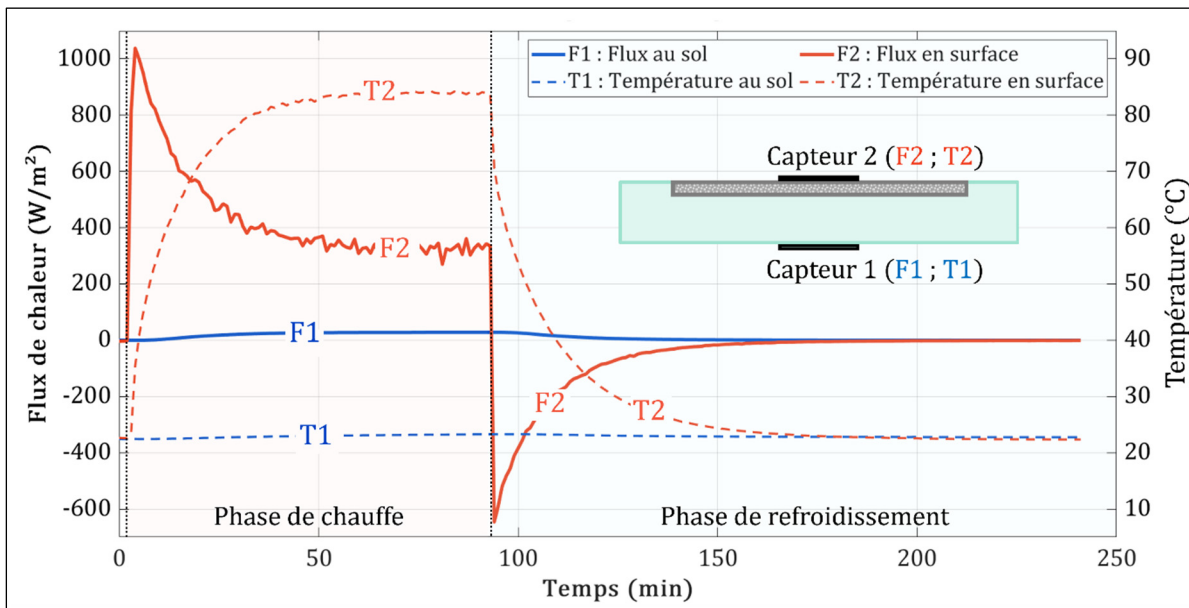


Figure 4.6 Superposition des évolutions des flux (traits pleins) et températures (traits pointillés) relevées en dessous (capteur 1) et en surface (capteur 2) du système au cours de l'essai sur l'échantillon blanc avec pâte thermique

À la Figure 4.6, les états stationnaires sont repérables à l'aide de la température T2 (trait rouge pointillé) du Capteur 2. La température maximale atteinte par le Capteur 2 est 84,3 °C et son étendue (différence entre les valeurs maximales et minimales atteintes) est de 61,9 °C. La température mesurée au niveau du sol T1 a une valeur moyenne de 22,9 °C et son étendue est de 0,9 °C, ce qui correspond à 1 % de l'étendue de la température en surface. Ainsi, pour cet essai, la température au sol est considérée constante au cours de l'essai.

À l'instant où la lampe a été allumée, le flux en surface a atteint une valeur proche de $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ puis s'est stabilisé à $350 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ environ (voir Figure 4.6). Cela est dû au

fonctionnement du capteur qui mesure la somme de tous les flux à sa surface. Le flux incident augmente progressivement la température de la surface, ce qui induit un flux de conduction vers l'échantillon, ainsi qu'un flux de convection vers l'extérieur. Plus le gradient de température est grand, plus les flux de conduction et de convection sont importants. À l'instant où la lampe a été éteinte, le flux mesuré en surface est devenu négatif (voir Figure 4.6). La chaleur absorbée par le système a été libérée vers l'air environnant : le flux a traversé le capteur dans le sens opposé. Cela explique la forme décroissante du flux mesuré en surface. Enfin, le flux mesuré en dessous du système n'a évolué que dans les valeurs positives au cours des deux phases (chauffe et refroidissement). Cela montre que le flux de conduction provenant du système prédomine sur le flux de conduction vers le sol, tout au long de l'expérience. Comme la température mesurée au sol a une variation négligeable ($\Delta T \approx 0 K$), le gradient de température entre le Capteur 1 et le sol est probablement nul, rendant le flux de conduction vers le sol négligeable ($\varphi_{conduction} = k \cdot \Delta T / \Delta y \approx 0 W/m^2$). En revanche, le gradient de température entre le Capteur 2 (surface) et le Capteur 1 (sol) est étendu (60 °C environ pour 76 mm), c'est pourquoi il y a bien un flux de conduction arrivant au Capteur 1.

4.2.3 Analyse des résultats expérimentaux et confrontation avec la théorie

L'analyse complète de ces essais est présentée à l'ANNEXE X. Il en ressort qu'à partir des essais de la configuration avec pâte thermique, le flux rayonné par la lampe mesuré par le Capteur 2 peut être extrait du bilan des flux suivant l'équation (4.4):

$$\varphi_{2inrayonnement} = F2 + F1 + h(T2 - T_{TC.4}) \quad (4.4)$$

Où $\varphi_{2inrayonnement}$ est le flux infrarouge reçu au hotspot, $F2$ est le flux total mesuré par le Capteur 2, $T2$ est sa température, $F1$ est le flux total mesuré par le Capteur 1 et $T_{TC.4}$ est la température ambiante mesurée par le thermocouple TC.4 (voir Figure 3.5).

La Figure 4.7 montre que le flux infrarouge estimé par le calcul (équation (4.4) appliquée aux essais avec pâte « AP ») n'est pas le même selon l'essai. Or, la lampe rayonne toujours de la même façon, peu importe ce qui est placé en dessous. La raison pour laquelle cette différence

de flux est observée en fonction du support sur lequel est posé le capteur de flux n°2 n'a pas été identifiée, par conséquent, elle n'a pas été prise en compte dans ce calcul. Néanmoins, celle-ci n'a pas été investiguée et, pour la prendre en compte, les trois résultats ont été utilisés pour produire un flux reçu moyen. La moyenne pondérée des trois flux est la courbe noire à la Figure 4.7 (plus de détails à l'ANNEXE X). Par ailleurs, pour simplifier l'intégration du flux à la simulation numérique, une valeur constante a été donnée au flux infrarouge ainsi caractérisé. Cette valeur est la moyenne sur toute la durée de la phase de chauffe, du flux moyen (courbe noire) estimé et vaut $608 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, comme montré à la Figure 4.7.

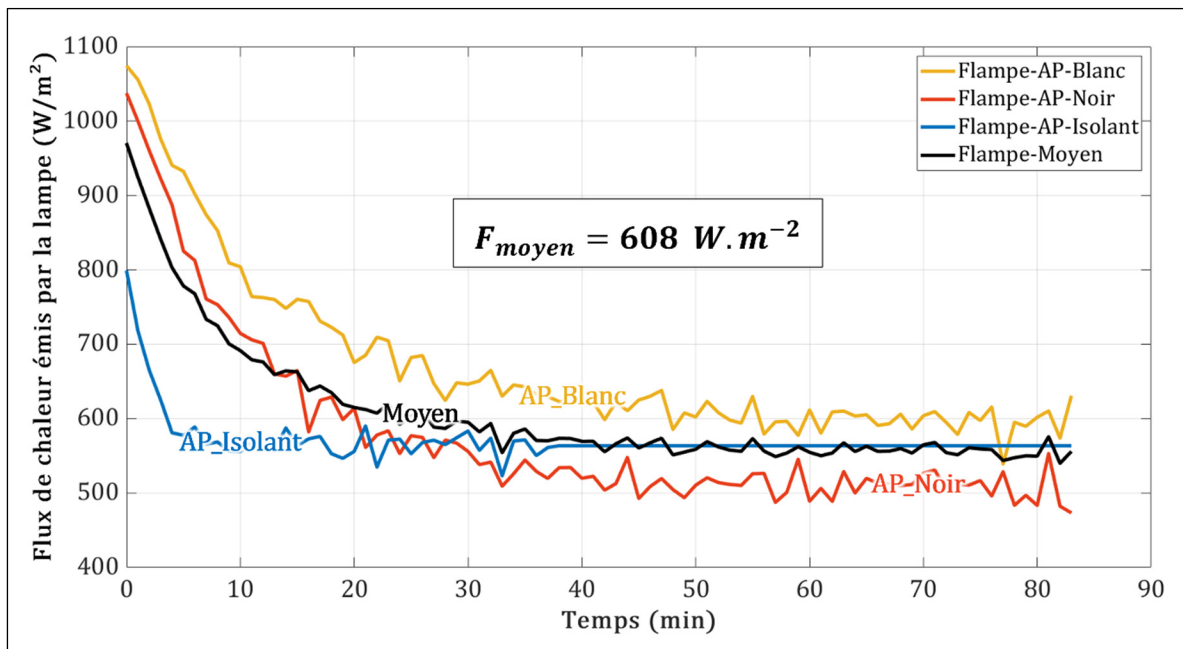


Figure 4.7 Calcul du flux moyen émis par la lampe sur la durée totale de la phase de chauffe

Comme expliqué précédemment, la méthode expérimentale de caractérisation du flux ne permet pas de mesurer la partie visible du flux émis par la lampe. Pourtant, c'est une composante non négligeable du flux émis puisque l'ampoule émet une lumière blanche intense. Pour évaluer la partie visible, il était donc nécessaire de recourir à une estimation à l'aide de la théorie des corps gris. Cette méthode théorique est par ailleurs aussi appliquée au flux infrarouge qui permet de confronter les valeurs obtenues par l'expérience utilisant les capteurs de flux avec la théorie. La démarche détaillée est présentée à l'ANNEXE IX. Ainsi, la méthode

théorique a permis d'estimer les quatre flux : visible et infrarouge, au hotspot et à la couronne (voir Figure 4.3). Les valeurs obtenues sont regroupées au Tableau 4.2, où les indices VIS et IR réfèrent aux spectres visible et infrarouge respectivement.

Tableau 4.2 Valeurs de flux incident obtenues et retenues pour la simulation

Flux	Valeur obtenue théoriquement ($W.m^{-2}$)	Valeur obtenue expérimentalement ($W.m^{-2}$)	Valeur retenue pour la simulation ($W.m^{-2}$)
$\varphi_{VIS_{hotspot}}$	1823	-	1823
$\varphi_{IR_{hotspot}}$	626	608	608
$\varphi_{VIS_{couronne}}$	164	-	164
$\varphi_{IR_{couronne}}$	56	-	54*

* *Obtenu à partir de la méthode expérimentale et les calculs présentés à l'ANNEXE X.*

La valeur du flux infrarouge obtenue au hotspot par la théorie ($\varphi_{IR_{hotspot}}$) est du même ordre de grandeur que la valeur caractérisée à l'aide des essais expérimentaux ($608 W.m^{-2}$). Ceci porte à croire que les deux méthodes d'estimation des flux sont proches de la réalité.

Pour la simulation, il a été choisi d'utiliser les données expérimentales pour les valeurs des flux infrarouges et les données théoriques pour celles des flux visibles. Or, les données expérimentales n'ont pas permis de caractériser le flux infrarouge reçu à la couronne, mais seulement celui reçu au hotspot. Alors, il était nécessaire de caractériser le flux infrarouge reçu à la couronne à partir des données expérimentales obtenues pour le hotspot. La démarche suivie s'appuie sur des calculs géométriques et est présentée à l'ANNEXE X. La valeur obtenue est de $54 W.m^{-2}$, ce qui est proche de la valeur estimée par la théorie ($\varphi_{IR_{couronne}}$).

4.3 Évaluation des paramètres liés aux propriétés radiatives et isolantes des échantillons en vue des simulations

Comme expliqué précédemment, pour réaliser les simulations numériques, il était nécessaire de caractériser les propriétés radiatives et isolantes des échantillons.

Dans le cadre de ce projet, la masse volumique de deux échantillons de composite et des poudres sélectionnées pour fabriquer les peintures a été déterminée à l'aide d'un pycnomètre à gaz montré à la Figure 4.8 (Ultrapyc 5000, Anton Paar). La méthodologie d'utilisation et d'analyse du pycnomètre à gaz correspond à la norme ASTM D5965 (2019) (Méthode B). Les détails d'analyse des résultats et de calculs de la masse volumique des peintures (mélanges de poudre et de peinture transparente) sont présentés à l'ANNEXE II.



Figure 4.8 Photo du pycnomètre à gaz

La conductivité thermique et l'effusivité thermique des deux faces de chaque échantillon (peinture et composite) ont été déterminées à l'aide d'un capteur Modified Transient Plane Surface (MTPS, Trident Thermal Conductivity Instrument, C-therm), comme montré à la Figure 4.9. Les détails du fonctionnement et de l'utilisation du MPTS pour ce projet sont donnés à l'ANNEXE VI.



Figure 4.9 Photo du MTPS avec trois gouttes d'eau

La chaleur spécifique de chaque face des échantillons a été calculée à l'aide de la masse volumique, la conductivité thermique et l'effusivité thermique suivant l'équation (4.5) :

$$Cp = \frac{E^2}{k \cdot \rho} \quad (4.5)$$

Enfin, la réflectance solaire des peintures a été évaluée à l'aide d'un spectrophotomètre à sphère d'intégration de 60 mm (Lambda 750, Perkin Elmer, voir Figure 4.10) et suivant les normes ASTM E903-20 (2020) et ASTM G173 (2023). L'analyse des résultats de spectrophotométrie des échantillons est présentée à l'ANNEXE VII.

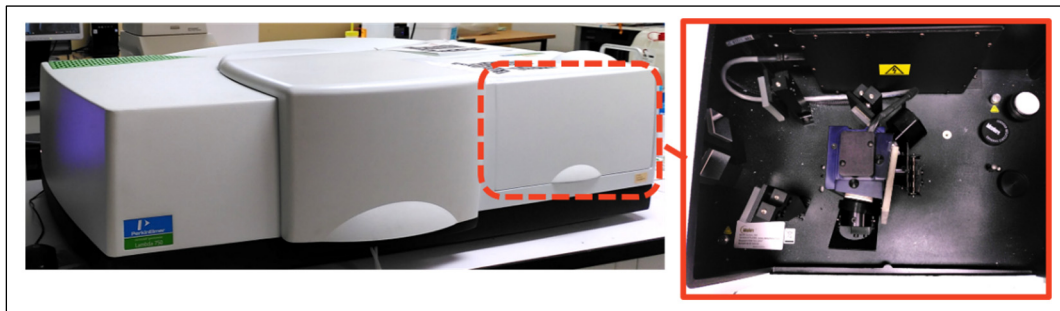


Figure 4.10 Photo de l'extérieur du spectrophotomètre et du compartiment contenant la sphère d'intégration à laquelle est apposé un échantillon

Tous les résultats de caractérisation de ces propriétés sont présentés dans le Tableau 4.3. Dans ce tableau, la moyenne et l'écart type sont donnés pour la conductivité thermique, l'effusivité thermique et la chaleur spécifique. La réflectance solaire n'a pas été caractérisée pour la couche de composite des échantillons puisque celle-ci n'est pas directement exposée au rayonnement incident de la lampe.

Tableau 4.3 Sommaire des paramètres caractérisés pour chaque couche des échantillons étudiés, à l'aide des méthodes conventionnelles

Échantillon	Partie de l'échantillon	Valeurs mesurées					Valeurs calculées		
		Masse volumique ρ $kg.m^{-3}$	Conductivité thermique k $W.m^{-1}K^{-1}$		Effusivité thermique E $W.s^{\frac{1}{2}}/(K.m^2)$		Chaleur spécifique Cp $J/(kgK)$		Réflectance solaire r_s % ⁽³⁾
			Moy	ET	Moy	E T	Moy	E T	
<i>Black</i>	Peinture	1040 *	0.174 5	0.018 5	490	21	133 0	30	15.7
	Composite	931.9 **	0.259 9	0.080 7	586	88	146 7	32	-
<i>White</i>	Peinture	1040 *	0.257 7	0.006 1	585	7	127 5	1	85.2
	Composite	931.9	0.259 6	0.071 5	586	79	144 2	19	-
<i>Clear</i>	Peinture	1040 *	0.286 5	0.051 8	616	57	128 3	10	26.1
	Composite	931.9	0.262 9	0.067 3	589	75	144 8	50	-
<i>pBaSO₄</i>	Peinture	1931 ***	0.448 9	0.052 9	790	55	722	15	64.2
	Composite	931.9	0.284 2	0.053 1	613	58	143 2	12	-
<i>pTiO₂</i>	Peinture	1189 ***	0.330 1	0.064 2	663	69	113 0	20	91.6
	Composite	931.9	0.197 1	0.080 4	515	89	150 2	77	-
<i>pEG1</i>	Peinture	1172 ***	0.368 6	0.041 4	706	44	115 5	15	59.6
	Composite	931.9	0.244 5	0.060 3	569	68	145 5	66	-
<i>pEG2</i>	Peinture	1023 ***	0.931 1	0.069 1	125 1	60	164 5	37	55.4

	Composite	931.9	0.206 2	0.048 4	526	55	146 7	53	-
<i>pGP</i>	Peinture	1681 ***	0.540 7	0.079 0	883	79	861	29	34.1
	Composite	931.9	0.380 2	0.086 7	717	93	146 6	38	-
<i>pGypsum</i>	Peinture	1417 ***	0.496 2	0.042 6	839	43	100 2	18	20.4
	Composite	931.9	0.230 4	0.079 1	553	89	148 0	91	-

⁽¹⁾ La masse volumique des poudres et du composite a été obtenue selon la norme ASTM D5965-19.

⁽²⁾ Valeurs obtenues en utilisant le MTPS qui répond à la norme ASTM 7984-21.

⁽³⁾ Valeurs obtenues en suivant les normes ASTM E903-20 et ASTM G173-23.

- La réflectance solaire du composite n'a pas d'intérêt : il n'est pas exposé au rayonnement.

* Données de la fiche technique correspondante.

** Moyenne des six résultats obtenus pour deux échantillons de composite.

*** Valeur calculée sur la base des masses volumiques de la peinture et de la poudre⁽¹⁾, en fonction des concentrations utilisées.

4.4 Obtention des résultats de simulation pour un échantillon et comparaison avec les données expérimentales

Toutes les données nécessaires à la simulation numérique des essais expérimentaux réalisés au CHAPITRE 3 ont été rassemblées. Cette section permet de réaliser l'objectif principal de ce chapitre : obtenir les simulations numériques en sollicitant les cinq propriétés radiatives et isolantes $r_s, \varepsilon, \rho, Cp, k$, propres à chaque matériau, et les comparer aux comportements thermiques globaux observés à l'aide de la méthode expérimentale proposée au CHAPITRE 3.

4.4.1 Données d'entrée nécessaires à la simulation

Toute la méthodologie de simulation détaillée à la section 4.1.3 a été répliquée dans la simulation. Pour cela, les valeurs moyennes de chaque propriété ont été renseignées dans le code de simulation (voir Tableau 4.3). De même, les flux de rayonnement imposés à la surface de l'échantillon au cours de la phase de chauffe ont été repris de la méthode expérimentale pour la partie infrarouge ($608 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ et $54 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) et de la méthode théorique pour la partie visible ($1823 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ et $164 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, voir section 4.2.3).

Alors, durant la phase de chauffe, les flux absorbés par la surface pour les positions comprises dans le hotspot dépendent de la capacité à réfléchir le rayonnement visible (r_s) et sa capacité à émettre dans l'infrarouge (ε), comme montré à la Figure 4.3. Ces flux absorbés s'exprimaient selon les équations (4.6) et (4.7) respectivement.

$$\varphi_{VISabs_{Hot}} = (1 - r_s) \times 1823 \text{ W.m}^{-2} \quad (4.6)$$

$$\varphi_{IRabs_{Hot}} = \varepsilon \times 608 \text{ W.m}^{-2} \quad (4.7)$$

De même, les flux absorbés par l'échantillon pour les positions correspondant à la couronne ont été exprimés à l'aide des équations (4.8) et (4.9).

$$\varphi_{VISabs_{Cour}} = (1 - r_s) \times 164 \text{ W.m}^{-2} \quad (4.8)$$

$$\varphi_{IRabs_{Cour}} = \varepsilon \times 54 \text{ W.m}^{-2} \quad (4.9)$$

Partout sur les surfaces en contact avec l'air, le flux de convection a été exprimé selon l'équation (4.2). Le flux émis par la surface a été exprimé suivant l'équation (4.3). La température initiale entrée dans la simulation correspondait à celle mesurée lors de l'essai reproduit (elle dépend donc de l'essai en question). La température du système au contact du sol a été fixée à la température initiale pour toute la durée de l'essai. Enfin, pour que les essais simulés puissent être comparés aux essais expérimentaux déroulés au CHAPITRE 3, il était nécessaire de commencer la phase de chauffe, la phase de refroidissement et terminer la simulation aux mêmes instants que lors des essais réels. Le modèle numérique a donc permis de reproduire les 13 essais menés sur les neuf échantillons. Le code utilisé pour les simulations est disponible à l'ANNEXE XI.

4.4.2 Confrontation des données expérimentales et numériques pour un essai

Au cours de la simulation, l'évolution de la température a été enregistrée aux mêmes points (SP.c, TC.a,b et c) que lors des expériences. Pour l'essai sur l'échantillon White, les données expérimentales et numériques sont présentées à la Figure 4.11.

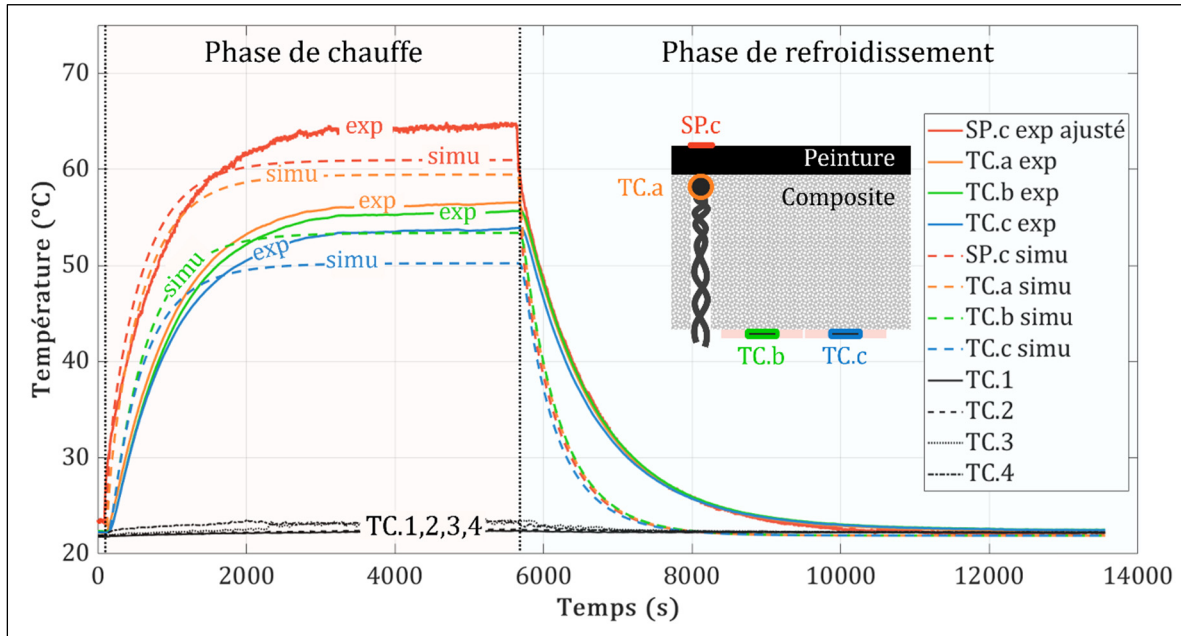


Figure 4.11 Superposition des courbes d'évolution de la température à chaque point de mesure pour les données expérimentales et de simulation numérique, pour le second essai réalisé sur l'échantillon blanc. Simu = résultat de la simulation, exp = résultat expérimental

Les courbes de simulation et des résultats expérimentaux ont une forme similaire, mais elles ne se superposent pas. Au cours de la simulation, les états stationnaires sont atteints plus rapidement que lors des expériences. Cela est dû à une surestimation du coefficient de convection dont la valeur a été calculée pour une température de surface bien supérieure à celle atteinte par la surface de l'échantillon blanc au cours de l'expérience présentée. De plus, le coefficient de convection augmente avec la température de surface (voir ANNEXE VIII), qui évolue au cours de l'expérience, donc le coefficient de convection réel est plus faible au début de l'expérience qu'à la fin de la phase de chauffe, puis diminue jusqu'à la fin de l'expérience. Cette surestimation du coefficient de convection explique donc l'atteinte précoce des états stationnaires mais aussi l'écart de température entre les données expérimentales et simulées

qui sont sous-estimées par la simulation. En effet, la simulation a prévu un excès d'arrachement de chaleur en surface par convection à tous les points, excepté le point TC.a. Selon la simulation, TC.a doit avoir une température bien plus proche de celle de SP.c. Ceci confirme l'hypothèse que les mesures expérimentales au point TC.a sont influencées par la discontinuité de matière créée par l'insertion de TC.a sous la peinture (voir section 3.5.3).

Pour mieux observer la similitude entre l'expérience et la simulation, le coefficient de détermination (soit le coefficient de corrélation carré) R^2 a été estimé pour les données obtenues (simulation et expérience) à un même point, et rapporté au Tableau 4.4. Le coefficient R^2 est un chiffre compris entre 0 et 1 qui détermine si les données comparées évoluent de manière similaire ou non. Plus R^2 est proche de 1, plus la corrélation est forte, donc plus les données évoluent de manière fortement similaire. Toutefois, même si la corrélation est forte, cela ne veut pas dire que les deux jeux de données comparés atteignent les mêmes valeurs. Ici, l'évolution des températures atteintes par l'expérience et la par simulation semblent similaires mais les températures atteintes ne sont pas égales. C'est pourquoi il est nécessaire de comparer le coefficient de corrélation avec la différence de températures maximales atteintes par les données expérimentales et simulées. Elles sont aussi regroupées au Tableau 4.4. Pour obtenir un coefficient de corrélation entre deux jeux de données qui évoluent dans le temps, ceux-ci doivent présenter le même nombre de mesures et ces mesures doivent correspondre au même instant. Or, ces conditions n'étaient pas remplies par l'acquisition des températures à l'aide de thermocouples (pas de temps de 30 secondes) et de la caméra thermique (pas de temps de 0,13 s). Il était donc nécessaire de réduire le nombre d'acquisitions obtenues à l'aide de la caméra thermique. Pour cela, une moyenne mobile a été réalisée pour déterminer la température moyenne toutes les 30 secondes au point SP.c.

Tableau 4.4 Coefficient de détermination et différence de température entre l'expérience et la simulation pour le second essai sur l'échantillon blanc, à tous les points de mesure

Point de mesure	Coefficient de corrélation au carré R^2 (n. d.)	Différence des températures maximales : $\Delta T_{max} = T_{exp_{max}} - T_{simu_{max}}$ (°C)
Centre de la surface (SP.c)	0,9672	3,7

<i>Sous la peinture (TC.a)</i>	0,9401	-2,9
<i>Sur la face cachée (TC.b)</i>	0,9552	2,3
<i>Sur la face cachée (TC.b)</i>	0,9507	3,7

Les données regroupées au Tableau 4.4 permettent de retrouver une partie des conclusions déjà apportées. D'abord, les coefficients de corrélations sont proches de 0,95 ce qui montre que les données évoluent de manière similaire, mais la forme des courbes n'est pas exactement la même. Là où la similitude est la plus marquée est au point SP.c. À l'inverse, la corrélation la plus faible se trouve au point TC.a. D'après les différences de température, la simulation présente des valeurs plus faibles que l'expérience sauf pour le point TC.a où la tendance semble inversée. Si ces observations sont répétées par les autres essais, alors des conclusions pourront être tirées de la différence entre l'expérience et la simulation, notamment au point TC.a pour lequel des doutes persistent.

4.5 Analyse comparative des résultats de simulation avec les résultats expérimentaux

Le même processus d'analyse est réalisé pour les autres essais, et tous les résultats sont regroupés au Tableau 4.5. Dans ce tableau, l'ordre des essais (nom de l'échantillon et numéro de l'essai) est choisi pour correspondre au Tableau 3.5. Ainsi, plus l'essai est placé vers la fin du tableau, plus la température mesurée à sa surface lors des expériences était élevée.

Tableau 4.5 Coefficient de détermination et différence de température entre l'expérience et la simulation pour chaque essai et tous les points de mesure

Échantillon et n° essai*	Coefficient de corrélation au carré R^2 (s. d.)				$\Delta T_{max} = T_{exp_{max}} - T_{simu_{max}}$ (°C)			
	SP.c	TC.a	TC.b	TC.c	SP.c	TC.a	TC.b	TC.c
<i>pTiO₂</i>	0,9911	0,9760	0,9906	0,9846	7,4	-0,5	5,7	7,2
<i>White 2*</i>	0,9672	0,9401	0,9552	0,9507	3,7	-2,9	2,3	3,7
<i>White 1*</i>	0,9773	0,9451	0,9611	0,9597	4,9	-3,6	1,5	2,1
<i>pEG1</i>	0,9814	0,9630	0,9738	0,9726	-5,6	-13,6	-5,0	-3,6
<i>pBaSO₄</i>	0,9813	0,9528	0,9689	0,9634	1,6	-6,4	0,1	0,6
<i>pEG2</i>	0,9891	0,9728	0,9870	0,9867	-1,7	-10,9	-0,4	0,5
<i>pGP</i>	0,9862	0,9726	0,9802	0,9774	-2,7	-13,9	-7,6	-5,1
<i>Black 1*</i>	0,9903	0,9747	0,9886	0,9851	-10,2	-21,6	-10,4	-12,1
<i>pGypsum 1*</i>	0,9891	0,9812	0,9917	0,9888	-3,9	-14,0	-1,3	-0,1
<i>pGypsum 2*</i>	0,9925	0,9853	0,9937	0,9920	-1,5	-12,9	-0,1	0,8
<i>Black 2*</i>	0,9888	0,9747	0,9880	0,9851	-4,7	-15,4	-3,8	-2,1
<i>Clear 1*</i>	0,9886	0,9687	0,9802	0,9763	8,6	-3,7	6,1	6,5
<i>Clear 2*</i>	0,9877	0,9720	0,9824	0,9770	8,9	-2,2	7,4	6,9

* 1 correspond au premier essai et 2 au deuxième essai réalisé sur le même échantillon. Lorsqu'aucun numéro n'est mentionné, un seul essai a été effectué.

Analyse des coefficients de détermination

Après analyse du Tableau 4.5, il sort que le coefficient de détermination (R^2) moyen sur tous les essais et à tous les points vaut 0,98, ce qui correspond à une corrélation forte. Cette forte corrélation montre que les comportements thermiques observés expérimentalement et simulés évoluent globalement de manière similaire. Si, à l'inverse, le coefficient de détermination moyen avait été faible, il aurait montré que les transferts thermiques simulés étaient incorrects par rapport à la réalité expérimentale. Ce n'est pas le cas : le coefficient de détermination moyen est fort donc les transferts thermiques simulés ne contredisent pas le comportement thermique observé expérimentalement pour chaque essai. Or, les transferts thermiques simulés sollicitent les cinq propriétés d'intérêt ($r_s, \varepsilon, \rho, Cp, k$) pour développer des

matériaux frais et isolants, par conséquent, la forte corrélation entre les expériences et leur simulation montre que la méthode proposée a rempli son rôle de reproduction des transferts thermiques subis par une paroi extérieure de bâtiment.

Une analyse plus fine montre que le coefficient de détermination moyen vaut en moyenne 0,98 pour les données correspondant aux points SP.c, TC.b et TC.c, mais il vaut 0,97 en moyenne pour les données correspondant au point TC.a. Cette légère différence montre que les mesures expérimentales prises au point TC.a sont moins en accord avec la simulation comparativement à celles prises aux autres points. Il est donc suggéré que la température relevée expérimentalement au point TC.a est soumise à d'autres transferts thermiques que ceux simulés, n'étant pas directement au contact de l'objet « interface » entre la peinture et le composite.

Analyse des différences de température maximales relevées

Selon l'essai, la simulation peut sous-estimer ou bien surestimer les températures en chaque point par rapport à l'expérience, ce qui est observé par le signe de la différence de températures maximales atteintes entre l'expérience et la simulation (voir Tableau 4.5). En revanche, les différences de températures mesurées au point TC.a sont toujours négatives et présentent la plus grande amplitude comparée aux différences mesurées aux autres points. L'hypothèse selon laquelle les mesures expérimentales au point TC.a sont influencées par la discontinuité de matière est par conséquent définitivement confirmée. D'après la simulation, la température en ce point a toujours été sous-estimée lors des expériences. Les mesures expérimentales prises par le thermocouple TC.a ne permettent pas d'évaluer la performance isolante des couches de peinture de composite.

D'après l'ordre de présentation des essais pour ce tableau, la simulation a tendance à sous-estimer la température des essais qui ont présenté une température de surface basse lors des expériences (la différence de température au point SP.c est positive). À l'inverse, la simulation a tendance à surestimer la température des essais qui ont présenté une température de surface élevée lors des expériences (la différence est négative au point SP.c), à l'exception de

l'échantillon de peinture transparente. Si cela arrive seulement pour cet échantillon « Clear », c'est probablement que les propriétés entrées pour la simulation du comportement thermique de celui-ci ne sont pas optimales. Dans l'ensemble, la simulation sous-estime les températures pour les échantillons dont la réflectance solaire est significativement élevée (pTiO₂-92% et White-85%) et à l'inverse, elle surestime la température des échantillons dont la réflectance solaire significativement faible (pGypsum-20%et Black-16%). La différence entre la simulation et l'expérience n'étant pas systématique (c'est-à-dire, des températures toujours surestimées ou inversement), il ne s'agit pas d'une erreur d'estimation des propriétés des matériaux, puisque celle-ci aurait été systématique. Par conséquent, la différence provient de l'estimation des flux imposés aux limites qui ne traduisent pas les bonnes quantités d'énergie réfléchies, absorbées, émises et arrachées par convection. Par exemple : (i) la simulation de l'essai sur l'échantillon blanc montre des températures plus basses que l'expérience, alors la quantité d'énergie absorbée a été sous-estimée par la simulation pour cet échantillon (ii) la simulation sur l'échantillon noir montre, à l'inverse, des températures plus élevées que l'expérience, alors la quantité d'énergie absorbée a été surestimée pour l'échantillon noir. Or, les quantités d'énergie absorbées par les échantillons dépendent des flux incidents visibles et infrarouges, ainsi que de la réflectance solaire et de l'émissivité (voir équations (4.6) à (4.9)). L'erreur n'étant pas systématique, il semble donc que les valeurs de flux incidents entrées dans la simulation sont déséquilibrées : les flux visibles sont probablement surestimés, tandis que les flux infrarouges sont probablement sous-estimés.

Enfin, la mesure du flux infrarouge incident à l'aide des capteurs de flux a montré la dépendance au temps de ce flux. Il a pourtant été choisi d'entrer une valeur constante de ce flux dans la simulation. Il en est de même pour le coefficient de convection qui est calculé à partir de la température de la surface (voir section A-VIII.1) qui elle-même dépend du temps. Ainsi, ce coefficient évolue avec la température de surface, ce qui n'a volontairement pas été traduit dans la simulation. Ajouter dans la simulation la dépendance au temps des flux incidents et de convection changerait les quantités d'énergies thermiques réfléchies, absorbées, diffusées et émises. La forme des courbes et les valeurs de température atteintes seraient impactées.

Conclusion générale des analyses

Enfin, les résultats de corrélation montrent que la simulation et les expériences sont cohérentes. Même si les quantités d'énergie observées diffèrent entre la simulation et l'expérience, la similitude d'évolution des températures obtenues par la simulation et l'expérience suggère que tous les transferts thermiques recherchés pour évaluer les performances radiatives et isolantes des matériaux ont bien été sollicités au cours des expériences. Ainsi, cela confirme que la méthode expérimentale proposée permet d'observer le comportement thermique global des matériaux soumis à des conditions d'irradiation diurne, comme ceux utilisés pour les façades de bâtiment. La méthode proposée peut donc être utilisée pour distinguer les matériaux selon leur potentiel de participation au phénomène d'îlot de chaleur urbain : plus leur température de surface maximale atteinte est élevée au cours des expériences, plus ils participeront au phénomène d'ICU s'ils sont utilisés comme parement extérieur de bâtiment.

CONCLUSION

L'objectif principal de ce projet de recherche était de développer une méthode d'évaluation des performances radiatives et isolantes d'un matériau destiné aux parements extérieurs de bâtiment, à l'aide d'équipements abordables et accessibles. Cet objectif a été adressé dans l'optique élargie de favoriser le développement, par les industries, de parements extérieurs qui puissent être utilisés pour diminuer le potentiel des îlots de chaleur urbains et ainsi participer aux adaptations des zones urbaines aux changements climatiques.

Alors, dans le cadre de ce projet, un montage expérimental a été développé pour évaluer les propriétés radiatives et isolantes de matériaux destinés aux enveloppes extérieures de bâtiments, de manière adaptable à l'échantillon étudié. Le montage proposé se fait sous conditions contrôlées (en laboratoire) et nécessite l'utilisation d'une lampe pour représenter le rayonnement solaire. L'évolution des transferts thermiques subis par le matériau est observée à l'aide d'une caméra thermique et de thermocouples qui mesurent l'évolution des températures en différents points (à la surface, sous la peinture et en dessous de l'échantillon).

Le cas d'étude a permis de mettre à l'épreuve le montage proposé. Il consistait en un composite à base de polyuréthane et de fibre de verre destiné à une utilisation comme parement extérieur de bâtiment (murs verticaux, toits et terrasses). Il a été recouvert par diverses peintures dont les performances radiatives ont été analysées à l'aide de la méthode développée.

L'analyse par comparaison des résultats obtenus pour chaque échantillon testé montre que la méthode développée permet de distinguer qualitativement les matériaux selon leur potentiel de participation au phénomène d'ICU. Notamment, l'influence de la couleur et de la rugosité de surface extérieure sur sa température a pu être observée. En effet, les surfaces lisses et de couleur proche du blanc ont présenté une température plus faible que les surfaces plus rugueuses et plus foncées. Concrètement, l'échantillon recouvert de peinture blanche (nommé White) a présenté le meilleur potentiel de réduction des ICU comparé aux autres échantillons. Les échantillons dont la peinture était à base de verre recyclé de deux granulométries

différentes, mais de couleur équivalente (pEG1 et pEG2) ont montré que plus la rugosité de surface est importante, plus la température de surface est élevée. Enfin, l'échantillon de peinture transparente a atteint des températures plus élevées que celles intuitivement attendues, justifiant l'importance de réaliser des analyses de performances radiatives avant l'installation de peintures sur les façades de bâtiment.

Toutefois, à la suite à l'analyse des résultats expérimentaux, peu de conclusions ont pu être apportées quant à la performance isolante des différents échantillons. Pour cela, il aurait été nécessaire d'analyser l'évolution de la température en surface, aux points situés au-dessus des thermocouples qui ont mesuré la température sur la face cachée des échantillons.

Enfin, les essais expérimentaux ont été reproduits à l'aide de simulations numériques. Cela a nécessité la caractérisation de toutes les données d'entrée (les flux imposés, induits et les propriétés radiatives et isolantes des matériaux). Les résultats ainsi obtenus ont pu être comparés aux résultats issus des essais expérimentaux. La reproduction des essais en simulation numérique a montré une forte corrélation avec les expériences, ce qui permet de conclure que les propriétés d'intérêt ont été sollicitées lors des essais expérimentaux, ce qui était recherché. Les écarts de températures atteintes entre les expériences et les simulations semblent provenir de l'évaluation des flux imposés et induits (flux émis par la lampe et flux de convection). En particulier, cela est dû à la volonté d'utiliser des valeurs de flux constantes et moyennes, alors que les mesures des capteurs de flux ont montré une dépendance au temps et aux matériaux en contact avec les capteurs. L'analyse des écarts de température a aussi montré que les mesures prises sous la peinture (point TC.a) ne sont pas fiables. Aucune amélioration pour palier à ce problème n'a été trouvée et il semble que l'évaluation de la performance isolante du composite seul n'ait pas plus d'intérêt que d'évaluer la performance isolante de l'échantillon entier (peinture et composite). Il est donc envisageable de ne pas mesurer la température sous la peinture, évitant la création de discontinuité de matière et n'empêchant pas l'évaluation de la performance isolante totale de l'échantillon étudié.

RECOMMANDATIONS

Pour clôturer cette recherche, quelques recommandations sont énoncées et pourraient déboucher sur de nouvelles recherches.

D'abord, les trois limites identifiées à la conclusion pourraient être traitées.

- 1) Pour approfondir les analyses de performances isolantes au cours des essais expérimentaux, il est possible d'extraire l'évolution de la température à d'autres points de la surface à partir des enregistrements thermographiques. Comme expliqué précédemment, il serait judicieux d'extraire la température aux deux points situés au-dessus des thermocouples TC.b et TC.c. Cela pourrait permettre d'apporter de nouvelles conclusions sur la capacité de l'échantillon à transmettre la chaleur de sa face extérieure à sa face cachée. Tous les essais et analyses déjà effectués pourraient alors être repris et complétés.
- 2) Pour de futures expériences, il est recommandé de ne pas insérer un thermocouple à l'interface entre les différentes couches des matériaux étudiés pour ne pas gêner les analyses. De manière générale, l'évaluation de la performance isolante totale d'un échantillon pourrait être réalisée à l'aide de la méthode proposée en mesurant l'évolution du gradient de température entre les faces exposée et cachée et suffirait amplement puisque les différentes couches composant un matériau ne sont pas destinées à être séparées.
- 3) Les simulations numériques pourraient être approfondies en ajoutant la dépendance au temps des flux incidents (visible et infrarouge), ainsi que celle du flux de convection. En ce qui concerne le flux incident, cela pourrait nécessiter de nouveaux essais de caractérisation du flux incident. Il serait d'ailleurs possible de caractériser le flux visible à l'aide de capteurs photodiodes. Le flux de convection est indirectement dépendant du temps : le coefficient de convection est calculé à partir de la différence de température entre la surface et l'air. Or, la température de surface elle-même dépend du temps. Il est possible de renseigner les équations qui permettent le calcul du coefficient de convection dans le logiciel. Cela pourrait être réalisé et devrait avoir comme conséquence une augmentation du coefficient de corrélation entre les résultats d'expérience et de simulation.

Finally, realizing these recommendations could be the key to bringing the method to a higher level. In fact, knowing with precision the incident and induced fluxes could allow, through mathematical regression, to calculate the five properties of interest from the evolution of the temperature measured on the exposed and hidden faces of the sample. In the context of this research, the method has allowed a qualitative evaluation of the materials studied. Successfully completing the mathematical regression step mentioned here would allow the method to provide a quantitative evaluation of the materials studied and thus to position them relative to other materials whose characteristics are known.

ANNEXE I

OBTENTION DE LA POUDRE DE GYPSE

La poudre de gypse a été obtenue par broyage d'un panneau de gypse provenant des fins de coupes pour les travaux de l'ÉTS⁵. Il s'agit d'une cloison sèche de type X (résistante au feu) de la marque Certaineed[®]. L'obtention d'une poudre à partir du panneau a nécessité la réalisation des cinq étapes suivantes :

- 1) Enlever les couches de papier qui recouvrent le gypse ;
- 2) Casser le panneau en morceaux d'environ 100 mm de diamètre (voir Figure-A I-1) ;
- 3) Broyer une première fois les morceaux de 100 mm à l'aide d'un concasseur à mâchoires modèle « *Pulvérisette 1* » de la marque Fritsch[®] (voir Figure-A I-2) pour obtenir des morceaux de diamètre 20 mm au maximum ;
- 4) Broyer de nouveau à l'aide d'un broyeur à disque et anneau oscillant, modèle « *Pulvérisette 9* » de la marque Fritsch[®] (voir Figure-A I-3) pour obtenir une poudre ;
- 5) Tamiser la poudre obtenue sur un tamis de 150 µm (voir Figure-A I-4) pour enlever les éventuelles impuretés et défaire les grumeaux (voir Figure-A I-5).

⁵ École de Technologie Supérieure, Montréal, Québec, Canada



Figure-A I-1 Morceaux de panneaux de gypse de diamètre inférieur à 100 mm et dépourvus d'enveloppe papier



Figure-A I-2 Photo du concasseur à mâchoire utilisé pour le premier broyage

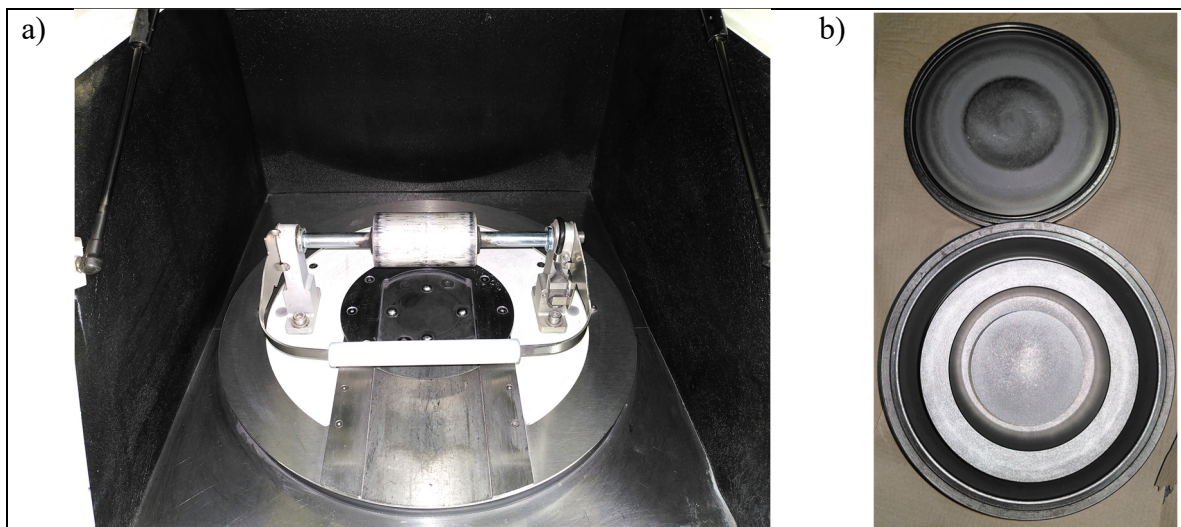


Figure-A I-3 a) Broyeur à disque et b) anneau oscillant utilisé pour le deuxième broyage



Figure-A I-4 Tamis 150 µm utilisé pour tamiser la poudre



Figure-A I-5 Poudre de gypse obtenue
après réalisation des cinq étapes

ANNEXE II

CALCUL DES MASSES VOLUMIQUES À PARTIR DES MESURES RÉALISÉES AVEC UN PYCNOMÈTRE À GAZ

A-II.1 Rapide présentation du fonctionnement d'un pycnomètre à gaz

Le principe de la mesure s'appuie sur la théorie des gaz parfaits, régie par l'équation (A II-1), et le gaz utilisé ici est l'hélium. Un petit volume d'échantillon est placé dans une chambre de volume connu. À température choisie et constante, l'hélium est introduit dans la chambre en plus de l'échantillon. Une fois la pression du gaz stabilisée, une vanne dite d'expansion laisse le gaz s'étendre dans une autre chambre, aussi de volume connu. Après mesure de la pression du gaz expansé, le volume de l'échantillon peut être calculé, comme décrit dans la Figure-A II-1.

$$PV = nRT \quad (\text{A II-1})$$

Où P est la pression du gaz en Pa , V est son volume en m^3 , n est sa quantité de matière en mol , R est la constante des gaz parfaits en $Pa.m^3/mol.K$ et T en K est la température.

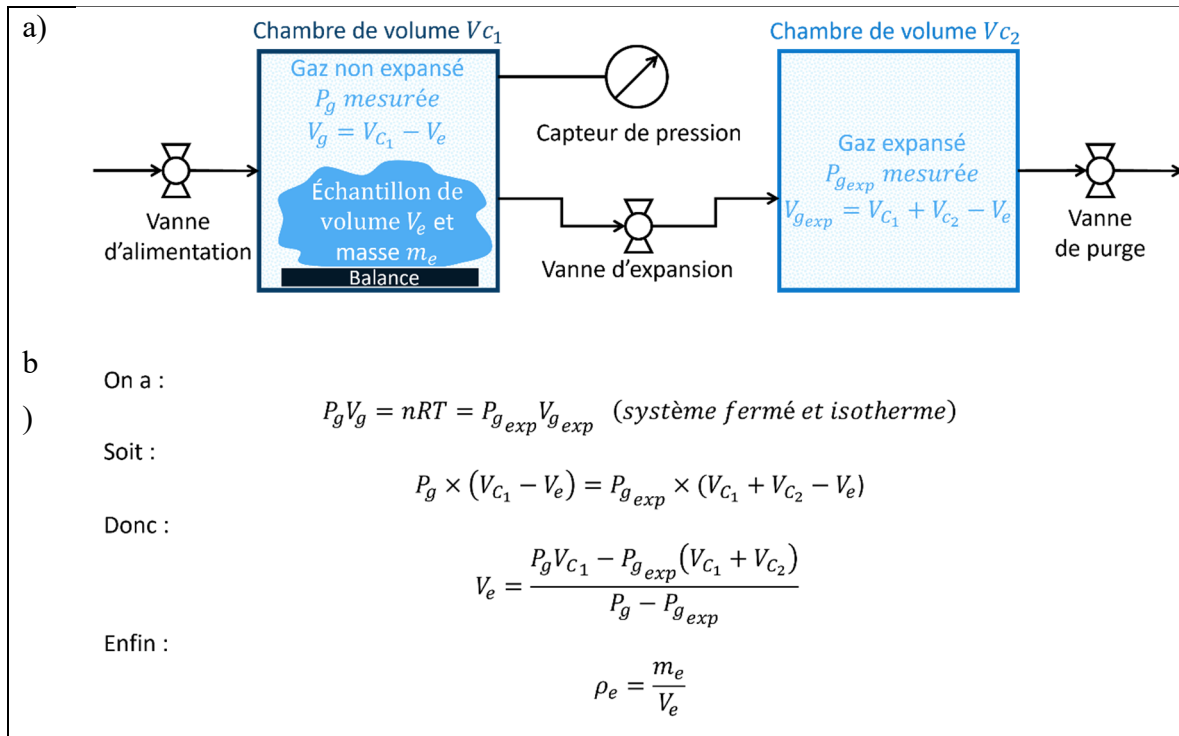


Figure-A II-1 a) Schéma de fonctionnement du pycnomètre à gaz Adaptée de Mounir (2007, p. 200) ; b) démonstration du fonctionnement théorique

A-II.2 Calcul des masses volumiques des peintures à partir des masses volumiques des poudres mesurées

Les matériaux dont la masse volumique a été mesurée à l'aide du pycnomètre à gaz sont les poudres et deux échantillons de composite de dimensions $15 \times 15 \times 6 \text{ mm}^3$ appelés Comp_1 et Comp_2. Toutes les données issues de ces essais sont recensées dans le tableau Tableau A II-1.

Tableau A II-1 Données issues de la mesure de la masse volumique des différents matériaux

Matériau	Type échantillon	Nombre de mesures	Masse échantillon (g)	Variance (%)	Volume moyen (cm ³)	Masse volumique (kg.m ⁻³)
BaSO ₄	Poudre fine	3	8,4462	0,0185	1,903	4438,4
TiO ₂	Poudre fine	5	4,6677	0,0097	1,125	4147,5
Gypse	Poudre fine	3	3,0711	0,0728	1,278	2403,8
EG1	Poudre fine	3	2,9719	0,0928	2,068	1437,1
EG2	Poudre fine	4	2,9824	0,0246	3,019	987,9
GP	Poudre fine	3	7,3065	0,0638	2,897	2522,0
Comp_1	Monolithe	5	1,2322	0,0080	1,324	930,8
Comp_2	Monolithe	5	1,1980	0,0291	1,284	933,0

En fonction de la concentration de la poudre dans la peinture transparente, la masse volumique a pu être calculée. Toutes les données nécessaires au calcul de ces concentrations sont disponibles au Tableau A II-2.

Tableau A II-2 Calcul de la masse volumique réelle des peintures appliquées

Matériau	Masse volumique de poudre (kg/m ³)	Masse prélevée de poudre (kg)	Volum e associé à la poudre (10 ⁻⁵ m ³)	Masse prélevée de peinture (kg)	Volume associé à la peinture (10 ⁻⁵ m ³)	Masse totale du mélange (kg)	Volume total du mélange (10 ⁻⁵ m ³)	Calcul de la masse volumique du mélange (kg/m ³)
BaSO ₄	4438,4	0,0706	1,5898	0,0465	4,4722	0,1171	6,062	1931,2
TiO ₂	4147,5	0,0040	0,0966	0,0199	1,9155	0,0239	2,0121	1189,1
Gypse	2403,8	0,0271	1,1288	0,0307	2,9545	0,0579	4,0834	1417,0
EG1	1437,1	0,0192	1,335	0,0278	2,6728	0,0470	4,0078	1172,3
EG2	987,9	0,0132	1,3387	0,0278	2,6735	0,0410	4,0121	1022,6
GP	2522	0,0573	2,2708	0,0310	2,9794	0,0883	5,2502	1681,0
Peinture *	1040	* : donnée fournie par la fiche technique						

ANNEXE III

FABRICATION DES ÉCHANTILLONS

Les échantillons fabriqués sont composés de deux couches : le matériau composite (épaisseur d'environ 6 mm) recouvert d'une couche de peinture (épaisseur d'environ 1,5 mm). Neuf peintures différentes ont été utilisées, permettant de créer neuf échantillons différents. Le composite était fourni avec deux peintures différentes, une noire et une blanche (voir Figure-A III-1.a et Figure-A III-1.b). Pour créer les sept autres échantillons, il était donc nécessaire de poncer la peinture originale et poser la nouvelle peinture formulée. Ainsi, comme montré à la Figure-A III-1.c, sept carrés du composite recouvert de peinture noire ont été poncés de manière à enlever la couche de peinture noire tout en gardant une épaisseur de composite constante.



Figure-A III-1 a) Photo d'un carré du composite recouvert de peinture blanche ; b) photo d'un carré de composite recouvert de peinture noire ; c) photo d'un carré de composite dont la peinture noire a été poncée

Sept carrés de composite poncés ont été utilisés pour créer un échantillon recouvert de peinture transparente, et six échantillons recouverts d'un mélange de peinture transparente et d'une poudre. Les six poudres choisies sont présentées à la Figure-A III-2.

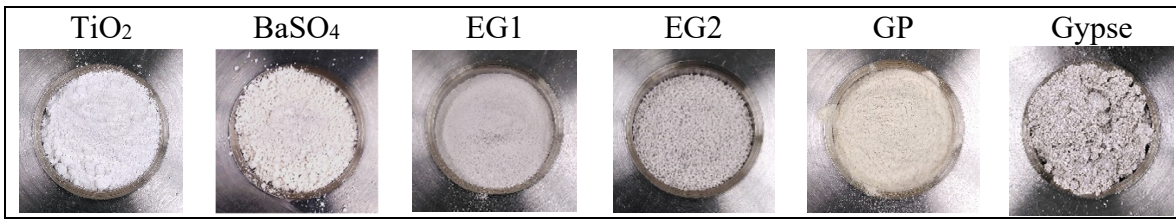


Figure-A III-2 Photos des poudres utilisées pour cette recherche

La formulation des différentes peintures a été réalisée de sorte à maximiser la concentration en poudre tout en assurant que la fluidité du mélange permettait son application sur la surface. Pour cela, chaque mélange de peinture transparente et de poudre a été préparé pour des concentrations massiques différentes. Ces concentrations sont présentées à la Figure-A III-3. Pour chaque mélange, la concentration choisie est celle qui permet l'obtention d'une peinture opaque et qui ne s'effrite pas.

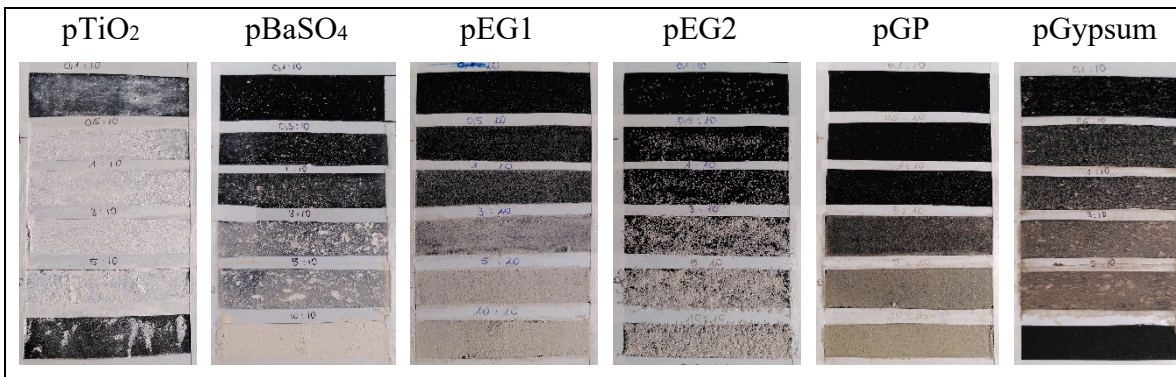


Figure-A III-3 Essais de concentration pour chaque poudre dans la peinture transparente

Une fois la concentration choisie pour chaque poudre, les mélanges ont été appliqués sur les carrés de composite poncés. Pour les mélanges qui présentaient des grumeaux (pTiO₂, pBaSO₄ et pGypsum) il a été nécessaire d'incorporer la poudre préalablement tamisée à la peinture à l'aide d'un mortier, comme le montre la Figure-A III-4.

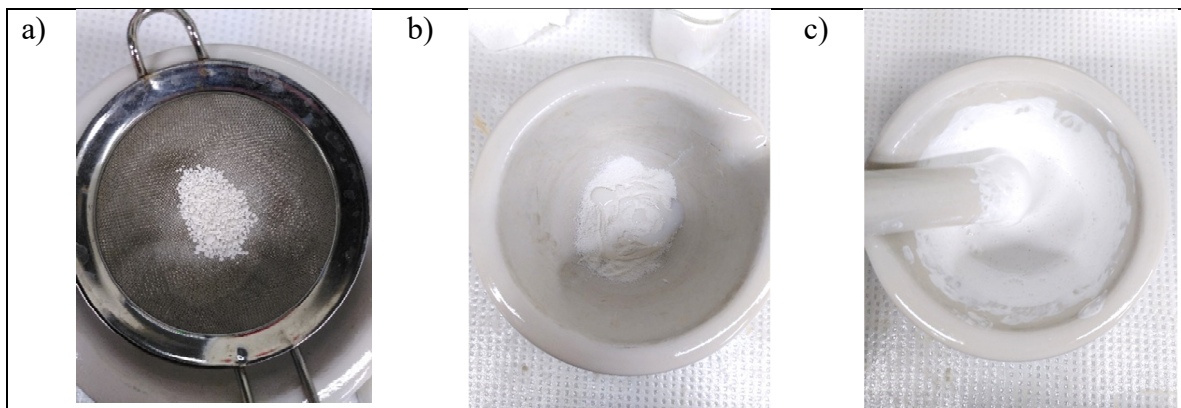


Figure-A III-4 Incorporation de la poudre de TiO_2 tamisée dans la peinture à l'aide d'un mortier

ANNEXE IV

MISE EN PLACE DES THERMOCOUPLES SUR LES ÉCHANTILLONS

Pour chaque échantillon, trois thermocouples ont été installés : un sous la peinture et deux sur la face cachée, comme le montre la Figure-A IV-1.

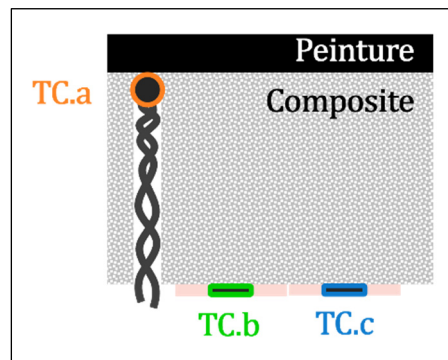


Figure-A IV-1 Placement des trois thermocouples pour un échantillon

Le thermocouple placé sous la peinture (TC.a) est un thermocouple de soudure ronde (voir Figure-A IV-2.a), tandis que les thermocouples sur la face cachée (TC.b et TC.c) présentent une soudure plate (voir Figure-A IV-2.b).

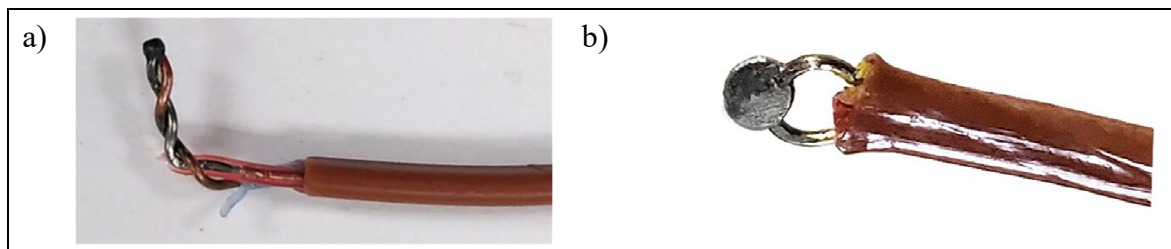


Figure-A IV-2 a) thermocouple à soudure ronde, b) thermocouple à soudure plate

Pour placer le thermocouple sous la peinture, il a été nécessaire de creuser un trou au centre de l'échantillon donc la profondeur est égale à celle du composite. Comme montré à la Figure-A IV-3, il a été nécessaire de marquer la profondeur souhaitée du trou à l'aide d'un ruban adhésif sur le foret utilisé pour marquer la limite de perçage.

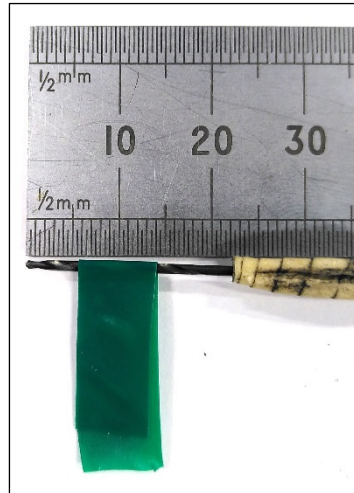


Figure-A IV-3 Photo du foret utilisé marqué de l'épaisseur du composite

Ensuite, les thermocouples plats enfermés dans une bande adhésive ont été placés à 10 et 35 mm de distance du centre de l'échantillon (voir Figure-A IV-4).

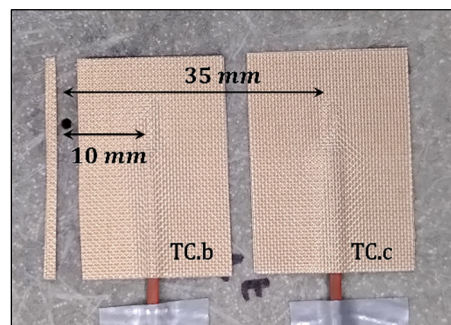


Figure-A IV-4 Placement des thermocouples plats TC.b et TC.c

Cela a été fait avant l'insertion du thermocouple TC.a puisque celui-ci nécessitait l'utilisation de pâte thermique, qui aurait empêché l'adhésion des thermocouples plats. L'ajout du thermocouple TC.a est présenté à la Figure-A IV-5.

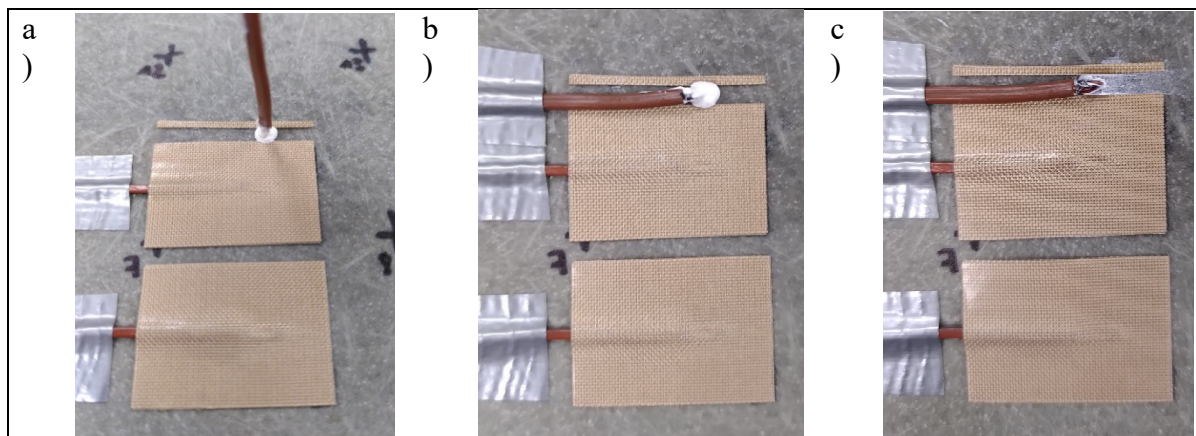


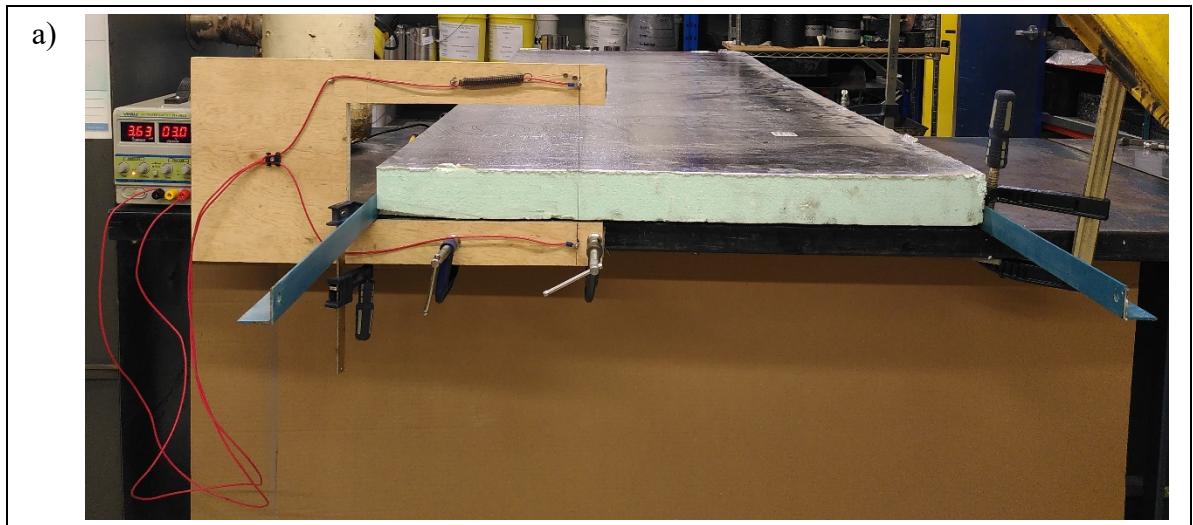
Figure-A IV-5 a) insertion du thermocouple TC.a recouvert de pâte thermique ; b) pli et maintien du thermocouple TC.a ; c) nettoyage sur surplus de pâte thermique

ANNEXE V

ENCASTREMENT DES ÉCHANTILLONS DANS L'ISOLANT POLYSTYRÈNE

A-V.1 Découpe des carrés de polystyrène

Un panneau d'isolant polystyrène expansé (Isofoil[®] de Isofoam[®], épaisseur : 76 mm) a d'abord été découpé en carrés de 300 mm de côtés. Pour cela, un fil métallique a été mis sous tension à l'aide d'un générateur de courant, ce qui l'a échauffé. Le panneau a été guidé par des rails et poussé vers le fil chaud immobile, comme le montre la Figure-A V-1.a. Sous l'effet de la chaleur concentrée dans le fil, le polymère fond. La couche d'aluminium avait été coupée au préalable sur toute la longueur de découpe (voir Figure-A V-1.b). De cette manière, il est possible d'obtenir des bandes de polystyrène dont la largeur est stable, sans que la découpe n'arrache les grains de polystyrène. La même méthode a été utilisée pour découper les bandes en carrés.



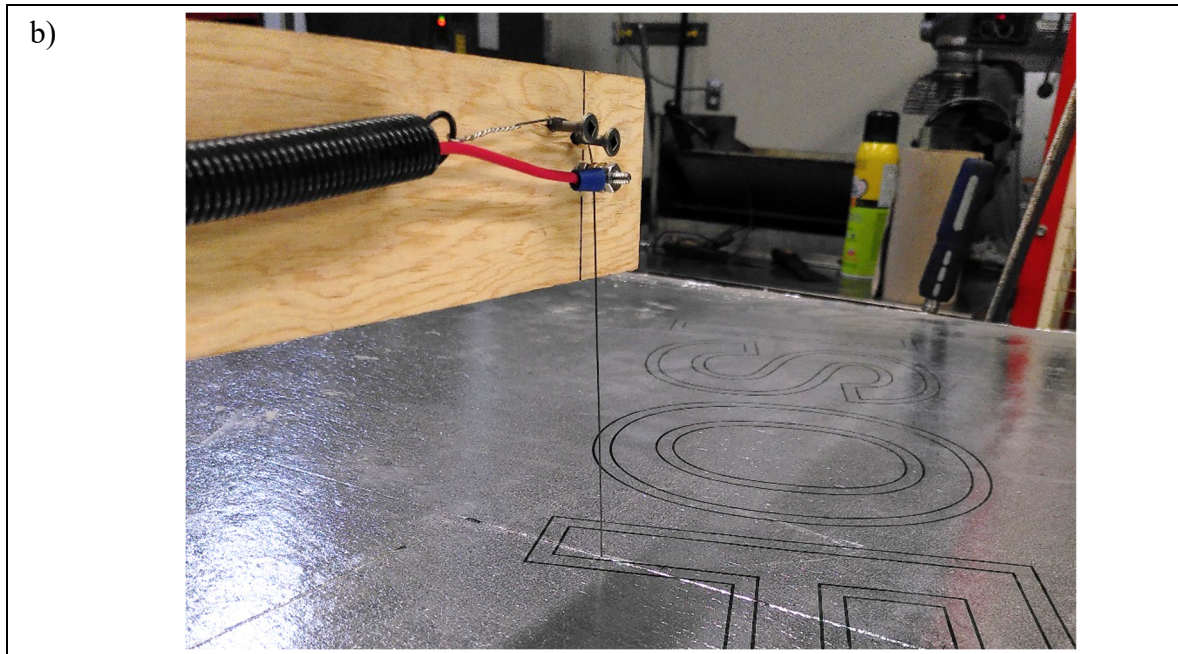


Figure-A V-1 Découpe du polystyrène à l'aide d'un fil chauffé ;
a) photo du montage entier ; b) photo du fil chauffé au sein du matériau

A-V.2 Fabrication des creux dans les carrés d'isolant pour encastrer les échantillons

Las carrés de polystyrène étaient destinés à entourer toutes les faces de chaque échantillon excepté la face exposée au rayonnement incident. Il a donc fallu, pour chaque échantillon, creuser un carré de polystyrène qui lui permette d'être parfaitement encastré. Cela a été réalisé en quatre étapes :

- 1) Identifier le carré de polystyrène avec l'échantillon utilisé, ce carré de polystyrène ne peut pas être utilisé pour un autre échantillon que celui actuel. Dans ce mémoire, une étiquette a été collée sur un côté du polystyrène comme montré à la Figure-A V-2;
- 2) Centrer l'échantillon sur le carré de polystyrène (voir Figure-A V-3.a)) et marquer le contour (voir Figure-A V-3.b));
- 3) Marquer un cutter de la profondeur de creusage souhaitée, soit l'épaisseur de l'échantillon (Figure-A V-4.a)) et creuser la zone délimitée (Figure-A V-4.b,c et d));
- 4) Tester et ajuster pour que la surface de l'échantillon soit de niveau avec la surface d'aluminium comme le montre la Figure-A V-5.

Le creusage a été réalisé à la main à l'aide d'une simple lame de cutter. Cela a créé de l'arrachement des billes de polystyrène, le fond ainsi obtenu était irrégulier. Donc, à l'insertion de l'échantillon dans le creux avec force, les irrégularités ont été écrasées contre la surface de l'échantillon, assurant le bon contact avec le polystyrène.

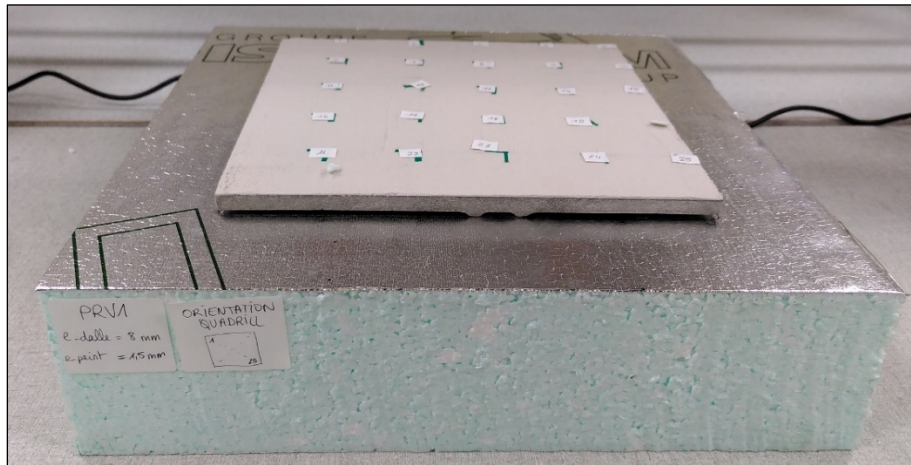


Figure-A V-2 Identification du carré de polystyrène avec l'échantillon correspondant

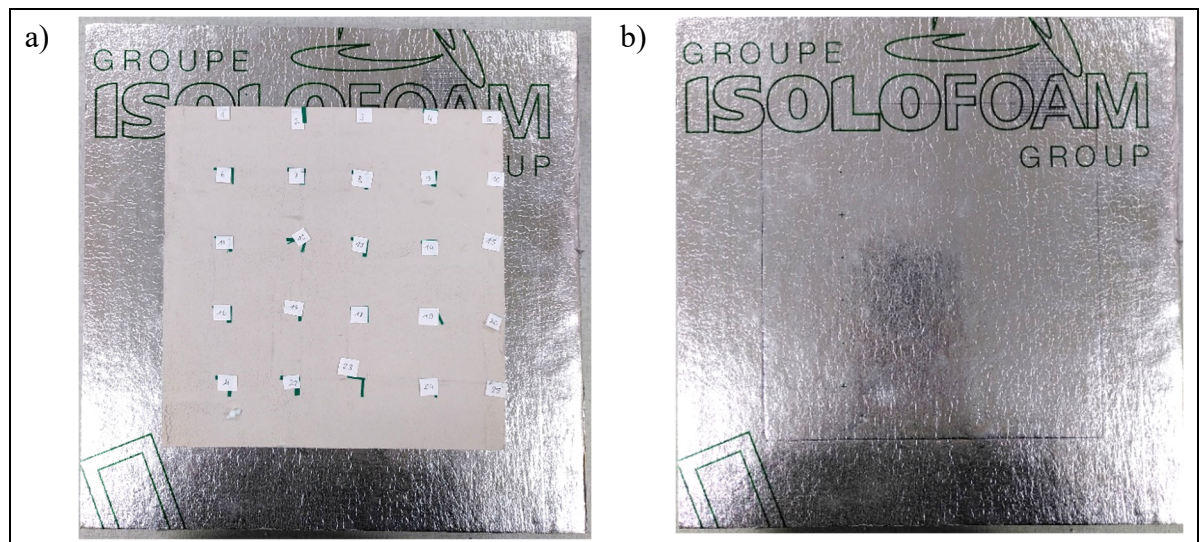


Figure-A V-3 a) Positionnement centré de l'échantillon sur le carré de polystyrène ;
b) marquage du contour

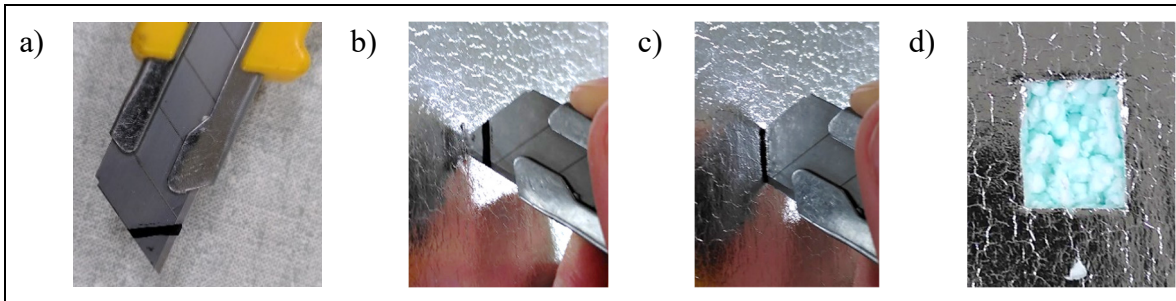


Figure-A V-4 a) marquage de la profondeur souhaitée sur le cutter ; b) positionnement du cutter sur la surface à découper ; c) découpe à la profondeur souhaitée ; d) petit carré découpé à répliquer sur toute la surface à creuser

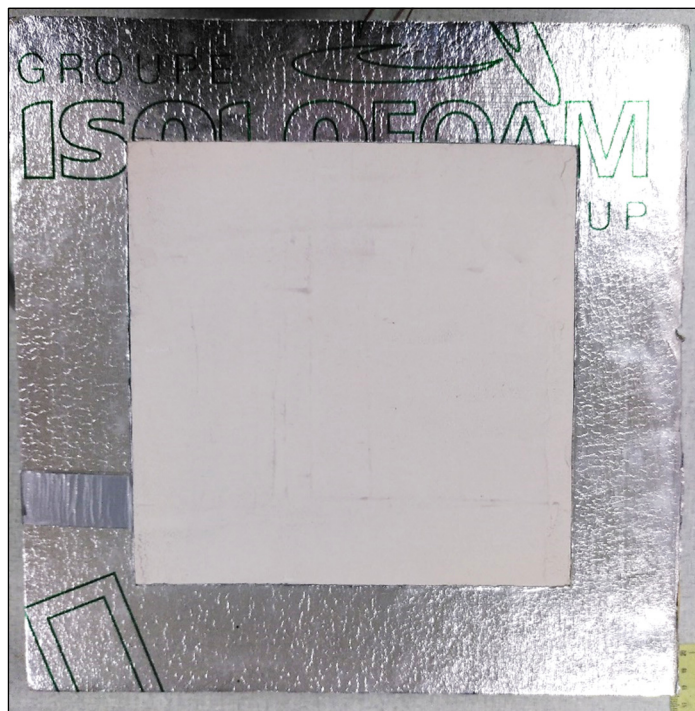


Figure-A V-5 Échantillon encastré dans le carré de polystyrène

ANNEXE VI

FONCTIONNEMENT ET UTILISATION DU MTPS POUR LA MESURE DE LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE ET DE L'EFFUSIVITÉ THERMIQUE

A-VI.1 Fonctionnement du MTPS

Le Modified Transient Plane Source (MTPS) est un appareil de mesure de la conductivité thermique et de l'effusivité thermique qui peut être appliqué à de solides plans, des poudres, mais aussi des liquides. Pour l'utiliser, il suffit de placer l'échantillon à identifier en contact avec le capteur. Comme le montre la Figure-A VI-1, le capteur consiste en une spirale métallique servant à la fois d'élément chauffant et de capteur, entourée d'un anneau de garde lui aussi chauffant. La spirale est alimentée par une pulsation permettant d'augmenter sa température de 1 à 3 degrés Celsius. L'anneau de garde, lui-aussi soumis à un courant et donc chauffé, permet d'obtenir un flux thermique unidirectionnel perpendiculaire à la spirale et dirigé vers l'échantillon. Un isolant est placé sous ces deux éléments pour assurer que toute la chaleur produite soit dirigée vers l'échantillon. Le transfert d'énergie de la spirale vers l'échantillon fait chuter la tension appliquée à la spirale, qui est liée à sa température, et permet donc de résoudre l'équation de la chaleur pour finalement remonter à l'effusivité thermique et la conductivité thermique de l'échantillon.

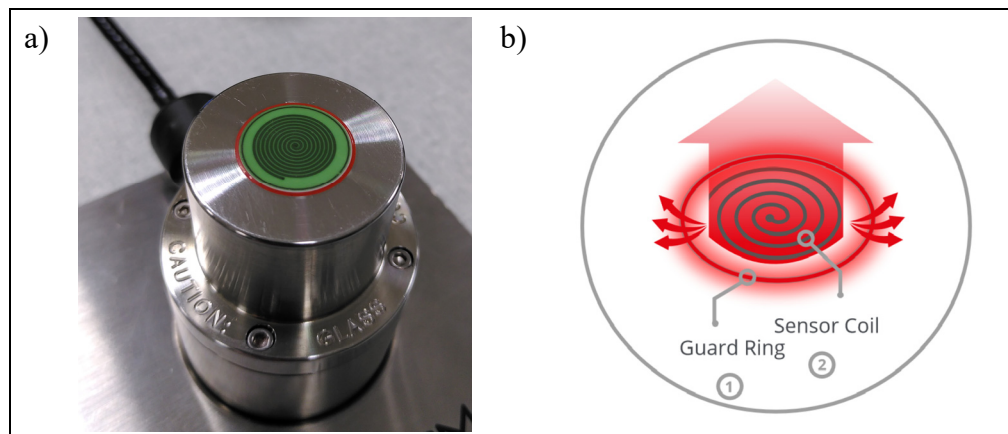


Figure-A VI-1 a) Photo du capteur MTPS ;
b) Schéma du fonctionnement du capteur
Tirée de C-Therm (2020)

A-VI.2 Mesures de la conductivité thermique pour les deux faces des échantillons

Pour chaque échantillon, la conductivité thermique des faces exposée (peinture) et cachée (composite) a été mesurée à l'aide du MTPS. La surface du capteur était petite (diamètre de 18 mm), il était nécessaire de réaliser entre 8 et 12 mesures sur chaque face. Pour cela, chaque face a été divisée en 25 carrés de $40 \times 40 \text{ mm}^2$ comme présenté à la Figure-A VI-2.

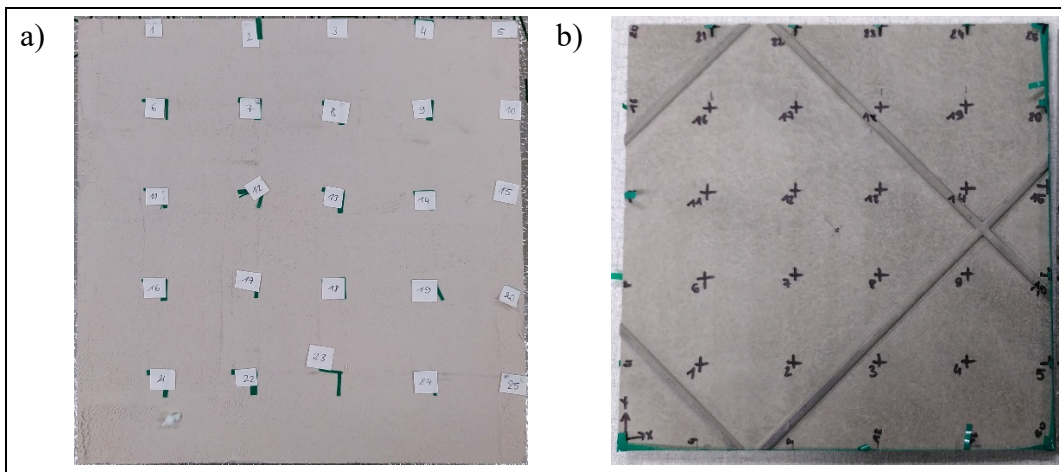


Figure-A VI-2 a) face exposée (peinture) divisée en 25 carrés ;
b) face cachée (composite) quadrillée

Les carrés choisis pour prendre la mesure de la conductivité étaient dispersés sur l'échantillon. Pour chaque échantillon les carrés formant les diagonales ont été choisis (neuf au total). Les derniers points de mesures choisis dépendaient de face en question (présence d'irrégularités qui empêchent la pose du capteur). Concrètement, pour réaliser la mesure, il fallait d'abord assurer le contact entre le capteur et l'échantillon en ajoutant trois gouttes d'eau, comme présenté à la Figure-A VI-3. Selon la présence de creux – par exemple le trou creusé pour l'insertion du thermocouple TC.a ou bien la rugosité importante de l'échantillon pEG2 – le nombre de gouttes d'eau a été ajusté. Ensuite, le capteur a été posé dessus et maintenu avec un poids de 500 g, fourni avec le capteur.

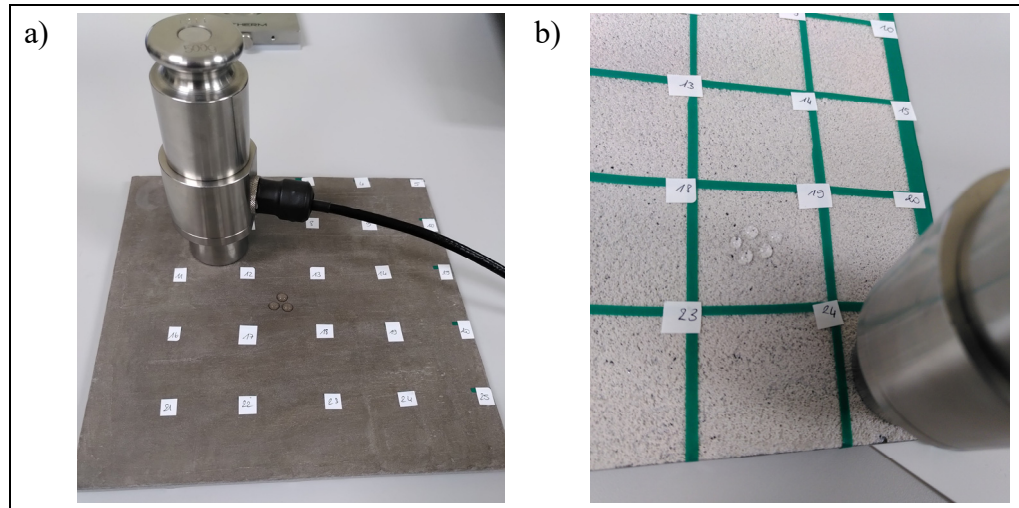


Figure-A VI-3 a) présentation de la mesure de la conductivité thermique sur un carré de la face exposée utilisant trois gouttes d'eau ; b) mise en évidence du nombre de gouttes nécessaires pour assurer le contact entre l'échantillon et le capteur

Enfin, une fois toutes les mesures réalisées, la conductivité thermique attribuée à une face était la moyenne de toutes les mesures réalisées.

ANNEXE VII

FONCTIONNEMENT ET UTILISATION DU SPECTROPHOTOMÈTRE À SPHÈRE D'INTÉGRATION POUR LA MESURE DE LA RÉFLECTANCE SOLAIRE

A-VII.1 Fonctionnement du spectrophotomètre avec sphère d'intégration

Un spectrophotomètre avec sphère d'intégration permet de mesurer la réflectance, l'absorbance et la transmittance des matériaux solides, liquides, ou poudres. Pour cela, un rayonnement d'une seule longueur d'onde est émis à la surface de l'échantillon testé et le rayonnement réfléchi ou bien transmis est mesuré. Pour la mesure de la réflectance, il est nécessaire de place l'échantillon derrière une sphère creuse appelée « d'intégration ». Le rayonnement envoyé traverse la sphère pour atteindre la surface de l'échantillon. Il est ensuite en partie réfléchi vers l'intérieur de la sphère. Cette sphère est recouverte d'un matériau parfaitement réfléchissant, ce qui assure une distribution uniforme du rayonnement réfléchi sur toute sa surface. Ainsi, le rayonnement renvoyé par la surface est collecté dans la sphère où se trouve un capteur qui mesure la quantité du flux à l'intérieur de la sphère.

A-VII.2 Mesure de la réflectance des échantillons

Pour chaque échantillon, la réflectance a été mesurée pour les longueurs d'onde comprises entre 200 et 2500 nm, comme présenté à la Figure-A VII-1. Cette figure présente aussi les deux sources de rayonnement (lampes de deutérium et de tungstène), les autres équipements ainsi que le chemin emprunté par le rayonnement d'une seule longueur d'onde pour atteindre la surface de l'échantillon.

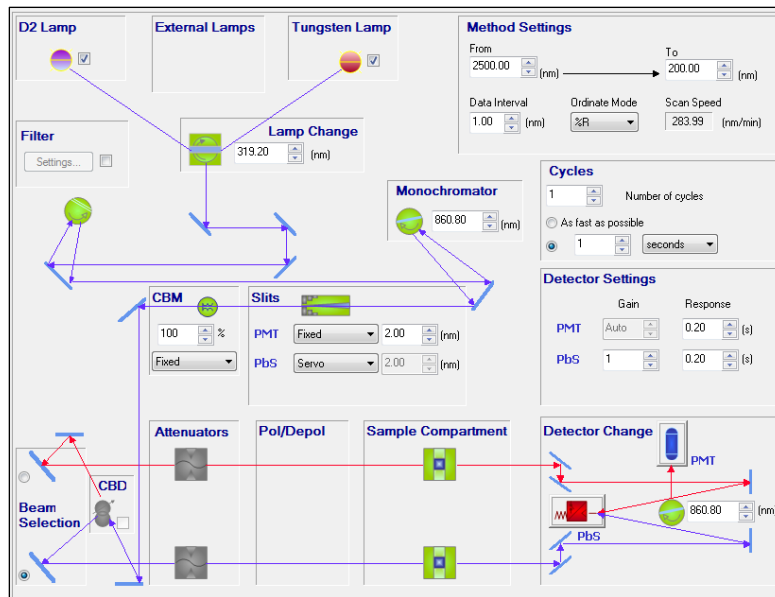


Figure-A VII-1 Réglages utilisés pour la mesure de la réflectance

Pour chaque échantillon, trois mesures ont été réalisées en suivant la norme ASTM E903 (2020). Les réflectances spectrales obtenues sont présentées à la Figure-A VII-2.

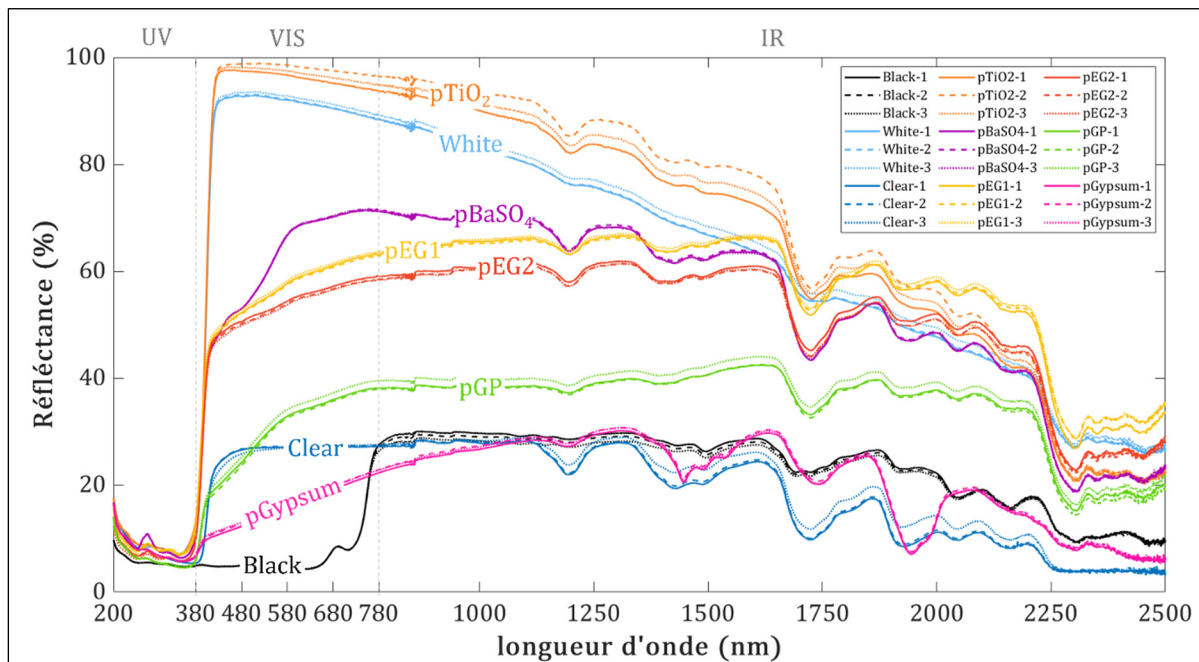


Figure-A VII-2 Réflectance spectrale pour chaque échantillon

A-VII.3 Calcul de la réflectance solaire à partir des résultats obtenus

Ce qui a été mesuré est la réflectance spectrale pour chaque échantillon, pour des rayonnements provenant de sources artificielles (les deux lampes). Or, la réflectance solaire souhaitée correspond à la proportion totale du rayonnement solaire qui peut être renvoyé par une surface. Alors, pour chaque échantillon, il fallait calculer la réflectance solaire suivant la formule (A VII-1).

$$r_s = \frac{\sum_{i=200}^{2500} r(\lambda_i) I_{\lambda_i} \Delta\lambda_i}{\sum_{i=200}^{2500} I_{\lambda_i} \Delta\lambda_i} \quad (\text{A VII-1})$$

Où $r(\lambda_i)$ est la réflectance de l'échantillon considéré à la longueur d'onde λ_i , I_{λ_i} est l'irradiance du soleil à la longueur d'onde λ_i obtenue dans la norme ASTM G173 (2023), et $\Delta\lambda_i$ est la différence entre deux longueurs d'onde. Ici cette différence vaut 1 puisque la réflectance des échantillons a été mesurée pour chaque longueur d'onde.

ANNEXE VIII

CARACTÉRISATION THÉORIQUE DES FLUX DE CONVECTION ET ÉMIS AU COURS DES ESSAIS D'ÉVALUATION DES PERFORMANCES RADIATIVES ET ISOLANTES

Cette annexe est dédiée à la caractérisation du flux de convection qui a lieu sur toutes les surfaces en contact avec l'air lors des essais présentés au CHAPITRE 3, ainsi que le flux émis par la surface des échantillons. Il était nécessaire de renseigner ces flux pour réaliser la simulation numérique des essais.

A-VIII.1 Caractérisation du flux de convection sur les surfaces en contact avec l'air

Comme expliqué au CHAPITRE 1, le transfert thermique par convection est régi par la loi de Newton (1.15), qui dépend du coefficient de convection (h). Pour déterminer la valeur de ce coefficient, il est possible de recourir aux tables de l'ASHRAE (2021). Dans le cas présent, la convection est naturelle (pas de mécanisme de ventilation), la surface exposée au rayonnement est horizontale et cette surface est refroidie par convection de l'air au-dessus, il est ainsi possible de calculer le nombre de Nusselt (Nu) suivant l'équation :

$$Nu = 0.27 Ra^{1/4} \quad (\text{A VIII-1})$$

Où Ra fait référence au nombre Rayleigh, qui se calcule suivant l'équation (A VIII-2) :

$$Ra = \frac{g\beta\Delta T L_c}{\nu a} \quad (\text{A VIII-2})$$

Où $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ est la gravité, $\beta \text{ (m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{)}$ est le coefficient d'expansion thermique, $\Delta T = |T_s - T_\infty| \text{ (K)}$ est la différence de température entre la surface et l'air ambiant, $L_c = A/P \text{ (m)}$ est la longueur caractéristique déterminée comme la division de l'aire de l'échantillon par son périmètre, $\nu \text{ (m}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$ est la viscosité cinématique du fluide et $a \text{ (m}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$ est diffusivité thermique de l'air. Toutes les propriétés de l'air doivent être prises

à la température $(T_s + T_\infty)/2$, ou au plus proche, avec T_s la température de la surface et T_∞ la température de l'air ambiant.

Selon les résultats présentés au CHAPITRE 3, la température de l'air était en moyenne de 22 °C (voir section 3.6), et la température de surface maximale atteinte (point SP.c) était de 91 °C, en moyenne sur tous les essais. Ainsi, avec les propriétés de l'air disponibles à 55 °C (Evans, 2015) et $L_c = 0,2^2/(4 \times 0,2) = 0,05 \text{ m}$, le nombre de Rayleigh calculé est de $Ra = 6,425 \times 10^5$. En utilisant cette valeur pour calculer le nombre de Nusselt, le coefficient de convection calculé fut de 7,9 ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$) (voir équation (1.16)).

Ainsi, le flux de convection qui a lieu à la surface de température T_s dans l'air à la température T_∞ est déterminé par l'équation (A VIII-3).

$$\varphi_{convection} = 7,9(T_s - T_\infty) \quad (\text{A VIII-3})$$

Cette valeur correspond bien aux valeurs données généralement à la convection naturelle (voir section 1.2.3).

A-VIII.2 Caractérisation du flux émis à la surface des échantillons

Ensuite, l'expression du flux émis par une surface a été déterminée. Pour simplifier les simulations, une émissivité thermique de 0,905 a été choisie pour tous les échantillons (en cohérence avec la section 3.6). Ainsi, le flux émis par la surface à la température T_s dans l'air à la température T_∞ est déterminé par l'équation (A VIII-4), où $\varepsilon = 0,905$.

$$\varphi_{emis} = \varepsilon(T_s^4 - T_\infty^4) \quad (W \cdot m^{-2}) \quad (\text{A VIII-4})$$

ANNEXE IX

ESTIMATION DES FLUX INCIDENTS INFRAROUGE ET VISIBLE À L'AIDE DE LA THÉORIE DES CORPS GRIS

L'objectif de cette annexe est de caractériser théoriquement les flux de spectre visible et infrarouge reçus à la surface des échantillons au cours des essais présentés au CHAPITRE 3. La méthode théorique utilisée s'appuie sur la théorie des corps gris présentée à la section 1.2.1.

La séparation en deux flux distincts (visible et infrarouge uniquement) induit l'utilisation de deux corps gris distincts : un qui émet un flux dont une partie est visible, un autre qui n'émet que dans l'infrarouge. Pour rappel, le flux en $W.m^{-2}$ émis par un corps gris dépend de sa température et de son émissivité thermique. Il faut donc déterminer deux corps de températures différentes et leur associer une émissivité.

A-IX.1 Détermination des deux corps gris

La lampe utilisée est composée de deux parties, comme représenté à la Figure-A IX-1. D'une part la capsule enfermant le filament de tungstène plongé dans un gaz halogène et d'autre part, le réflecteur dans lequel est enfermée la capsule. Lorsque le filament est soumis au courant électrique, sa température augmente ce qui produit de la chaleur et de la lumière. Le réflecteur est la partie visible de l'ampoule et permet de diriger le flux émis par le filament vers l'extérieur. Le flux doit passer par la calotte frontale en quartz (voir Figure-A IX-1).

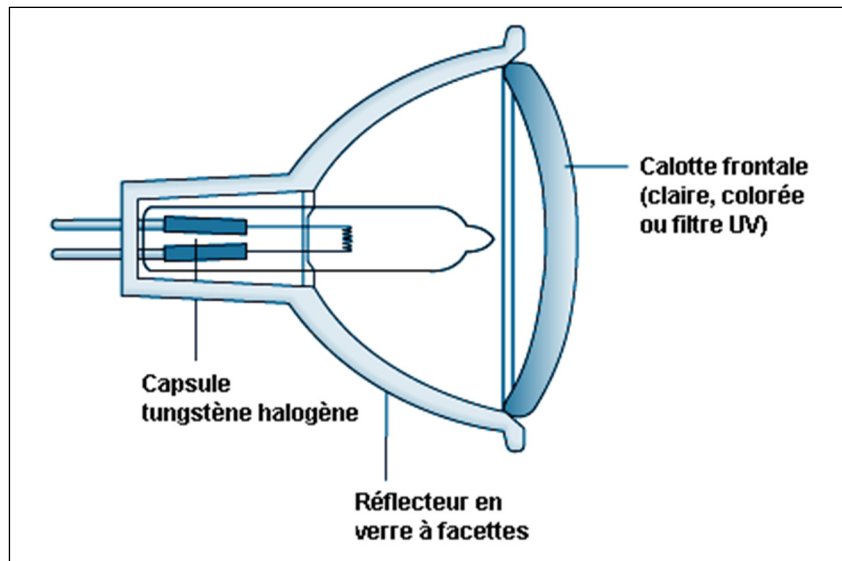


Figure-A IX-1 Schéma de la composition
d'une ampoule halogène-tungstène
Tirée de ILO (2004)

Par ailleurs, la fiche technique de l'ampoule utilisée au cours des expériences indique la « Correlated Color Temperature » qui est la température d'un corps noir associée à la couleur de la lumière dégagée par la lampe. Elle vaut 2925 K pour cette lampe et peut être associée au filament de tungstène, qui a une émissivité de 0,39 lorsqu'il est neuf (Transmetra, 2017).

Cependant, la fiche technique n'indique pas d'autre température. Alors pour le flux infrarouge, il a été choisi de prendre la calotte en quartz comme deuxième corps gris émetteur d'un flux infrarouge. Le quartz a une émissivité thermique de 0,93 (Transmetra, 2017). La température de la calotte en quartz a donc été mesurée à l'aide de la caméra thermique dès l'allumage de la lampe puis toutes les 10 minutes. La caméra était placée à 0,5 m de la lampe et l'émissivité thermique était réglée à 0,93. La température associée à la lampe pour chaque mesure est la moyenne estimée sur la surface de la lampe, comme le montre la Figure-A IX-2.

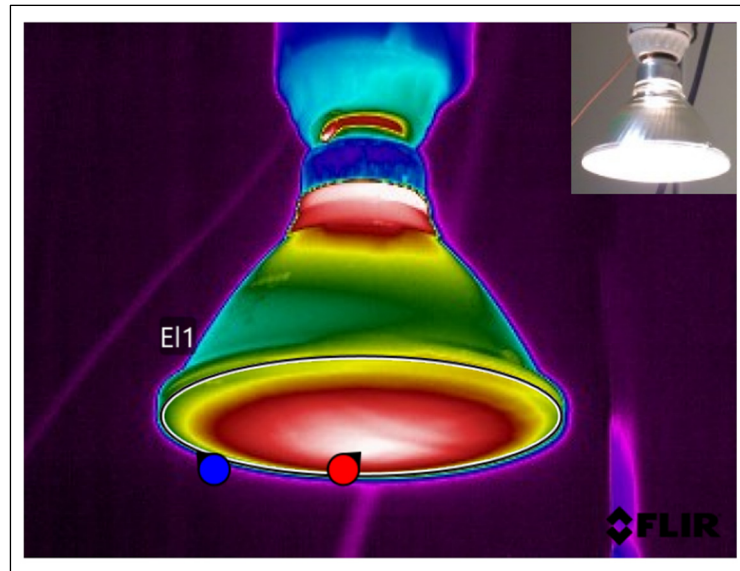


Figure-A IX-2 Image thermographique de la lampe
30 secondes après l'avoir allumée

Les températures minimales, maximales et moyennes obtenues pour chaque instant, sont regroupées au Tableau-A IX-1. Pour déterminer une seule valeur de la température du corps, une moyenne a été réalisée sur les moyennes obtenues à chaque instant. Alors, 77 °C est la température associée au corps gris émettant le flux infrarouge.

Tableau-A IX-1 Températures minimale, maximale et moyenne mesurées à la surface de la lampe pour différents instants après allumage

Temps écoulé (min)		0,5	10	20	30	40	50	60	70	80
Température (°C)	<i>Minimale</i>	27,2	25,9	38,2	46,9	41,2	44,0	31,2	28,2	28,1
	<i>Maximale</i>	40,2	93,5	104,6	108,9	112,4	110,6	110,5	110,2	102,3
	<i>Moyenne</i>	33,4	69,6	80,5	83,9	87,3	85,6	85,4	85,1	79,6

A-IX.2 Calcul des flux émis par les deux corps gris

Le flux émis par un corps gris est celui émis par un corps noir à la même température, multiplié par l'émissivité du corps gris. Pour tenir compte du spectre d'émission (ultraviolet, visible, infrarouge, etc.), il est nécessaire de calculer l'irradiance spectrale du corps en question.

L'irradiance spectrale de deux corps noirs aux températures 2925 K et 350 K (77 °C) est représentée à la Figure-A IX-3, ainsi que celle d'un corps noir à la température du Soleil. Il est alors possible de vérifier que le corps à 77 °C n'émet effectivement que dans l'infrarouge.

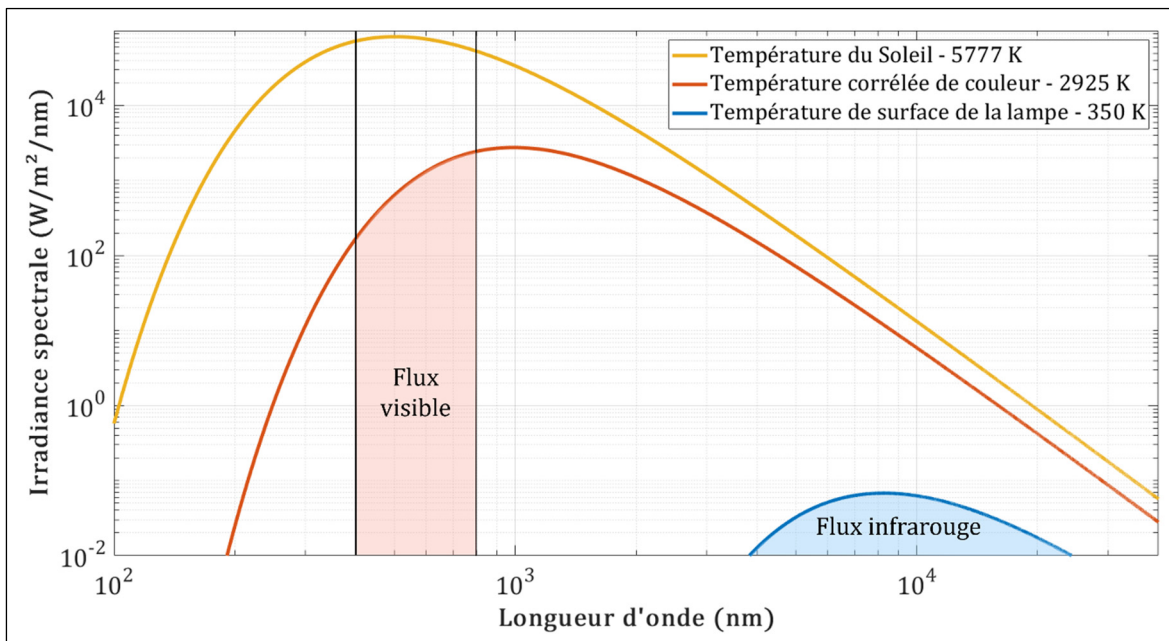


Figure-A IX-3 Irradiance spectrale de trois corps noirs de différentes températures et décomposition du flux incident en un flux visible et un flux infrarouge

Cependant, un corps à 2925 K (la température associée au filament de tungstène) n'émet pas seulement dans le visible, mais aussi dans l'infrarouge (voir Figure-A IX-3). Or, la méthode a pour but de séparer les deux flux. C'est pourquoi le flux visible ne sera associé qu'à la partie visible émise par un corps 2925 K, soit, l'aire rouge montrée à la Figure-A IX-3.

Le flux visible émis ($\varphi_{VIS_{emis}}$) par le filament de tungstène à la température 2925 K et avec une émissivité de 0,39, ainsi que le flux infrarouge émis ($\varphi_{IR_{emis}}$) par la surface de la lampe

en quartz à la température 350 K et avec une émissivité de 0,93 sont calculés à l'aide des équations (A IX-1) et (A IX-2) respectivement.

$$\varphi_{VIS_{emis}} = 0,39 \times \int_{400}^{700} I_{2925}^0(\lambda). d\lambda \quad (W.m^{-2}) \quad (A IX-1)$$

$$\varphi_{IR_{emis}} = 0,93 \times \int_0^{\infty} I_{350}^0(\lambda). d\lambda \quad (W.m^{-2}) \quad (A IX-2)$$

Où $I_{temperature}^0(\lambda)$ est l'irradiance spectrale d'un corps noir à une certaine température, comme expliqué à la section 1.2.1.

Le flux émis par chaque corps peut donc être estimé. Le flux reçu à une surface est plus faible que le flux émis à l'origine, puisque celui-ci se propage dans l'espace avant d'atteindre la surface. Pour calculer le flux reçu en $W.m^{-2}$ il faut utiliser l'équation (A IX-3) :

$$Flux_{recu} = Flux_{emis} \times \frac{Surface\ emission}{Surface\ reception} \quad (A IX-3)$$

Il est donc nécessaire de connaître les surfaces d'émission des deux sources ainsi que la surface de réception.

A-IX.3 Calcul des surfaces d'émission de chaque flux

Pour le flux infrarouge, la surface d'émission est la surface de la lampe, de diamètre connu. Sa surface vaut $S_{lampe} = 1,16 \times 10^{-4} m^2$ en l'assimilant à un disque plat. Pour estimer la surface du filament de tungstène, il est possible d'utiliser la méthode proposée par Jenkins et al. (2019), basée sur les données électriques fournies à la lampe. Le rapport entre la longueur du filament de tungstène (L_{fil}) et sa surface (A_{fil}) peut être approché par l'équation (A IX-4) :

$$\frac{L_{fil}}{A_{fil}} = \frac{V_{fil}^2}{r_{tung} \cdot P_{fil}} \quad (\text{A IX-4})$$

Où V_{fil} est la tension appliquée au filament, P_{fil} est la puissance consommée par le filament et r_{tung} est la résistance électrique du tungstène. Cette résistance est calculée en fonction de la température du filament (T_{fil}) suivant l'équation (A IX-5), toujours d'après Jenkins et al. (2019).

$$r_{tung} = 5,92 \times 10^{-11} \times T_{fil}^{1,2036} \quad (\text{A IX-5})$$

D'après la fiche technique de l'ampoule utilisée pour ce projet, celle-ci peut être soumise à une tension maximale de 130 V et consomme 90 W. La température du fil est associée à la température de couleur corrélée 2925 K. Ainsi $(L_{fil}/A_{fil}) = 2,1355 \times 10^8 \text{ m}^{-1}$, en appliquant les équations (A IX-4) et (A IX-5).

De cette expression peut être obtenue l'aire du fil, mais il faut au préalable connaître son diamètre. Celui-ci n'est pas obtenu à l'aide des données électriques. Les seuls détails fournis par la fiche technique sont que la taille de la capsule est comprise entre 40 et 60 mm et le filament est enroulé selon la forme CC-8 (bobine bobinée). La capsule étudiée par Jenkins et al. (2019) est le modèle CP77 FEP 230 de la marque General Electric[®]. Le filament est aussi de la forme CC-8 et opère à un maximum de 230 V pour une consommation de 1000 W. Le rapport de longueur surfacique trouvé pour ce filament est environ 10 fois plus petit que celui obtenu pour ce mémoire, ce qui laisse penser que les diamètres des deux filaments comparés sont différents. Pour déterminer le diamètre du filament utilisé dans ce mémoire, il a été nécessaire de trouver une capsule dont les caractéristiques sont les plus proches de celle étudiée. La capsule choisie est le modèle 100T4Q/GY86/120 de la marque Westinghouse[®]. Le diamètre du filament n'étant pas disponible dans la fiche technique de cette capsule, il a été nécessaire de le mesurer à l'aide du logiciel ImagJ, comme montré à la Figure-A IX-4.a. Pour s'assurer de la fiabilité de la méthode, les mêmes mesures ont été réalisées sur la capsule de référence utilisée par Jenkins et al (voir Figure-A IX-4.b).

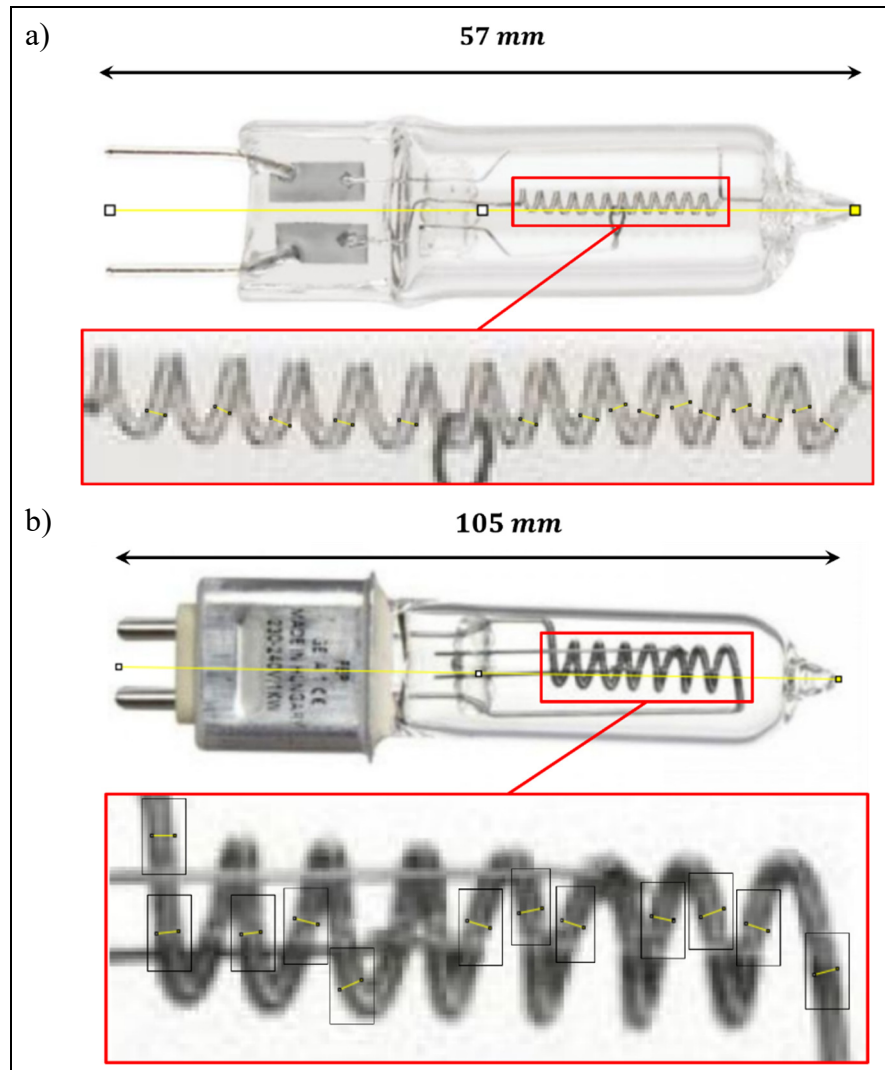


Figure-A IX-4 Estimation à l'aide du logiciel ImageJ du diamètre du filament : a) de l'ampoule étudiée et b) de la référence
Photos tirées de GE Lighting (2023) et Westinghouse (2014)

Les dimensions obtenues à l'aide du logiciel ImageJ sont de 0,882 mm pour le filament de référence ($D_{ref\ mesure}$) et 0,370 mm pour le filament étudié ($D_{fil\ mesure}$). Cependant, le diamètre mesuré est celui de la petite spirale et non celle du filament. Donc, pour déterminer la valeur du diamètre du filament étudié (D_{fil}), il a été choisi de rapporter les mesures de manière relative au diamètre du filament de référence ($D_{ref} = 180,8\ \mu m$), selon l'équation (A IX-6) :

$$D_{fil} = D_{ref} \times \frac{D_{fil\ mesure}}{D_{ref\ mesure}} \quad (\text{A IX-6})$$

Toujours d'après Jenkins et al. (2019), la longueur du filament est calculée suivant l'équation (A IX-7), et finalement, la surface du filament est obtenue à l'aide de l'équation (A IX-8). La surface du filament étudiée est donc de $S_{fil} = 2,25 \times 10^{-4} m^2$.

$$L_{fil} = \left(\pi \times \frac{D_{fil}^2}{4} \right) \left(\frac{L_{fil}}{A_{fil}} \right) \quad (\text{A IX-7})$$

$$S_{fil} = L_{fil} \times \pi \times D_{fil} \quad (\text{A IX-8})$$

A-IX.4 Calcul des surfaces de réception des flux

Enfin, il était nécessaire de déterminer les surfaces de réception du flux incident. Le rayonnement issu de la lampe ne se propage pas selon une surface plane, mais plutôt sur une surface sphérique, comme le montre la Figure-A IX-5. Donc pour calculer le flux reçu à la surface (en $J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$ ou $W \cdot m^{-2}$), il faut prendre comme surface de réception non pas ce qui est perçu (la surface plate du halo), mais la partie de la surface sphérique qui atteint l'échantillon. Cette partie de sphère est appelée une calotte sphérique.

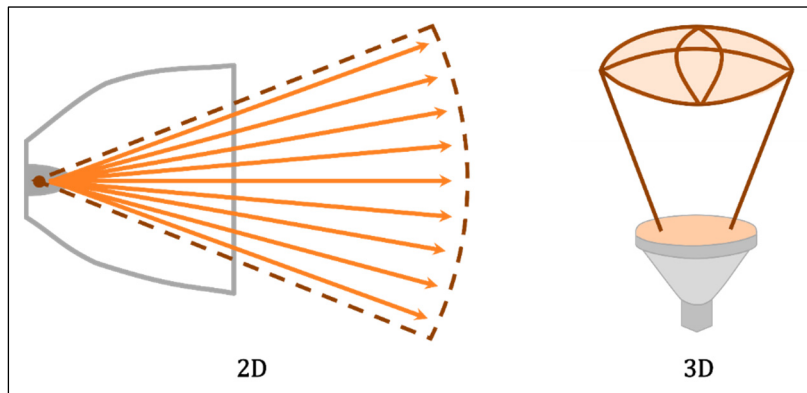


Figure-A IX-5 Distance parcourue par les rayons de même longueur d'onde, à la même vitesse et dans différentes directions : le rayonnement se propage sphériquement

Comme expliqué à la section 3.4.1, deux halos sont distingués par l'intensité qui y est reçue (voir Figure 3.6). À l'aide des données de la fiche technique de la lampe utilisée pour ce projet, il est possible de conclure que 80 % de l'intensité émise par la lampe est reçue au hotspot, et les 20 % restants sont reçus à la couronne. Il était donc nécessaire d'estimer la surface de propagation du rayonnement pour ces deux halos. La démarche suivie est représentée à la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

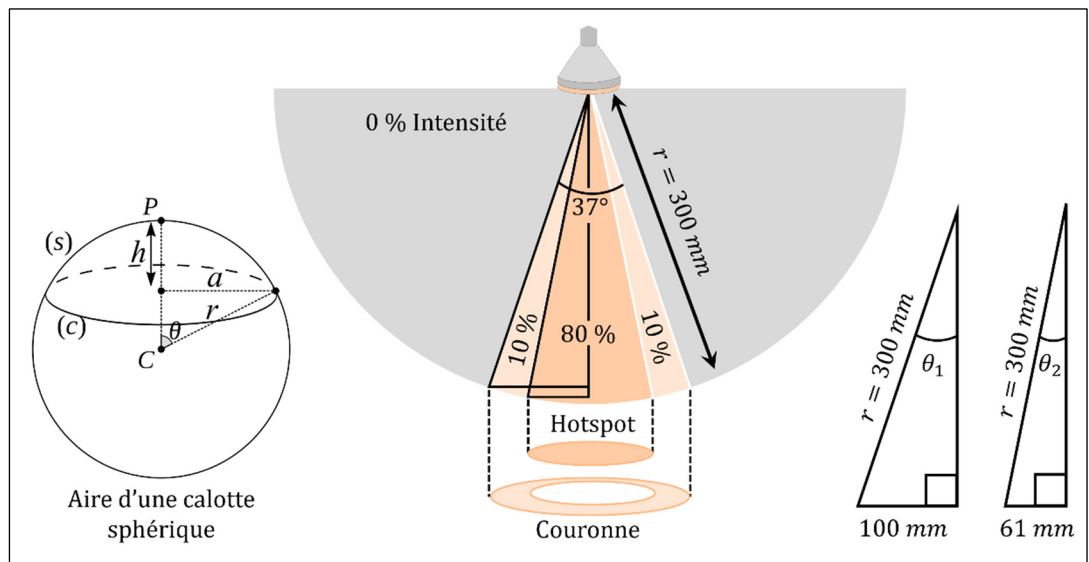


Figure-A IX-6 Représentation schématique du calcul des aires de réception des flux en fonction de l'intensité des halos

La surface d'une calotte sphérique dépend : (i) du rayon r de la sphère, qui vaut 300 mm dans ce cas (voir Figure 3.6) ; (ii) du rayon a du cercle de base de la calotte, qui vaut ici le rayon du halo hotspot ou celui de la couronne ; (iii) de la hauteur h de la calotte sphérique. Cette hauteur est calculée à partir des deux autres données à l'aide de l'équation (A IX-9).

$$h = r - \sqrt{r^2 - a^2} \quad (\text{A IX-9})$$

La surface d'émission permettant de percevoir le hotspot est calculée suivant l'équation (A IX-10) et vaut $S_{calHot} = 0,0117 \text{ m}^2$:

$$S_{calHot} = 2\pi r h_{Hot} \quad \begin{array}{l} \text{(A} \\ \text{IX-10)} \end{array}$$

La surface d'émission permettant de percevoir la couronne est calculée suivant l'équation (A IX-11) et vaut $S_{calCour} = 0,0323 \text{ m}^2$:

$$S_{calCour} = 2\pi r h_{Cour} \quad \begin{array}{l} \text{(A} \\ \text{IX-11)} \end{array}$$

A-IX.5 Calcul des flux reçus selon la position à la surface et le spectre du flux

Finalement, quatre flux sont déterminés : deux flux visible et infrarouge reçus au hotspot et deux flux visible et infrarouges reçus à la couronne. Pour chaque flux, la formule (A IX-3) à laquelle l'intensité du flux considéré est ajoutée, donnant alors :

$$\varphi_{VIS_{hotspot}} = 0,80 \times \varphi_{VIS_{emis}} \times \frac{S_{fil}}{S_{calHot}} \quad \text{(A IX-12)}$$

$$\varphi_{IR_{hotspot}} = 0,80 \times \varphi_{IR_{emis}} \times \frac{S_{lampe}}{S_{calHot}} \quad \text{(A IX-13)}$$

$$\varphi_{VIS_{couronne}} = 0,20 \times \varphi_{VIS_{emis}} \times \frac{S_{fil}}{S_{calCour}} \quad \text{(A IX-14)}$$

$$\varphi_{IR_{couronne}} = 0,20 \times \varphi_{IR_{emis}} \times \frac{S_{lampe}}{S_{calCour}} \quad \text{(A IX-15)}$$

Finalement, les flux visibles et infrarouges reçus au hotspot et à la couronne sont calculés à l'aide des équations (A IX-12), (A IX-13), (A IX-14) et (A IX-15), ce qui donne les valeurs suivantes :

$$\varphi_{VIS_{hotspot}} = 1823 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$\varphi_{IR_{hotspot}} = 626 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$\varphi_{VIS_{couronne}} = 164 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$\varphi_{IR_{couronne}} = 56 \text{ W.m}^{-2}$$

ANNEXE X

COMPLÉMENTS D'ESTIMATION EXPÉRIMENTALE DU FLUX INFRAROUGE REÇU AU « HOTSPOT »

Cette annexe est dédiée aux compléments d'analyse réalisés pour l'évaluation du flux infrarouge reçu au hotspot à l'aide d'un capteur de flux qui n'avaient pas été présentés à la section 4.2.3.

Les flux en surface (F2) mesurés par le Capteur 2 pour chaque essai sont superposés à la Figure-A X-1.a. Sur cette figure, l'acronyme SP réfère à la configuration sans pâte thermique, tandis que AP réfère à la configuration avec pâte thermique. La forme générale des courbes est la même pour tous les essais. La durée de l'expérience varie en fonction de l'échantillon sur lequel est posé le capteur, la stabilisation est plus rapide pour les essais utilisant l'isolant seul comme échantillon. Le flux capté en surface est plus important lorsque le Capteur 2 est placé sur l'échantillon blanc que sur l'isolant seul et plus encore que sur l'échantillon noir.

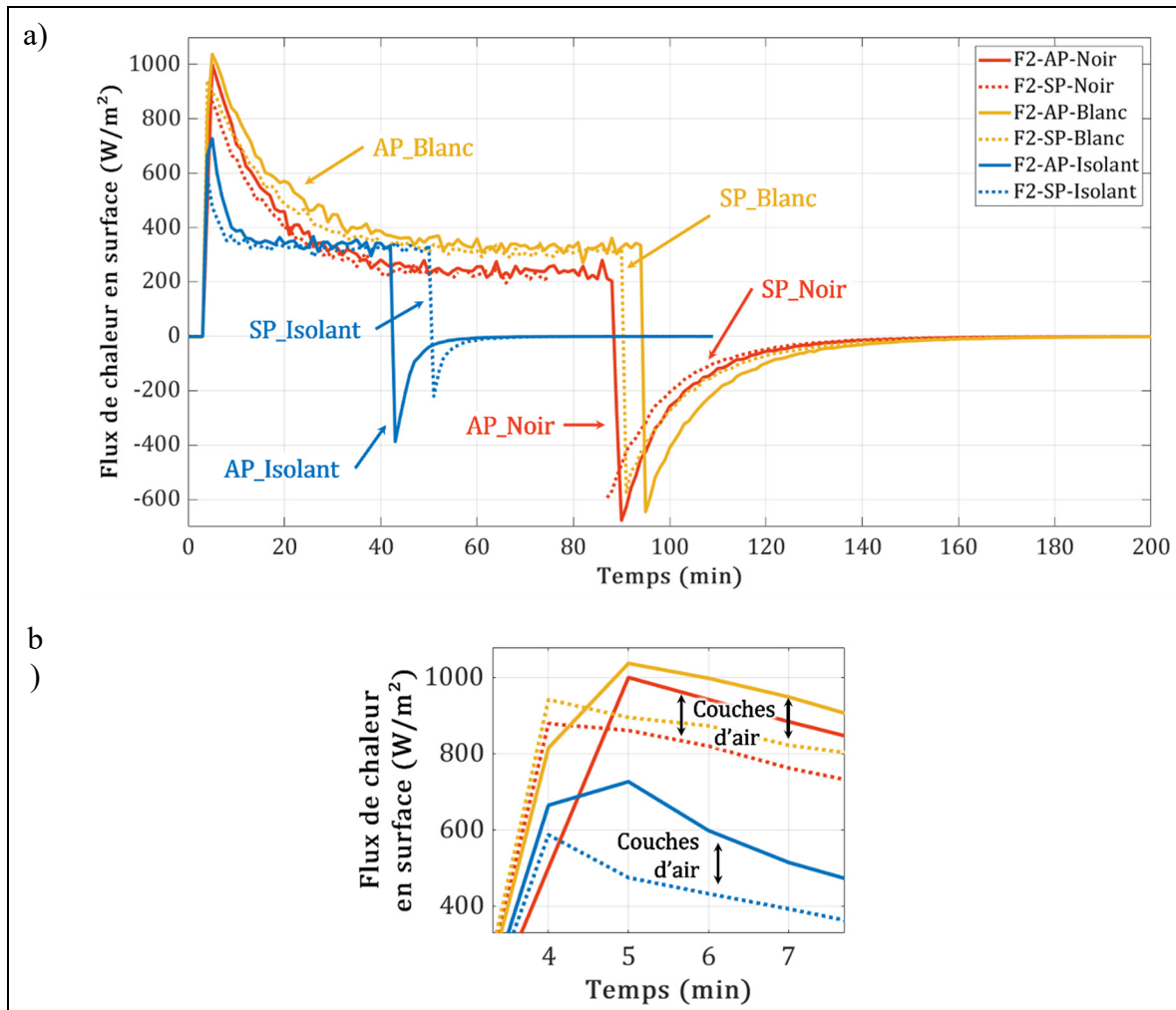


Figure-A X-1 a) Superposition des flux mesurés en surface pour chaque essai ; b) zoom sur le pic initial et mise en évidence de l'effet de l'ajout de pâte thermique

À la Figure-A X-1.b l'influence de l'application de pâte thermique est observée : les essais sans pâtes thermiques (en pointillés) présentent des valeurs de flux inférieures aux essais avec pâte thermique. En effet, l'absence de pâte thermique laisse place à une fine couche d'air sous le capteur de surface, agissant comme résistance de contact. Pour récupérer le flux émis par la lampe à partir des données des capteurs de flux, il est nécessaire de réaliser le bilan des flux à chaque capteur et selon les deux configurations, comme montré à la Figure-A X-2.

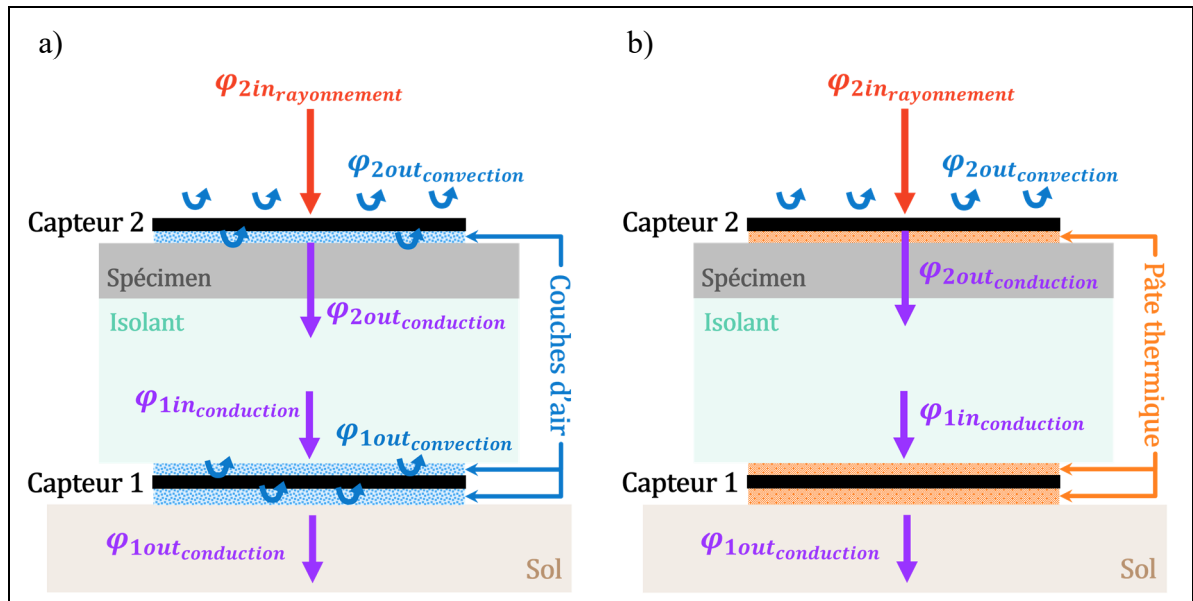


Figure-A X-2 Bilan des flux pour les deux configurations :
 a) sans pâte thermique ; b) avec pâte thermique

Le flux mesuré au Capteur 2 (F_2) est la somme de tous les flux à sa surface. Le flux recherché est le rayonnement émis par la lampe, nommé $\varphi_{2in_rayonnement}$ à la Figure-A X-2. Cependant, dans la configuration sans pâte thermique, la présence d'air complexifie les échanges thermiques (voir les flèches bleues à la Figure-A X-2) par rapport à la configuration avec pâte thermique. Alors, pour extraire le flux de rayonnement issu de la lampe, seuls les essais avec pâte thermique ont finalement été considérés. Toutefois, les essais sans pâte thermique ont permis une forme de répétabilité des essais en montrant que les flux mesurés sur un échantillon sont du même ordre de grandeur et évoluent de manière similaire avec et sans pâte thermique (voir Figure-A X-1). Ainsi, dans la configuration avec pâte thermique, le bilan des flux s'écrit :

$$F_2 = \varphi_{2in_rayonnement} + \varphi_{2out_convection} + \varphi_{2out_conduction} \quad (\text{A X-1})$$

Dans cette configuration, le flux de convection $\varphi_{2out_convection}$ est négatif (il arrache de l'énergie thermique à la surface) et peut être estimé à chaque instant en utilisant la méthode détaillée à la section A-VIII.1. En effet, la température de la surface (T_2) et la température de

l'air ambiant proche de la surface ($T_{TC.4}$) ont été enregistrées (voir Figure 4.4) ce qui a permis d'estimer le coefficient de convection h au cours de l'expérience. Toujours en présence de pâte thermique, le flux de conduction $\varphi_{2out_{conduction}}$ est assimilé au flux mesuré par le Capteur 1 (F1), mais avec un signe négatif (l'énergie thermique est évacuée du Capteur 2 par conduction). Ceci est un postulat qui s'appuie sur la conservation du flux en régime permanent (Jannot & Moyne, 2016). Alors, le flux rayonné par la lampe mesuré par le Capteur 2 a été extrait du bilan des flux suivant l'équation (A X-2) :

$$\varphi_{2in_{rayonnement}} = F2 + F1 + h(T2 - T_{TC.4}) \quad (\text{A X-2})$$

Ce flux a alors été calculé en fonction du temps pour tous les essais menés avec de la pâte thermique. Les résultats sont présentés à la Figure-A X-3 où F_{lampe} correspond au flux de rayonnement reçu par le Capteur 2 en $W \cdot m^{-2}$, qui était noté $\varphi_{2in_{rayonnement}}$ précédemment.

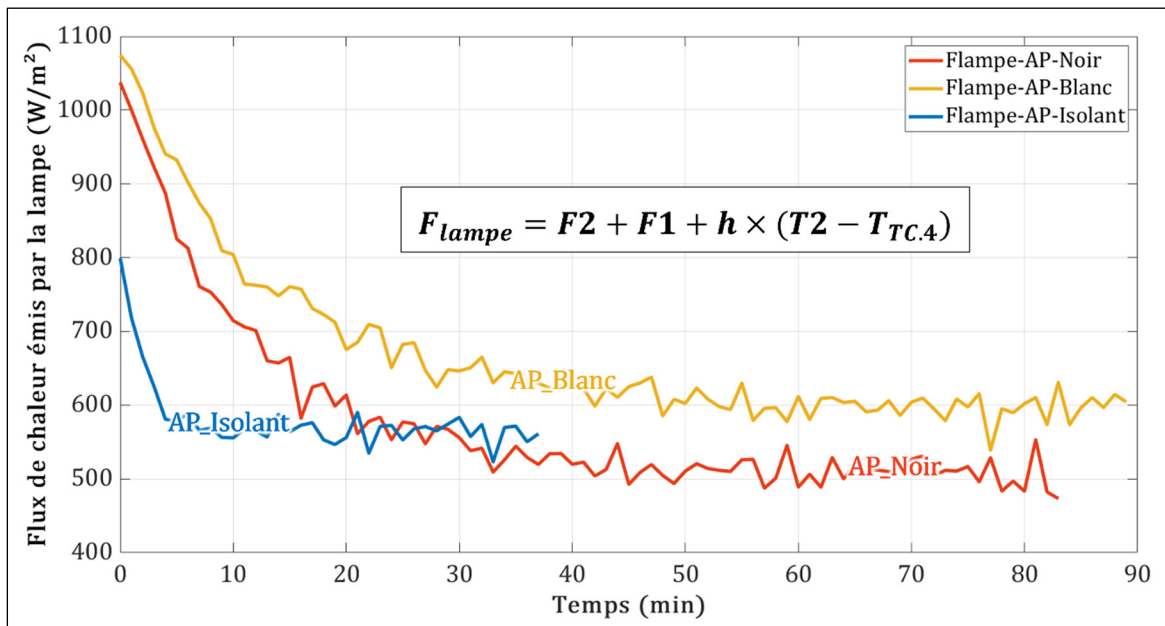


Figure-A X-3 Estimation du flux émis par la lampe au cours des différents essais avec pâte thermique

La Figure-A X-3 montre que le flux de rayonnement estimé par le calcul (voir équation (A X-2)) n'est pas le même selon l'essai. Cela ne devrait pas être le cas, puisque la lampe rayonne toujours de la même façon, peu importe ce qui est placé en dessous. Il y a donc une variable non identifiée qui n'a pas été prise en compte dans ce calcul. Néanmoins, celle-ci n'a pas été investiguée. À la place, les trois résultats ont été utilisés pour produire un flux reçu moyen. Pour réaliser la moyenne pondérée des trois flux, il a été nécessaire d'ajouter les acquisitions manquantes au flux estimé pour l'isolant (voir courbe bleue de la Figure-A X-4), de manière à avoir trois évolutions du flux de la lampe ayant le même nombre d'acquisitions. La moyenne pondérée des trois flux est la courbe noire à la Figure-A X-4. Par ailleurs, il est plus simple de donner une valeur constante au flux de rayonnement pour la simulation numérique. Alors, la valeur donnée au flux de rayonnement infrarouge reçu à la surface de l'échantillon est la moyenne sur le temps du flux moyen estimé et vaut $608 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, comme montré à la Figure-A X-4.

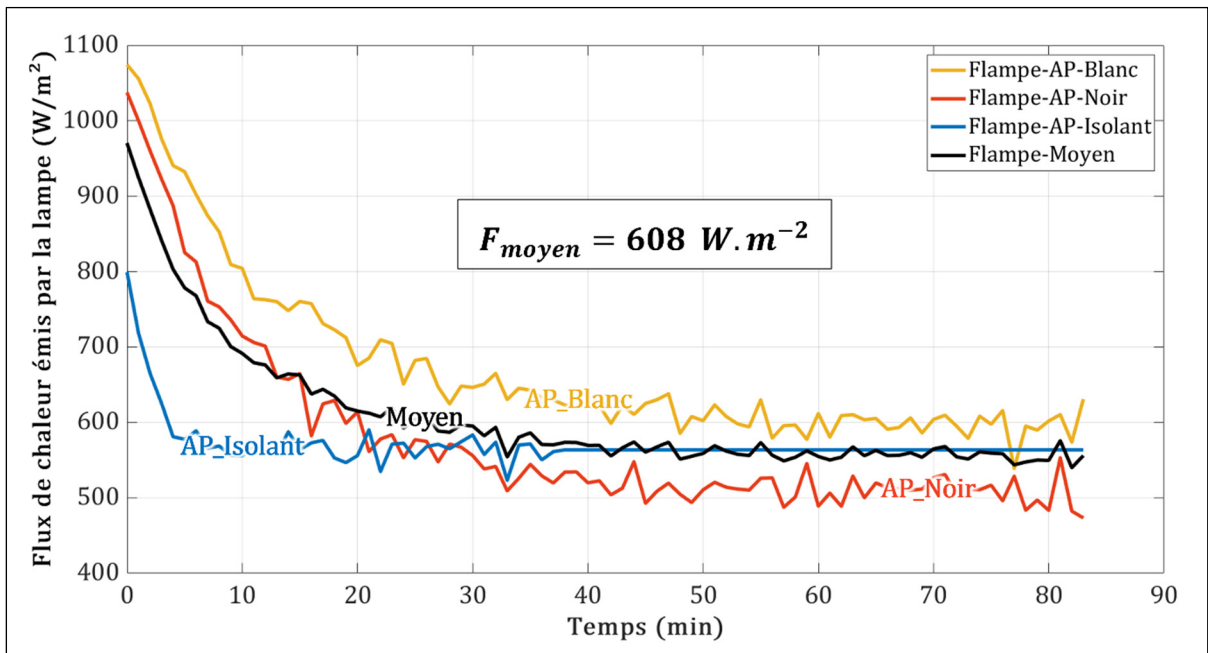


Figure-A X-4 Calcul du flux moyen émis par la lampe sur la durée totale de la phase de chauffe

La méthode expérimentale a permis d'estimer le flux infrarouge au hotspot (halo central), mais pas à la couronne. En reprenant le raisonnement de la méthode théorique (voir l'ANNEXE IX), le flux estimé à l'aide de la méthode correspondante correspond à 80 % du flux incident total. Les 20 % restants sont reçus à la couronne. Alors, pour déterminer le flux infrarouge reçu sur la couronne à partir de la valeur expérimentale estimée, la formule (A X-3) est utilisée.

$$\varphi_{I\text{Exp}_{\text{Cour}}} = \frac{0,20}{0,80} \times \varphi_{I\text{Exp}_{\text{Hot}}} \times \frac{S_{\text{calHot}}}{S_{\text{calCour}}} = 54 \text{ W.m}^{-2} \quad (\text{A X-3})$$

ANNEXE XI

CODE FLEXPDE POUR LA SIMULATION NUMÉRIQUE DE LA MÉTHODE PROPOSÉE

Algorithme A XI-1 Code utilisé dans le logiciel FlexPDE pour simuler les essais réalisés lors des expériences sur les différents échantillons

1	TITLE 'Simulation méthode d'évaluation des performances radiatives et isolantes de matériaux destinés aux parements extérieurs de bâtiments (EPRIMDPEB) – V7'	
2	COORDINATES cartesian2("x","y")	! coordonnées cartésiennes en 2D
3	VARIABLES u	! u est la température en K en tout point à tout instant u(x,y,t)
4	DEFINITIONS	
5	T0=273.15+22	! Température ambiante en K (22 °C)
6	FluxVisHot=1823	! Flux visible au hotspot (W/m ²)
7	FluxIRHot=608	! Flux IR au hotspot (W/m ²)
8	FluxVisCor=164	! Flux visible sur la couronne (W/m ²)
9	FluxIRCor=FluxIRHot/11.1	! Flux IR sur la couronne (W/m ²)
10	sigma=5.67e-8	! Constante de Stefan Boltzmann (W/m ² K ⁴)
11	h=7.9	! Coefficient de convection (W/m ² K)
12	L_dalle =0.20	! Longueur du composite (m)
13	L_iso=0.05	! Largeur d'isolant autour de l'échantillon (m)
14	e_dalle=0.006	! Épaisseur du composite dans l'échantillon (m)
15	e_peinture=0.0015	! Épaisseur de peinture sur l'échantillon (m)
16	e_iso=0.072	! Épaisseur de l'isolant (m)
17	tdc=180	! Instant du début de chauffe (s)
18	tfc=6000	! Instant de fin de chauffe (s)
19	tmax=12000	! Durée maximale de simulation (s)

20	r=1	! Initialisation de la réflectance solaire
21	k=1	! Initialisation de la conductivité thermique
22	Ro=1	! Initialisation de la masse volumique
23	Cp=1	! Initialisation de la chaleur spécifique
24	epsilon=0.905	! Émissivité thermique moyenne des échantillons
25	INITIAL VALUES u=T0	! Initialisation de la température en tout point $u(x,y,t=0)=T0$
16	MATERIALS	! Section des propriétés des échantillons
27	'Peinture noire' :	! Propriétés de la peinture noire
	k=0.1745	! Valeur moyenne toutes mesures (MTPS)
	Ro=1040	! Valeur prise de la fiche technique
	Cp=1330	! Valeur calculée (E,k,Ro)
	r=0.1570	! Valeur moyenne des 3 essais (spectro)
	'Dalle noire' :	! Propriétés du composite de l'échantillon
	k=0.2599	! MTPS
	Ro=931.9	! Valeur moyenne Pycnomètre
	Cp=1467	! Valeur calculée (E,k,Ro)
28	'Peinture Blanche' :	
	k=0.2577	
	Ro=1040	
	Cp=1275	
	r=0.8525	
	'Dalle Blanche' :	
	k=0.2596	
	Ro=931.9	
	Cp=1442	
29	'Peinture Transparente' :	
	k=0.2865	
	Ro=1040	

	<p>Cp=1283 r=0.2614</p> <p>'Dalle Transparente' :</p> <p>k=0.2629 Ro=931.9 Cp=1448</p>
30	<p>'Peinture BaSO4' :</p> <p>k=0.4489 Ro=1931 Cp=722 r=0.6417</p> <p>'Dalle BaSO4' :</p> <p>k=0.2842 Ro=931.9 Cp=1432</p>
31	<p>'Peinture TiO2' :</p> <p>k=0.3301 Ro=1189 Cp=1130 r=0.9164</p> <p>'Dalle TiO2' :</p> <p>k=0.1971 Ro=931.9 Cp=1502</p>
32	<p>'Peinture Gypse' :</p> <p>k=0.4962 Ro=1417 Cp=1002 r=0.2045</p> <p>'Dalle Gypse' :</p>

	$k=0.2304$ $R_o=931.9$ $C_p=1480$
33	'Peinture PRV1' : $k=0.3686$ $R_o=1172$ $C_p=1155$ $r=0.5960$ 'Dalle PRV1' : $k=0.2445$ $R_o=931.9$ $C_p=1455$
34	'Peinture PRV2' : $k=0.9311$ $R_o=1023$ $C_p=1645$ $r=0.5545$ 'Dalle PRV2' : $k=0.2062$ $R_o=931.9$ $C_p=1467$
35	'Peinture PVT' : $k=0.5407$ $R_o=1681$ $C_p=861$ $r=0.3409$ 'Dalle PVT' : $k=0.3802$ $R_o=931.9$ $C_p=1466$

36	'Isolant' : k=0.0306 Ro=10.00 Cp=3969	
37	EQUATIONS u : $\text{div}(-k*\text{grad}(u))=-\text{Ro}*Cp*\text{dt}(u)$! Équation de la chaleur 2D
38	BOUNDARIES	! Délimitation des régions
39	REGION 1 { Peinture }	! Région de la peinture
40	MESH_SPACING =0.001	! Les éléments finis sont espacés de 0.001 m
41	USE MATERIAL 'Peinture PRV2'	! Définition du matériau utilisé (à changer)
42	START(L_iso,e_iso-e_peinture)	! Point de départ pour la région
43	LINE TO (L_iso+L_dalle,e_iso- e_peinture)	! Interface parcourue
44	LINE TO (L_iso+L_dalle,e_iso)	! Côté droit encastré de la peinture
45	NATURAL(u)=-UPULSE(t-tdc, t- tfc)*((1-r)*FluxVisSpi + epsilon*FluxIRSpi) + h*(u-T0) + epsilon*sigma*(u^4-T0^4) LINE TO (L_iso+L_dalle-0.05,e_iso)	! Surface à droite exposée au halo « couronne » de la lampe (flux visible et IR) la convection et émettant un rayonnement
46	NATURAL(u)=-UPULSE(t-tdc, t- tfc)*((1-r)*FluxVisHot + epsilon*FluxIRHot) + h*(u-T0) + epsilon*sigma*(u^4-T0^4) LINE TO (L_iso+0.05,e_iso)	! Surface au centre exposée au halo « hotspot » de la lampe (flux visible et IR), la convection et émettant un rayonnement
47	NATURAL(u)=-UPULSE(t-tdc, t- tfc)*((1-r)*FluxVisSpi + epsilon*FluxIRSpi) + h*(u-T0) + epsilon*sigma*(u^4-T0^4) LINE TO (L_iso,e_iso)	! Surface à gauche exposée au halo « couronne » de la lampe (flux visible et IR), la convection et émettant
48	LINE TO CLOSE	! Côté gauche encastré de la peinture

49	REGION 2 { Dalle }	! Délimitation de la région composite
50	USE MATERIAL 'Dalle PRV2'	! Définition du matériau utilisé (à changer)
51	START (L_iso,e_iso-e_dalle-e_peinture)	! Point de départ
52	LINE TO (L_iso+L_dalle,e_iso- e_dalle-e_peinture)	! Face collée au polystyrène parcourue
53	LINE TO (L_iso+L_dalle,e_iso- e_peinture)	! Côté droit encastré du composite
54	LINE TO (L_iso, e_iso-e_peinture)	! Interface composite/peinture
55	LINE TO CLOSE	! Côté gauche encastré du composite
56	REGION 3 { Isolant }	! Délimitation de la région polystyrène
57	USE MATERIAL 'Isolant'	! Définition du matériau utilisé
58	START(0,0)	! Point de départ (origine du repère)
59	VALUE(u)=T0 LINE TO(2*L_iso+L_dalle,0)	! Face en contact avec le sol garde la température égale à T0
60	NATURAL(u)=h*(u-T0) LINE TO (2*L_iso+L_dalle,e_iso)	! Côté droit exposé à la convection
61	NATURAL(u)=h*(u-T0) LINE TO (L_iso+L_dalle,e_iso)	! Dessus droit exposé à la convection
62	LINE TO (L_iso+L_dalle,e_iso- e_dalle-e_peinture)	! Creux en contact avec le côté droit de l'échantillon
63	LINE TO (L_iso,e_iso-e_dalle- e_peinture)	! Fond du creux
64	LINE TO (L_iso,e_iso)	! Creux en contact avec le côté gauche de l'échantillon
65	NATURAL(u)=h*(u-T0) LINE TO (0,e_iso)	! Dessus gauche exposé à la convection
66	NATURAL(u)=h*(u-T0) LINE TO CLOSE	! Côté gauche exposé à la convection

67	TIME 0 TO tmax	! Durée de l'expérience
68	MONITORS	! Affichage des résultats
69	FOR t = 0 BY 30 TO tmax	! Pas de temps de 30 secondes
70	HISTORIES	! Courbes
71	HISTORY (u) AT (L_iso+L_dalle/2,e_iso) (L_iso+L_dalle/2,e_iso-e_peinture) (L_iso+L_dalle/2-0.01, e_iso-e_dalle- e_peinture) (L_iso+L_dalle/2-0.035, e_iso- e_dalle-e_peinture)	! Courbes aux points : SP.c, TC.a, TC.b, TC.c
72	export format "#t#r,#i" file = "Simulation_V7_PRV2.txt"	! Exportation des résultats en format texte
73	PLOTS for t=tfc CONTOUR (u) painted grid(X,Y) END	! Affichage de champ de température dans le système à l'instant de fin de chauffe

APPENDICE A

COMPRENDRE LES ÎLOTS DE CHALEUR URBAINS ET ADAPTER LES VILLES

Constance Leroy ^a, Éric Lachance-Tremblay ^a, Diego Ramirez Cardona ^a

^{1,2,3} Département de génie de la construction, École de Technologie Supérieure,
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada, H3C 1K3

Article publié dans « Via Bitume »,
Août 2022

A-A.1 Introduction

Un îlot de chaleur urbain (ICU) se définit en comparant les températures d'une zone rurale avec celles d'une zone urbaine à proximité. De manière générale, les températures en zone urbaine sont toujours plus élevées qu'en milieu rural. Toutefois, on parle d'un ICU lorsque la différence de température entre les deux zones s'accroît, surtout la nuit. Ce phénomène est notamment perceptible en période estivale et d'autant plus lors d'une canicule. Sur la base de l'impact des températures sur la surmortalité, au Québec, une vague de chaleur est définie par la succession d'au moins trois jours durant lesquels les températures minimales et maximales atteignent les seuils de 16-20°C et 31-33°C, respectivement et suivant la région (Poitras, 2018).

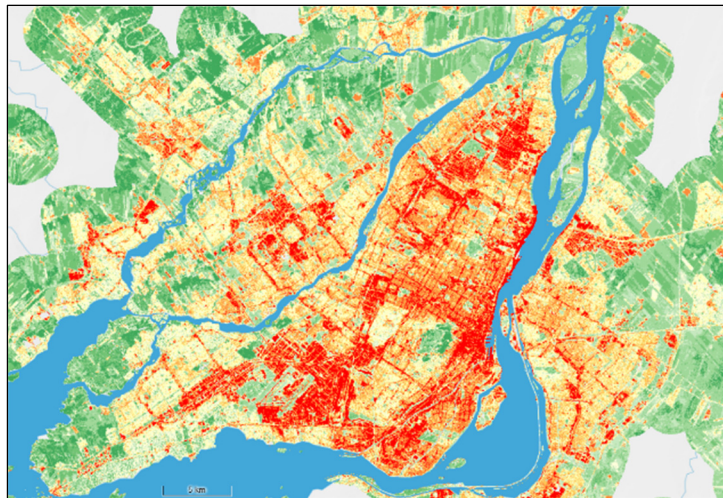


Figure-A A 1 Carte des températures de surface
à Montréal et ses alentours en 2012
Tirée de « IGO2 - Données Québec » (2012)

Conséquences

Les ICU nuisent à la santé des citoyens et sont la cause d'une hausse de la mortalité. La concentration de la chaleur en milieu urbain favorise l'apparition du stress thermique, défini comme l'incapacité du corps à réguler sa température, tout en diminuant la qualité de l'air et en augmentant l'apparition de smog (Rosenfeld et al., 1995). Cela concentre les risques aggravants pour les maladies pulmonaires, cardiovasculaires et chroniques préexistantes. Les personnes les plus touchées sont les jeunes enfants, les aînés, mais aussi les personnes défavorisées et les travailleurs en extérieur. Ce sont alors toutes ces personnes qui peuvent nécessiter des soins d'urgence. Les services et infrastructures médicaux doivent être prêts à les accueillir, ce qui n'a pas toujours été le cas dans le passé. Par exemple, les ICU ont été associés à la mort de 15 000 personnes en France lors de la canicule de l'été 2003 (Evin & d'Aubert, 2004). À la ville de Québec, en juillet 2010, une vague de chaleur a augmenté de 33 % le nombre de décès et de 4 % les admissions de patients aux services d'urgence, comparé aux périodes correspondantes de 2005 à 2009. (Bustinza et al., 2013).

Enjeux et objectifs

Avec les changements climatiques, ces épisodes caniculaires augmentent chaque année en fréquence et en intensité. Considérant l'impact de ces ICU sur nos milieux de vie, il convient de trouver des moyens pour adapter les milieux urbains afin de réduire l'intensité des ICU. Cet article se veut une introduction sur les paramètres en jeu dans les phénomènes d'ICU, ainsi qu'une présentation des pistes de solutions pour adapter nos villes.

A-A.2 Paramètres en jeu**Rayonnement solaire**

Le rayonnement solaire est perçu comme la diffusion de lumière et de chaleur. La lumière que l'on perçoit est due à la partie visible du spectre solaire, pour des longueurs d'ondes de 400 à 700 nm. La sensation de chaleur est due à la partie infrarouge (IR) du spectre solaire, au-delà des 800 nm. La partie du spectre responsable des coups de soleil correspond aux Ultra-violets, en dessous des 400 nm, comme présenté à la Figure-A A 2. Même s'il est difficile d'établir avec certitude la proportion exacte de chaque type de rayonnement par rapport au spectre solaire, on peut établir que, en moyenne, le rayonnement solaire est composé de 5 % d'UV, 42 % de visible et 52 % d'IR (EPA, 2008a).

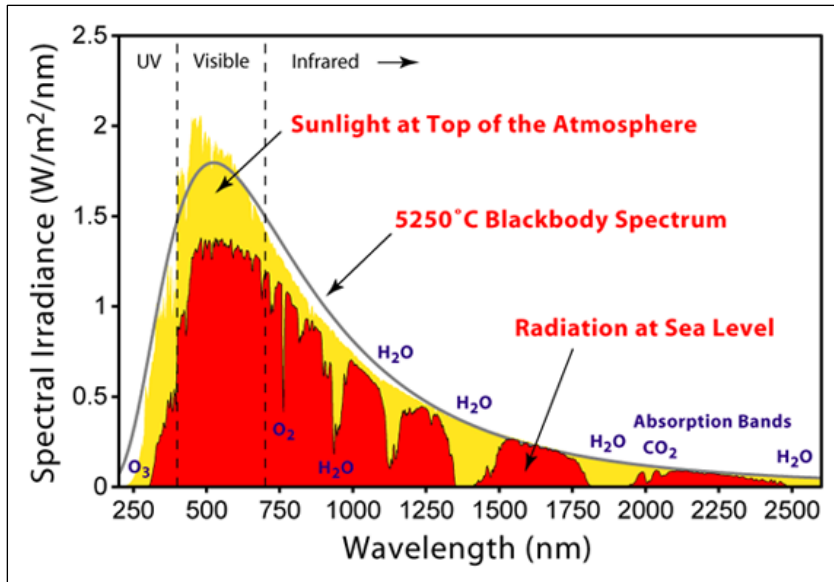


Figure-A A 2 Irradiance solaire spectrale perçue à la surface de l'atmosphère et au niveau de la mer, comparée avec le spectre d'un noir parfait à 5250 °C
Tirée de Rohde (2011), CC BY-SA 3.0

Les surfaces atteintes par le rayonnement solaire ne le redirigent pas toutes de la même manière comme présenté à la Figure-A A 3. En effet, une surface sombre absorbe une grande partie du rayonnement incident, tandis qu'une surface claire en réfléchit une grande partie. Ainsi, les matériaux sombres emmagasinent plus de chaleur que les matériaux clairs lorsqu'ils sont éclairés par le même rayonnement.

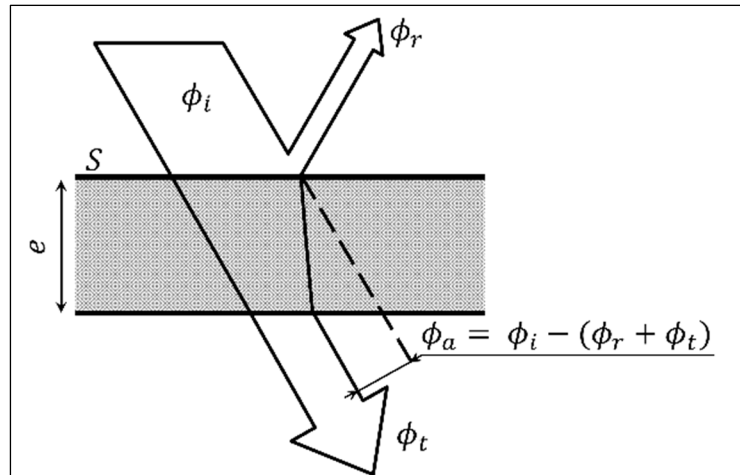


Figure-A A 3 Représentation de la réflexion, l'absorption et la transmission d'un rayon incident sur la surface S d'un matériau d'épaisseur e. Les capacités à réfléchir, absorber et transmettre sont propres au matériau
Adapté de Lavigne et al. (1994)

En ville, de nombreuses surfaces sont sombres : les toits, les routes, les stationnements, etc. Ce sont autant de surfaces qui stockent la chaleur durant la journée (voir les flèches jaunes à la Figure-A A 4.a) et la relarguent la nuit (voir les flèches rouges à la Figure-A A 4.b), alimentant alors le phénomène d'ICU.

Convection

Une surface chaude cède de l'énergie thermique à l'air ambiant. L'air ainsi chauffé, monte et échange sa place avec de l'air plus frais, qui récupère à son tour la chaleur de la surface chaude. C'est la convection. Cette convection est d'autant plus efficace si le système est alimenté en grande quantité par de l'air frais. Or, ce n'est pas le cas des ruelles étroites entourées de hauts bâtiments où l'air est coincé. Si le vent n'est pas assez fort pour évacuer les masses d'air chaud vers la couche atmosphérique basse, alors la chaleur stockée par la ville durant la journée y reste piégée la nuit (voir les vagues rouges à la Figure-A A 4.b).

Activités anthropiques

Une zone urbaine, en plus d'emmagasiner l'énergie thermique du Soleil, produit sa propre chaleur par les biais des activités humaines. L'industrie, le trafic routier et la climatisation font partie des sources de chaleur anthropique dont la concentration est plus importante en zone urbaine qu'en zone rurale. Par ailleurs, c'est surtout lors d'une vague de chaleur que la climatisation est utilisée, ce qui alimente l'ICU, car elle a pour principe de transférer la chaleur de l'intérieur des bâtiments vers l'extérieur. De plus, la climatisation nécessite une alimentation électrique dont la production peut elle-même être une source de chaleur, selon la technologie utilisée. La climatisation étant coûteuse, elle n'est pas utilisée par les foyers défavorisés qui sont alors en proie à un plus grand stress thermique.

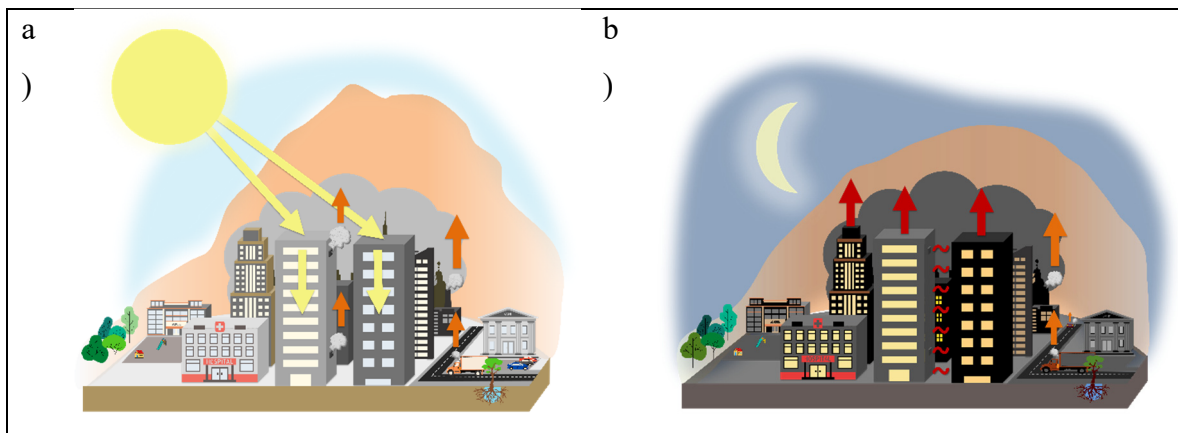


Figure-A A 4 Illustration des sources de chaleur et des échanges thermiques dans une zone urbaine durant a) le jour ; b) la nuit

Eau

Il va sans dire que les journées pluvieuses rafraîchissent les milieux urbains, en comparaison avec les journées ensoleillées. Cela est causé par les échanges thermiques entre l'eau et les surfaces de la ville. Au contact d'une surface chaude, l'eau absorbe de la chaleur par conduction et sa température augmente jusqu'à changer d'état. Pour s'évaporer, l'eau liquide absorbe une chaleur dite sensible qui augmente sa température jusqu'à un certain seuil, puis continue d'absorber la chaleur dite latente qui lui permet de passer à l'état gazeux. Le processus de relargage de la chaleur des surfaces est plus rapide au contact de l'eau qu'au contact de l'air,

sans compter qu'en jour de pluie, les nuages réfléchissent une partie du rayonnement solaire vers l'atmosphère, l'empêchant alors d'atteindre la zone urbaine.

Modèle TEB

Pour évaluer les phénomènes d'ICU, ce sont donc tous ces échanges thermiques qu'il faut prendre en compte. Certains modèles numériques permettent de prédire l'évolution des températures d'une ville et ses environs, comme le modèle « Town Energy Balance » (TEB), représenté à la Figure-A A 5. À l'aide de modèle numérique de ce type, il est possible d'évaluer l'impact des modifications faites au milieu urbain sur l'intensité des ICU.

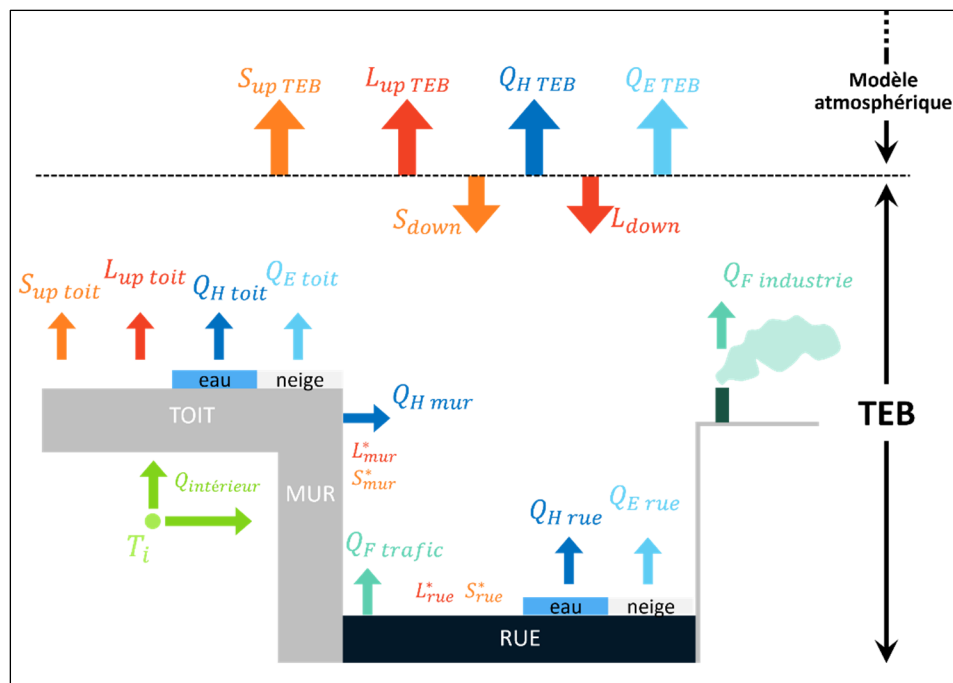


Figure-A A 5 Schématisation des flux thermiques pris en compte par le modèle TEB. S et L sont respectivement les rayonnements de courtes et grandes longueurs d'ondes, dans le sens ascendant (up) ou descendant (down). QH, QE et QF sont respectivement les flux de chaleur sensible, latente et anthropique
Adapté de Lemonsu (2012)

A-A.3 Adaptations

La compréhension des mécanismes influençant les ICU permet d'identifier différents leviers d'action dans le but de rendre les zones urbaines résilientes face aux épisodes de chaleur extrême. Il existe plusieurs moyens pour adapter ces zones. Ceux présentés dans cet article peuvent et devraient être combinés pour assurer une protection efficace des zones urbaines à la chaleur.

Végétalisation et perméabilisation

L'une des différences majeures entre une zone urbaine et une zone rurale est la quantité de végétation. La canopée urbaine, ou la surface recouverte de végétation dans une zone urbaine, participe à la réflexion du rayonnement solaire, en plus de fournir de l'ombre. Il est connu que la végétation se nourrit du rayonnement solaire pour créer ses nutriments, c'est la photosynthèse. Alors, contrairement aux matériaux de construction, la chaleur absorbée par un plant ne sera pas relarguée. De plus, un plant intercepte, grâce à ses racines, l'eau souterraine pour irriguer ses feuilles qui vont en transpirer une partie. Cette eau transpirée s'évapore dans l'air ambiant, c'est l'évapotranspiration, ce qui participe au rafraîchissement de l'air. Toutefois, pour que ce système fonctionne, le sol doit pouvoir être alimenté en eau, autrement dit, il doit être perméable.

Végétaliser les zones urbaines est un moyen efficace de réduire les ICU, sans compter l'approvisionnement en habitats pour la biodiversité. Cela peut se faire sur les toits, les stationnements, les trottoirs, les voies réservées aux transports en commun, sur les séparateurs de voies, entre autres. La perméabilisation des sols peut être réalisée, par exemple, en privilégiant des trottoirs pavés à joint perméable ou en remplaçant l'enrobé bitumineux des cours d'école par des couverts sablés, gazonnés, etc.

Réfléchissement

Un autre moyen efficace pour diminuer le phénomène d'ICU est d'empêcher le stockage de la chaleur dans les matériaux de construction, en augmentant leur capacité à réfléchir le rayonnement incident. Il s'agit donc d'augmenter l'albédo de la zone urbaine. Cela concerne tous les parements extérieurs des bâtiments, mais aussi les surfaces au sol : routes,

stationnements, etc. La solution de simplicité est de recouvrir les matériaux existants à l'aide d'un enduit ou d'une peinture dits « cool » pour augmenter la réflectance des surfaces dans les spectres visible et IR. Cependant, ces revêtements sont souvent blancs ce qui n'est pas applicable aux surfaces qui se doivent d'être non-éblouissantes comme les routes. Il existe des solutions adaptées pour les chaussées comme les revêtements bitumineux colorés (voir Figure-A A 6.a). Par exemple, dans un contexte ensoleillé et à une température ambiante de 27 °C, des revêtements rouge et blanc ont respectivement une température inférieure de 3,1 °C et 6,2 °C par rapport à un enrobé noir traditionnel (St-Jacques & Brosseau, 2021).

Les efforts de traitement des surfaces pour augmenter l'albédo de la zone urbaine doivent s'accompagner d'efforts d'isolation des bâtiments pour limiter l'utilisation de la climatisation en été et du chauffage en hiver.

Réglementations locales

L'aménagement du territoire peut aussi être un moyen de réduire la production de chaleur anthropique, par exemple en favorisant les espaces dédiés aux modes doux (vélos, piétons) ou aux transports en communs, plutôt qu'aux voitures. Cependant, ces leviers d'urbanisme ne peuvent être actionnés sans l'aide des gouvernances locales. En effet, des programmes de recherche et des investissements sont nécessaires pour motiver et coordonner l'aménagement urbain en faveur de la végétalisation, l'augmentation de l'albédo, l'isolation et la réduction de la chaleur anthropique. Ces gouvernances ont aussi le rôle d'adapter les services médicaux en prévention des risques sanitaires, mais aussi de sensibiliser la population aux gestes à adopter en contexte de chaleur extrême.

A-A.4 La ville fraîche

Les villes de demain, où il est possible de vivre agréablement en période de canicule sans que la chaleur ne soit accrue par les ICU, pourraient ressembler à celle représentée dans la Figure-A A 6.a). Le jour, ces villes protégeraient leurs habitants du rayonnement direct en apportant plus d'ombrage, mais surtout, elles permettraient à la nuit de refroidir l'air ambiant, comme schématisé à la Figure-A A 6.b), à comparer avec la Figure-A A 6.b). Le rôle rafraîchissant de la nuit est crucial pour éviter l'accumulation de chaleur plusieurs jours durant.

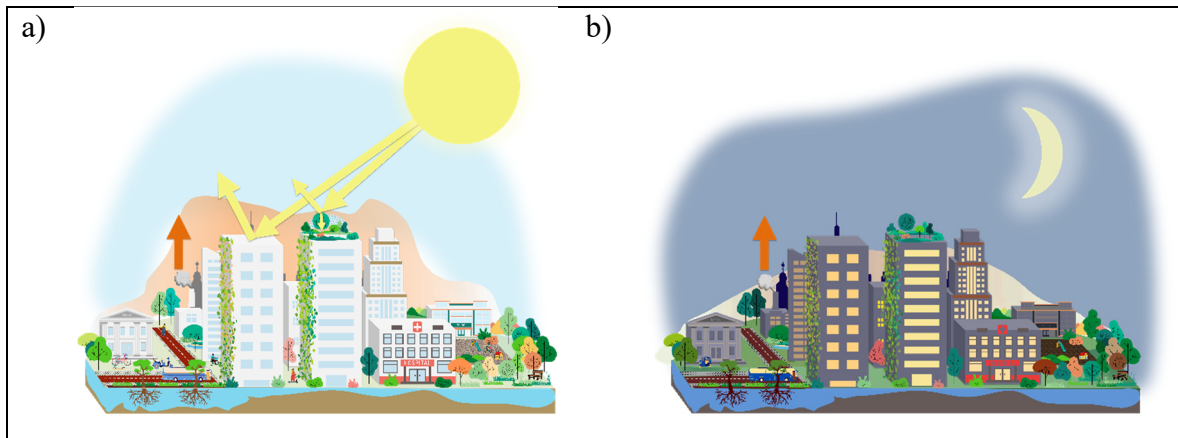


Figure-A A 6 Illustration des sources de chaleur et des échanges thermiques dans la zone urbaine de demain durant a) le jour ; b) la nuit. Les surfaces blanches ou « cools », la végétation, les sols perméables et la diminution de la chaleur anthropiques sont les changements apportés à la configuration actuelle (Figure-A A 4)

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Akbari, H, Pomerantz, M., & Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 70(3), 295-310. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00089-X)
- Akbari, Hashem, Levinson, R., & Rainer, L. (2005). Monitoring the energy-use effects of cool roofs on California commercial buildings. *Energy and Buildings*, 37(10), 1007-1016. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.11.013>
- Allen, L., Lindberg, F., & Grimmond, C. S. B. (2011). Global to city scale urban anthropogenic heat flux: model and variability. *International Journal of Climatology*, 31(13), 1990-2005. <https://doi.org/10.1002/joc.2210>
- Anand, J., Sailor, D. J., & Baniassadi, A. (2021). The relative role of solar reflectance and thermal emittance for passive daytime radiative cooling technologies applied to rooftops. *Sustainable Cities and Society*, 65, 102612. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102612>
- ASHRAE. (2021). Heat transfer. Dans *2021 ASHRAE® Handbook - Fundamentals* (I-P Edition). (S.I.) : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE). Repéré à https://app.knovel.com/web/view/khtml/show.v/rcid:kpASHRAEZ2/cid:kt012MF9E3/viewerType:khtml/root_slug:44-thermal-convection/url_slug:thermal-convection?b-toc-cid=kpASHRAEZ2&b-toc-title=2021%20ASHRAE%20AE%20Handbook%20-%20Fundamentals%20%28I-P%20Edition%29&b-toc-url-slug=thermal-convection&hierarchy=kt012MF8J6&view=collapsed&zoom=1&page=19
- ASTM C1371. (2022). Repéré à <https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CC1371-15R22%7Cen-US>
- ASTM D4892. (2019). Repéré à <https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CD4892-14R19E01%7Cen-US>
- ASTM D5965. (2019). Repéré à <https://compass.astm.org/document/?contentcode=ASTM%7CD5965-19%7Cen-US>
- ASTM D7984. (2021). Repéré à <https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CD7984-21%7Cen-US>

- ASTM E772-21. (2021). Repéré à <https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CE0772-15R21%7Cen-US>
- ASTM E903. (2020). Repéré à <https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CE0903-20%7Cen-US>
- ASTM E1269. (2018). *ASTM*. Repéré à <https://www.astm.org/e1269-11r18.html>
- ASTM E1918-21. (2021). *ASTM*. Repéré à <https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CE1918-21%7Cen-US>
- ASTM G173. (2023). Repéré à <https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CG0173-23%7Cen-US>
- Benallou, A. (2018). *Transferts d'énergie par rayonnement*. (S.l.) : ISTE Group. (Google-Books-ID: sG10DwAAQBAJ).
- Berdahl, P., & Bretz, S. E. (1997). Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials. *Energy and Buildings*, 25(2), 149-158. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)01004-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)01004-3)
- Bernstein, J. (2022, 13 juillet). Étouffer en ville. *CBC News*. Repéré à <https://newsinteractives.cbc.ca/features/2022/ilots-chaleur-urbains/>
- Boeters, R., Donkers, S., Lee, D., Liem, V., Montazeri, S., van Oostveen, J., & Pietrzyk, P. (2012). *The effect of 3D geometry complexity on simulating radiative, conductive and convective fluxes in an urban canyon*. (S.l.) : (s.n.).
- Bretz, S. E., & Akbari, H. (1997). Long-term performance of high-albedo roof coatings. *Energy and Buildings*, 25(2), 159-167. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)01005-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)01005-5)
- Brook, J., Booth, G., Brauer, M., Fuller, D., Kestens, Y., Rosella, L., ... Villeneuve, P. (2023). HealthyPlan. *HEalthyPlan.City*. [Cartographie des donnée socio-économiques et climatiques locales]. Repéré à <https://healthyplan.city/fr>
- Bustinza, R., Lebel, G., Gosselin, P., Bélanger, D., & Chebana, F. (2013). Health impacts of the July 2010 heat wave in Québec, Canada. *BMC Public Health*, 13(1), 56. <https://doi.org/10.1186/1471-2458-13-56>
- Canada & Santé Canada. (2020). *Réduire les îlots de chaleur urbains pour protéger la santé au Canada: introduction pour les professionnels de la santé publique*. (S.l.) : (s.n.). Repéré à https://epe.lac-bac.gc.ca/100/201/301/weekly_acquisitions_list-ef/2021/21-09/publications.gc.ca/collections/collection_2021/sc-hc/H144-60-2019-fra.pdf

- Casini, M. (2020). Insulation Materials for the Building Sector: A Review and Comparative Analysis. Dans S. Hashmi & I. A. Choudhury (Éds), *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials* (pp. 121-132). Oxford : Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.10682-4>
- CRRC. (2021, 4 novembre). Reducing Urban Heat with Cool Roofs and Solar-Reflective Walls. Cool Roof Rating Council. Repéré à https://coolroofs.org/documents/Reducing-Urban-Heat-Islands_2021-11-04.pdf
- C-Therm. (2020). TDS - Trident Thermal Conductivity Instrument. *C-Therm Technologies Ltd*. Repéré à <https://ctherm.com/thermal-conductivity-instruments/trident/>
- Davidson, M. W. (s.d.). Microscopy Online Campus | Tungsten-Halogen Lamps. *ZEISS*. Repéré à <https://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/articles/lightsources/tungstenhalogen.html>
- De Munck, C., Pigeon, G., Masson, V., Meunier, F., Bousquet, P., Tréméac, B., ... Marchadier, C. (2013). How much can air conditioning increase air temperatures for a city like Paris, France? *International Journal of Climatology*, 33(1), 210-227. <https://doi.org/10.1002/joc.3415>
- de Munck, C., Pigeon, G., Meunier, F.-E., Tréméac, B., Bousquet, P., Merchat, M., ... Marchadier, C. (2010). *Projet CLIM² - Climat urbain et climatisation* (Rapport No. Rapport Final). CNRM-GAME (CNRS/Météo France) ; LGP2ES (EA21), CNAM ; Climespace.
- Desplat, J., Doubelle, I., Françoise, Y., Gantois, M., Koukou-Arnaud, R., Meskel, E., ... Viguié, V. (2016, 12 décembre). Comment adapter le territoire parisien aux futures canicules. (C. Gruber, Éd.). Repéré à <https://www.apc-paris.com/publication/comment-adapter-territoire-parisien-futures-canicules-pistes-strategies-dadaptation>
- Droege, P. (Éd.). (2018). *Urban energy transition: renewable strategies for cities and regions* (Second edition). Amsterdam ; Cambridge, MA : Elsevier.
- Energie Plus. (2007, 25 septembre). Inertie thermique. *Energie Plus*. Repéré à <https://energieplus-lesite.be/theories/enveloppe9/autres-phenomenes-thermiques/inertie-thermique/>
- EPA. (2008a). Cool Roofs. Dans *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies* (U.S. Environmental Protection Agency). (S.l.) : (s.n.). Repéré à <https://www.epa.gov/heatislands/heat-island-compendium>
- EPA. (2008b). Heat Island Reduction Activities. Dans *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies*. (S.l.) : U.S. Environmental Protection Agency. Repéré à <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium>.

- EPA. (2008c). Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies - Urban Heat Island Basics. Dans *U.S. Environmental Protection Agency, Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies* (Vol. Urban Heat Island Basics-Draft). (S.l.) : (s.n.).
- European Space Agency. (2013, 23 avril). ESA - Eduspace FR - Changement global - Les propriétés optiques de la glace et de la neige. European Space Agency. Repéré à https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_Global_FR/SEMLYHTWLUG_0.html
- Evans, P. (2015, 29 mars). Properties of Air at atmospheric pressure. *The Engineering Mindset*. Repéré à <https://theengineeringmindset.com/properties-of-air-at-atmospheric-pressure/>
- Evin, MM. C., & d'Aubert, F. (2004, février). N° 1455 - 01 - Rapport de la commission d'enquête sur les conséquences de la canicule (tome I). Repéré à https://www.assemblee-nationale.fr/12/rap-enq/r1455-t1.asp#P313_32750
- Favennec, P.-N. (2020). *Ondes électromagnétiques 1: Équations de Maxwell, propagation des ondes*. (S.l.) : ISTE Group. (Google-Books-ID: P64IEAAAQBAJ).
- Fitria, R., Kim, D., Baik, J., & Choi, M. (2019). Impact of Biophysical Mechanisms on Urban Heat Island Associated with Climate Variation and Urban Morphology. *Scientific Reports*, 9(1), 19503. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55847-8>
- GE Lighting. (2023). TDS GE CP77 230-240V. Repéré à http://www.farnell.com/grh?mpn=88449_GE_LIGHTING&CMP=os_pdf-datasheet
- Geandrot, J. (s.d.). Cours d'électrocinétique : cours 2 : condensateur et bobine. *Physagreg*. Repéré à <https://www.physagreg.fr/electrocinetique-2-condensateur-bobine.php>
- Giguère, M. (2009). *Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains*. Institut national de santé publique du Québec : Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels, Institut national de santé publique Québec. Repéré à <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/2007095>
- Gringer, P. R. (2018). Spectre visible. Dans *Wikipédia*. Repéré à https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Spectre_visible&oldid=193924966
- Hadavi, M., & Pasharshahri, H. (2021). Investigating effects of urban configuration and density on urban climate and building systems energy consumption. *Journal of Building Engineering*, 44, 102710. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102710>
- Hosseini, M., Tardy, F., & Lee, B. (2018). Cooling and heating energy performance of a building with a variety of roof designs; the effects of future weather data in a cold climate. *Journal of Building Engineering*, 17, 107-114. <https://doi.org/10.1016/j.job.2018.02.001>

- Howell, J. R., Mengüç, M. P., & Siegel, R. (2016). *Thermal radiation heat transfer* (Sixth edition). Boca Raton, Fla. London New York : CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Hwang, R.-L., Lin, T.-P., & Lin, F.-Y. (2020). Evaluation and mapping of building overheating risk and air conditioning use due to the urban heat island effect. *Journal of Building Engineering*, 32, 101726. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101726>
- IGO2 - Données Québec. (s.d.). Repéré à <https://geoegl.msp.gouv.qc.ca/igo2/apercu-qc/?context=inspq>
- ILO. (2004). Chapitre 46 - L'éclairage. Dans *Encyclopédie de sécurité et de santé au travail - 3e édition française*. Repéré à <https://www.ilocis.org/fr/documents/ilo046.htm>
- IPCC. (2023a). *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]*. IPCC, Geneva, Switzerland. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- IPCC. (2023b). *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Summary for Policymakers* (Rapport No. Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]). Geneva, Switzerland : Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Izard, J.-L. (2006, juillet). L'inertie thermique dans le bâtiment. Repéré à https://www.enviroboite.net/IMG/pdf/0607_Inertie_thermique_batiment_Izard_V1.pdf
- Jannot, Y. (2011, octobre). Théorie et pratique de la métrologie thermique. LEMTA. Repéré à <http://www.thermique55.com/principal/metrologiethermique.pdf>
- Jannot, Y., & Moyne, C. (2016). *Transferts thermiques: cours et 55 exercices corrigés*. Saint-Denis : Édilivre.
- Jenkins, R., Aldwell, B., Yin, S., Meyer, M., Robinson, A. J., & Lupoi, R. (2019). Energy efficiency of a quartz tungsten halogen lamp: Experimental and numerical approach. *Thermal Science and Engineering Progress*, 13, 100385. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.100385>
- Kartable. (2023). La dualité onde-corpuscule de la lumière. *Kartable*. [Cours en ligne, programme scolaire français]. Repéré à <https://www.kartable.fr/ressources/physique-chimie/cours/la-dualite-onde-corpuscule-de-la-lumiere/51303>

- Kierlik, J.-M. C., Édouard. (s.d.). Pourquoi le carrelage semble froid et le parquet chaud ? *Pourlascience.fr*. Pour la Science. Repéré à <https://www.pourlascience.fr/sr/idees-physique/https://www.pourlascience.fr/sr/idees-physique/pourquoi-le-carrelage-semble-froid-et-le-parquet-chaud-18747.php>
- Knighton, N., & Bugbee, B. (2005). A Mixture of Barium Sulfate and White Paint is a Low-Cost Substitute Reflectance Standard for Spectralon®, (Paper 11). Repéré à https://digitalcommons.usu.edu/cpl_techniquesinstruments/11
- Lavigne, P., Brejon, P., & Fernandez, P. (1994). *Architecture climatique: une contribution au développement durable*. La Calade, Aix-en-Provence : Edisud.
- Lemonsu, A. (2012). *EPICEA - Etude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à l'Echelle de l'Agglomération parisienne* (Rapport No. Rapport final). Paris, France : CNRM, CSTB, Météo-France. Repéré à <https://www.adaptation-changement-climatique.gouv.fr/centre-ressources/projets-recherche-onerc/epicea-etude-pluridisciplinaire-des-impacts-du-changement>
- Lévêque, T., Arer, L., & Berthelot, S. (2020). *Physique chimie, Tle, enseignement de spécialité: nouveau programme*. Paris : Belin éducation.
- Levinson, R., Berdahl, P., & Akbari, H. (2005a). Solar spectral optical properties of pigments—Part I: model for deriving scattering and absorption coefficients from transmittance and reflectance measurements. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 89(4), 319-349. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2004.11.012>
- Levinson, R., Berdahl, P., & Akbari, H. (2005b). Solar spectral optical properties of pigments—Part II: survey of common colorants. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 89(4), 351-389. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2004.11.013>
- Li, X., Peoples, J., Yao, P., & Ruan, X. (2021). Ultrawhite BaSO₄ Paints and Films for Remarkable Daytime Subambient Radiative Cooling. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(18), 21733-21739. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c02368>
- ME. (2011). Basics of non contact temperature measurement. Micro-Epsilon. Repéré à <https://www.micro-epsilon.com/download/products/dat--infrared-basics--en-us.pdf>
- Mills, G. M., & Stewart, I. D. (2021). *The urban heat island: a guidebook*. Amsterdam : Elsevier.
- Modest, M. F., & Mazumder, S. (2022). Chapter 1 - Fundamentals of Thermal Radiation. Dans *Radiative Heat Transfer* (Fourth Edition, pp. 1-29). (S.l.) : (s.n.).
- Morckel, V. (2015). Community gardens or vacant lots? Rethinking the attractiveness and seasonality of green land uses in distressed neighborhoods. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14(3), 714-721. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.07.001>

- Mounir, S. (2007). *ETUDE DE NOUVEAUX PROCÉDES DE FABRICATION DE POUDRES PAR INSERTION DE LA TECHNOLOGIE DE DETENTES INSTANTANÉE CONTRÔLÉE DIC, DANS LES PROCESSUS D'ATOMISATION, DE SECHAGE / TEXTURATION ET DE PULVERISATION CONTRÔLÉE SOUS VIDE DE PRODUITS LAITIERS.*
- Mourou, C., Zamorano, M., Ruiz, D. P., & Martín-Morales, M. (2022). Cool Surface Strategies with an Emphasis on the Materials Dimension: A Review. *Applied Sciences*, 12(4), 1893. <https://doi.org/10.3390/app12041893>
- Oke, T. R. (2006). *Boundary layer climates* (2nd ed). London : Routledge.
- Osman, N. (2022, 24 janvier). Know Your Lights Archives. *Neil Oseman*. Repéré à <https://neiloseman.com/category/know-your-lights/>
- Paljak, I., & Pettersson, B. (1972). *Termografering av byggnader: Thermography of buildings*. Stockholm : [Statens institut för byggnadsforskning]; Svensk byggtjänst (distr.).
- PDE Solutions Inc. (2022, 9 décembre). FlexPDE finite element model builder for Partial Differential Equations. Repéré à <https://www.pdesolutions.com/>
- Poitras, A. (2018). Les vagues de chaleur extrême au Québec - Données Climatiques Canada. Repéré à <https://donneesclimatiques.ca/etude-de-cas/les-vagues-de-chaleur-extreme-au-quebec/>
- Pratten, N. A. (1981). The precise measurement of the density of small samples. *Journal of Materials Science*, 16(7), 1737-1747. <https://doi.org/10.1007/BF00540619>
- Ritchie, H. (2021, 1 décembre). How have the world's energy sources changed over the last two centuries? *Our World in Data*. Repéré à <https://ourworldindata.org/global-energy-200-years>
- Ritchie, H., & Rosado, P. (2021, 17 décembre). Energy: Key Charts. *Our World in Data*. Repéré à <https://ourworldindata.org/energy-key-charts>
- Roberts, M., Irvine, K. N., & McVittie, A. (2021). Associations between greenspace and mental health prescription rates in urban areas. *Urban Forestry & Urban Greening*, 64, 127301. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127301>
- Rohde, R. A. (2011). *Spectre Solaire - Creative Commons : paternité et partage à l'identique*. Repéré à https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spectre_solaire.png?uselang=fr
- Rosati, A., Fedel, M., & Rossi, S. (2021). Laboratory scale characterization of cool roof paints: Comparison among different artificial radiation sources. *Progress in Organic Coatings*, 161, 106464. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106464>

- Rosenfeld, A. H., Akbari, H., Bretz, S., Fishman, B. L., Kurn, D. M., Sailor, D., & Taha, H. (1995). Mitigation of urban heat islands: materials, utility programs, updates. *Energy and Buildings*, 22(3), 255-265. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(95\)00927-P](https://doi.org/10.1016/0378-7788(95)00927-P)
- Ruuska, T., Vinha, J., & Kivioja, H. (2017). Measuring thermal conductivity and specific heat capacity values of inhomogeneous materials with a heat flow meter apparatus. *Journal of Building Engineering*, 9, 135-141. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.11.011>
- Santamouris, M. (2014). Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 103, 682-703. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>
- Santamouris, M., Synnefa, A., & Karlessi, T. (2011). Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy*, 85(12), 3085-3102. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.023>
- Sedaghat, A., Salem, H., Hussam, W. K., Mahdizadeh, A., Al-Khiami, M. I., Malayer, M. A., ... Khan, M. M. K. (2023). Exploring energy-efficient building solutions in hot regions: A study on bio-phase change materials and cool roof coatings. *Journal of Building Engineering*, 76, 107258. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107258>
- Shiab, N., & Bouchard, I. (2022, 13 juillet). Voici qui vit dans les pires îlots de chaleur de votre ville. *Radio-Canada.ca*. Radio-Canada.ca. Repéré à <https://ici.radio-canada.ca/info/2022/07/ilots-chaleur-ville-inegalites-injustice-changements-climatiques/>
- Simpson, J. R., & McPherson, E. G. (1997). The effects of roof albedo modification on cooling loads of scale model residences in Tucson, Arizona. *Energy and Buildings*, 25(2), 127-137. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)01002-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)01002-X)
- Singh, S. K., Yadav, M. K., & Khandekar, S. (2017). Measurement issues associated with surface mounting of thermopile heat flux sensors. *Applied Thermal Engineering*, 114, 1105-1113. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.076>
- St-Jacques, M., & Brosseau, Y. (2021). ÎLOTS DE CHALEUR ET INNOVATIONS ROUTIÈRES, 15, 26-32.
- Synnefa, A., Dandou, A., Santamouris, M., Tombrou, M., & Soulakellis, N. (2008). On the Use of Cool Materials as a Heat Island Mitigation Strategy. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(11), 2846-2856. <https://doi.org/10.1175/2008JAMC1830.1>
- Synnefa, A., Santamouris, M., & Apostolakis, K. (2007). On the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2006.08.005>

- Thermtest Inc. (2023). Materials Database - Thermal Properties -. *Thermtest*. Repéré à <https://thermtest.com/thermal-resources/materials-database>
- TigerhawkT3. (2023, 7 novembre). Beam Anatomy. Repéré à <https://www.tigerhawkT3.com/welcomemat/beamanatomy.htm>
- Touchaei, A. G., & Akbari, H. (2013). The climate effects of increasing the albedo of roofs in a cold region†. *Advances in Building Energy Research*, 7(2), 186-191. <https://doi.org/10.1080/17512549.2013.865558>
- Transmetra. (2017, 13 avril). emissivity_table.pdf. Repéré à https://www.transmetra.ch/images/transmetra_pdf/publikationen_literatur/pyrometrie-thermografie/emissivity_table.pdf
- Ulpiani, G. (2021). On the linkage between urban heat island and urban pollution island: Three-decade literature review towards a conceptual framework. *Science of The Total Environment*, 751, 141727. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141727>
- Van Herwaarden, A. W., & Sarro, P. M. (1986). Thermal sensors based on the seebeck effect. *Sensors and Actuators*, 10(3), 321-346. [https://doi.org/10.1016/0250-6874\(86\)80053-1](https://doi.org/10.1016/0250-6874(86)80053-1)
- Venkateshan, S. P. (2021). *Heat Transfer*. Cham : Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-58338-5>
- Verbeke, S., & Audenaert, A. (2018). Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2300-2318. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.083>
- Ville de Toronto. (2017, 17 novembre). Eco-Roof Incentive Program. *City of Toronto*. City of Toronto. Repéré à <https://www.toronto.ca/services-payments/water-environment/environmental-grants-incentives/green-your-roof/>
- Wald, L. (2018). Basics in Solar Radiation at Earth Surface. *MINES ParisTech, PSL Research University, O.I.E. – Observation, Impacts, Energy Center, Sophia Antipolis, France, Edition 1*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36149.93920>
- Wald, L. (2019, 6 juillet). BASICS IN SOLAR RADIATION AT EARTH SURFACE - REVISED VERSION #2. [Lecture Notes], MINES ParisTech, PSL Research University ; O.I.E. – Observation, Impacts, Energy Center ; Sophia Antipolis, France : Edition 1 from 2018-01-03 – Revised 2019-07-06. Repéré à <https://hal.science/hal-02175988>
- Westinghouse. (2014). TDS - 100 Watt T4 JC Halogen Clear GY8.6 Base, 120 Volt, Card. Repéré à <https://westinghouse.com/products/light-bulbs-halogen-bulbs-single-ended-100-watt-t4-jc-halogen-light-bulb-0471300.aspx>

- Wilk, J., Smusz, R., & Filip, R. (2023). Experimental investigations on thermal diffusivity of heterogeneous materials. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 144, 110868. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2023.110868>
- Yala, M. (2007). *Étude et réalisation de microcapteurs de flux thermique en technologie silicium*. These de doctorat. Lille 1. Repéré à <https://www.theses.fr/2007LIL10019>
- Zhao, L., Lee, X., Smith, R. B., & Oleson, K. (2014). Strong contributions of local background climate to urban heat islands. *Nature*, 511(7508), 216-219. <https://doi.org/10.1038/nature13462>

