

Conception et caractérisation de panneaux de refroidissement radiatifs pour application en contexte de ferme conteneur

par

Thomas VRIELYNCK

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

MONTRÉAL, LE 26 MAI 2026

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Thomas Vrielynck, 2026



Cette [licence Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0](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 créditer 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. Didier Haillot, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Stéphane Gibout, codirecteur de mémoire
Département de génie mécanique à l'Université de Pau et des Pays de l'Adour

M. Félix Faucher, président du jury
Département du design à l'École de technologie supérieure

M. Ricardo Izquierdo, membre du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

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

LE 23 AVRIL 2026

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Ce mémoire est l'aboutissement de plusieurs années de travail, de découvertes et de collaborations précieuses. Il symbolise non seulement la fin de mon parcours académique, mais aussi une aventure humaine qui a dépassé les frontières. Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à mes directeurs de recherche, Didier Haillot et Stéphane Gibout. Je vous remercie sincèrement pour la confiance que vous m'avez témoignée, pour votre grande disponibilité et pour la justesse de vos conseils. Votre accompagnement a été le moteur de la rigueur et de l'enthousiasme que j'ai mis dans ce projet de fin d'études.

Mes remerciements s'adressent également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils portent à mes travaux et pour le temps qu'ils consacrent à l'évaluation de ce mémoire.

Je tiens à saluer mes camarades de l'ENSAM et de l'ÉTS. Ce double cursus entre la France et le Québec a été d'une richesse immense ; ces deux institutions m'ont offert un cadre d'excellence et une ouverture internationale qui resteront les piliers de mon identité d'ingénieur. Une pensée particulière pour mes collègues du L3E et mes amis des Piranhas. Au-delà de la technique, vous avez été mon équilibre indispensable. Merci pour les échanges au labo, les moments de décompression et cette énergie collective qui rend les journées de recherche plus légères.

Enfin, je souhaite remercier du fond du cœur ma famille et mes proches. Merci à mes parents pour leur soutien indéfectible malgré la distance. Un immense merci à ma sœur, qui m'encourage chaque jour et me pousse sans cesse à donner le meilleur de moi-même.

Ce mémoire ferme un chapitre important pour laisser place à une suite que j'imagine déjà belle et radieuse. Rien de tout cela n'aurait été possible sans vous.

Conception et caractérisation de panneaux de refroidissement radiatifs pour application en contexte de ferme conteneur

Thomas VRIELYNCK

RÉSUMÉ

L'agriculture en fermes conteneurs (FC) fait face à d'importantes charges thermiques internes, notamment dues à l'éclairage. Pour limiter la surconsommation liée à la climatisation mécanique, ce mémoire évalue le potentiel du refroidissement radiatif (RSC) appliqué à ces structures.

L'objectif est de caractériser des matériaux hautement émissifs et de concevoir un système de refroidissement passif adapté au contexte des FC en vue d'une application concrètes sur un projet pilote à l'ÉTS. La méthodologie s'appuie d'abord sur la caractérisation optique et microscopique précise de divers revêtements. Ces données expérimentales ont ensuite alimenté un modèle numérique développé sous Python pour simuler les bilans thermiques du système intégré dans une ferme conteneur en conditions réelles, couplé avec un stockage thermique idéal.

L'analyse des résultats met en évidence l'impact déterminant de la sélectivité spectrale des matériaux sur la puissance de refroidissement nette. À partir de ces modélisations, les plans d'un prototype à l'échelle pilote ont été dimensionnés et conçus, en optimisant la géométrie et l'intégration technique des panneaux radiatifs sur l'enveloppe des conteneurs.

Ce mémoire évalue le potentiel thermique du RSC appliqué à l'agriculture en environnement contrôlé, et plus particulièrement aux FC. En structurant le passage de la caractérisation des matériaux à la modélisation, ce travail contribue au développement de stratégies de refroidissement passif visant à optimiser le bilan énergétique des FC.

Mots-clés : refroidissement radiatif, agriculture en environnement contrôlé, fermes conteneurs, efficacité énergétique, modélisation thermique

Design and characterization of radiative cooling panels for container farm application

Thomas VRIELYNCK

ABSTRACT

Container farming faces significant internal thermal loads, primarily due to artificial lighting. To mitigate the excessive energy consumption associated with mechanical cooling, this master thesis evaluates the potential of Radiative Sky Cooling (RSC) applied to these structures.

The objective is to characterize highly emissive materials and to design a passive cooling system suited to the context of Container Farms, with a view to concrete application on a pilot project at ÉTS. The methodology relies first on the precise optical and microscopic characterization of various coatings. These experimental data then fed into a numerical model developed in Python to simulate the thermal balances of the system integrated into a container farm under real-world conditions, coupled with ideal thermal energy storage.

The analysis of the results highlights the determining impact of the materials' spectral selectivity on the net cooling power. Based on these simulations, plans for a pilot-scale prototype were dimensioned and designed, optimizing both the geometry and the technical integration of the radiative panels onto the container's envelope.

This master thesis evaluates the thermal potential of RSC applied to Controlled Environment Agriculture (CEA), with a specific focus on container farms. By structuring the transition from material characterization to numerical modeling, this work contributes to the development of passive cooling strategies aimed at optimizing the energy balance of CFs.

Keywords: radiative sky cooling, controlled environment agriculture, container farms, energy efficiency, thermal modeling.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTERATURE	5
1.1 Stratégie d'étude bibliographique	5
1.1.1 Objectifs	5
1.1.2 Méthodologie	6
1.2 Analyse des charges et besoins thermiques des Fermes Conteneurs (FC)	8
1.2.1 Caractérisation thermique de l'enveloppe	8
1.2.1.1 Fenestration et ouvertures	9
1.2.2 Analyse du bilan thermique interne	10
1.2.3 Dynamique des besoins en déshumidification	12
1.2.4 Synthèse des besoins de management thermique des FC	13
1.3 Physique des transferts radiatifs et analyse de la ressource de refroidissement.....	14
1.3.1 Équations du bilan énergétique de surface	15
1.3.1.1 Puissance rayonnée	16
1.3.1.2 Puissance absorbée (Atmosphérique et Solaire).....	17
1.3.1.3 Pertes non radiatives	18
1.3.2 Propriétés de la fenêtre atmosphérique	18
1.3.3 Influence des facteurs climatiques locaux.....	20
1.4 État de l'art des émetteurs radiatifs: matériaux, technologies et caractérisations.....	22
1.4.1 Émetteurs sélectifs de haute précision	22
1.4.1.1 Structures multicouches (1D)	23
1.4.1.2 Métamatériaux Nanostructurés (2D/3D)	24
1.4.2 Matériaux à structures poreuses et particulières	26
1.4.2.1 Milieux poreux organisés et polymères	26
1.4.2.2 Solutions composites	26
1.4.3 Méthodes de caractérisation optique et thermique	27

1.4.3.1	Caractérisation spectrale	27
1.4.3.2	Évaluation des performances thermiques	28
1.5	État de l'Intégration du RSC aux AEC	30
1.5.1	État des applications en milieu AEC.....	30
1.5.2	Synthèse et identification de l'axe de recherche	32
CHAPITRE 2 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE ET CONTRIBUTION		
	ATTENDUE.....	35
2.1	Architecture de la recherche : la démarche en « V »	35
2.1.1	SO1 : Sélection des architectures d'émetteurs.....	35
2.1.2	SO2 : Caractérisation à l'échelle microscopique	37
2.1.3	SO3 : Déploiement à l'échelle pilote.....	37
2.2	Données d'entrée du modèle et du dimensionnement	38
2.3	Contribution attendue.....	39
CHAPITRE 3 PASSIVE RADIATIVE COOLING FOR CONTAINER FARMS:		
	PANEL DESIGN AND PERFORMANCE ASSESSMENT	41
3.1	Abstract.....	41
3.2	Introduction.....	42
3.3	Materials and methods	45
3.3.1	Radiative Sky Cooling: Fundamental Theory and Energy Balance.....	46
3.3.2	Design and Fabrication of RSC Emitters	47
3.3.2.1	Photonic Multilayer Sample Fabrication	49
3.3.2.2	Nanoporous AAO Sample Fabrication	49
3.3.2.3	Commercial Radiative Coating Sample Fabrication	49
3.3.3	Microstructural Analysis	50
3.3.3.1	Cross-sectional Metrology and Interface Integrity	51
3.3.3.2	Surface Topography and Chemical Mapping	51
3.3.4	Spectral Optical Characterization.....	51
3.3.4.1	Spectrophotometry and Reflectometry	52
3.3.4.2	Reflectance to Emissivity Conversion.....	53
3.3.5	Numerical Modeling and CEA Integration Framework.....	53
3.3.5.1	Intrinsic Performance and Active Decoupling Strategy	53
3.3.5.2	Dynamic System-Scale Integration and Energy Harvesting	54

3.4	Experimental results.....	55
3.4.1	Microscopic and Structural Characterization	55
3.4.1.1	Photonic Multilayer Sample	55
3.4.1.2	Nanoporous AAO	57
3.4.1.3	Commercial Radiative Coating.....	59
3.4.2	Spectral Characterization	60
3.4.2.1	UV-VIS-NIR Domain.....	60
3.4.2.2	FIR Domain	61
3.5	Case Study: Numerical Simulation of Cooling Potential for Container Farming.....	62
3.5.1	Transient System Modeling	62
3.5.2	Comparative Analysis of Cooling Potential.....	65
3.5.2.1	Steady-State Baseline and Active Decoupling	65
3.5.2.2	Integration Potential for a Container Farm in Montreal	69
3.5.3	Assessment of gap and limitations	71
3.6	Conclusions.....	72
CHAPITRE 4 DÉVELOPPEMENT EXPÉRIMENTAL ET INTÉGRATION PILOTE DU SYSTÈME RSC.....		
75		
4.1	Conception et réalisation du banc d'essai thermique extérieur	75
4.1.1	Design structurel	75
4.1.2	Instrumentation et chaîne d'acquisition	77
4.1.3	Système de contrôle et d'acquisition LabVIEW.....	79
4.2	Sélection et acquisition des panneaux radiatifs	82
4.2.1	Revue des technologies candidates	82
4.2.2	Comparatif fournisseurs et sélection	85
4.2.3	Solution retenue : plaques de refroidissement pour batteries.....	87
4.2.4	Montage et orientation sur la structure.....	88
4.3	Dimensionnement hydraulique et intégration à la ferme conteneur	90
4.3.1	Justification du choix DrainBack	90
4.3.2	Conception du réseau et composants	91
4.3.3	Raccordement au système HVAC de la ferme conteneur	93
4.3.4	Couplage avec le stockage thermique existant.....	94

4.4	Synthèse des travaux de développement.....	95
4.5	Perspectives.....	96
	DISCUSSION ET CONCLUSION	101
	RECOMMANDATIONS	105
	ANNEXE I DOCUMENTATION PHOTOGRAPHIQUE	108
	LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	117

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 3.1	Comprehensive experimental and analytical framework for the evaluation of the three RSC architectures.45
Tableau 3.2	Summary of the substrates, fabrication methods, and key process parameters for the three evaluated Radiative Sky Cooling (RSC) architectures.....48
Tableau 3.3	Comparative synthesis of the microstructural and topographic characterization of the RSC architectures, including specimen preparation, instrumentation settings, and metrological objectives.50
Tableau 3.4	Summary of the spectral optical characterization protocols, detailing the specific optical properties measured, instrumentation, and acquisition parameters across the solar and thermal infrared domains.52
Tableau 3.5	Comparison between theoretical target thicknesses and effective thicknesses measured via cross-sectional FE-SEM and image analysis. Absolute deviation for each individual layer is providing quantitative basis for the subsequent phase-matching.....57
Tableau 3.7	Cumulative daily energy balance and resulting thermal regime for each material under steady-state, continuous 24-hour exposure.67
Tableau 3.8	System parameters, physical values, and boundary conditions for the annual dynamic container farm simulation.69
Tableau 4.1	Comparatif des technologies de panneaux candidates pour l'application RSC83
Tableau 4.2	Comparatif des fournisseurs pour les panneaux85
Tableau 4.3	Feuille de route pour la reprise du projet.....97

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 0.1	Diagramme en V de la méthodologie suivi.....	3
Figure 1.1	Bilan énergétique d'une ferme conteneur, tirée de (Liebman-Pelaez et al., 2021).....	12
Figure 1.2	Fenêtre de Transparence Atmosphérique, tirée de (NOAA, 2023)	15
Figure 1.3	Bilan RSC sur un panneau.....	16
Figure 1.4	Absorption spectrales des composant de l'atmosphère, tirée de (NASA PACE, 2026).....	19
Figure 1.5	Impact des conditions climatiques locales sur la performance du RSC, tirée de (Zhao et al., 2019).....	20
Figure 1.6	Répartition globale de la ressource de refroidissement radiatif, tirée de (Aili et al., 2021).	21
Figure 1.7	Schéma des architectures de RSC dans la littérature, tirée de (X. Yu et al., 2021).....	22
Figure 1.8	Comparaison des performances des émetteurs multicouches, tirée de (Kousis & Pisello, 2023)	23
Figure 1.9	Comparaison des performances des émetteurs nanostructurés, tirée de (Kousis & Pisello, 2023)	25
Figure 1.10	Caractérisation optique référence, tirée de (Raman et al., 2014)	28
Figure 1.11	Schéma de l'instrumentation pour la caractérisation thermique	29
Figure 1.12	Graphique caractéristique des performances thermique d'un prototype, tirée de (Raman et al., 2014).....	29
Figure 1.13	Fabrication et caractérisation des films transparent utilisant le RSC en contexte de CEA, tirée de (Zou et al., 2023)	30
Figure 1.14	Schéma d'intégration des nanofluides en contexte d'AEC pour le RSC, tirée de (Hassanien et al., 2025).	31

Figure 3.1	Graphical abstract.....	41
Figure 3.2	Schematic representation of the thermal energy balance for a radiative cooling emitter under (a) diurnal (daytime) and (b) nocturnal (nighttime) conditions. The vectors illustrate radiative, convective, and conductive heat fluxes.	46
Figure 3.3	Photographs of the fabricated samples: (a) photonic multilayer, (b) AAO, and (c) commercial paint.	48
Figure 3.4	(a) Ion milling effect on the sample (750 μ m thick Single Side Polish (SSP) silicon wafer (b) alternative E-beam deposition of SiO ₂ and HfO ₂ at (x40k) (c) SEM observation of the sample at high magnitude (x150k).....	56
Figure 3.5	SEM-EDS elemental mapping of the AAO cross-section (a) and surface (b).....	58
Figure 3.6	SEM-EDS elemental mapping of cross-sectional analysis of the white elastomeric coating.....	59
Figure 3.7	Spectral characterization of the three RSC architectures. (a) Emissivity profiles in the UV–Vis–NIR domain (0.25 μ m to 2.5 μ m) overlaid with the normalized AM1.5 solar spectrum. (b) Emissivity profiles in the FIR domain (2.5 μ m to 25 μ m) compared against the atmospheric transmittance window (8 μ m to 13 μ m).	60
Figure 3.8	Schematic representation of the numerical model.....	62
Figure 3.9	Comparative steady-state radiative cooling performance. (a) Continuous 24-hour temporal evolution of the net heat flux ($P_{net} - rad$). (b) Specific power density breakdown at solar noon (12:00).....	66
Figure 3.10	RSC and auxiliary heat pump simulated cooling load coverage over 120 hours in winter (a) and summer (b) for the three emitter materials....	68
Figure 3.11	Monthly RSC energy contribution versus total cooling demand for all emitter materials over a full meteorological year in Montreal.	71
Figure 4.1	Modèle 3D numérique du banc d'essai pendant la phase de conception ...	76
Figure 4.2	Schéma pour le calcul exact de l'angle d'inclinaison.....	77
Figure 4.3	Schéma de l'instrumentation thermique en toiture	78
Figure 4.4	Instrumentation sur le banc d'essai (Pyranomètre, TC, Résistance chauffante).....	79

Figure 4.5	Calibration des TC : (a) Test des TC par paliers de température, (b) Graphique résultant pour un TC spécifique pour la correction des valeurs de températures 81
Figure 4.6	Dimensions des plaques choisies (Metalli) 88
Figure 4.7	Plan d'installation des panneaux sur la ferme conteneur 89
Figure 4.8	Schéma de principe du système Drainback adapté au RSC 91
Figure 4.9	Schéma de principe du système de plomberie pour raccorder les panneaux 92
Figure 4.10	Schéma du raccordement des panneaux RSC et de la PAC sur le ballon froid existant 94

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AAO	Anodic Aluminum Oxide (oxyde d'aluminium anodique)
AEC	Agriculture en Environnement Contrôlé
ATW	Atmospheric Transparency Window (fenêtre de transparence atmosphérique)
CEA	Controlled Environment Agriculture
CF	Container Farm
COP	Coefficient Of Performance
DAQ	Data Acquisition (National Instruments)
DLI	Daily Light Integral
EDX	Energy Dispersive X-ray spectroscopy
ERA5	Fifth generation ECMWF Reanalysis
ÉTS	École de Technologie Supérieure
FC	Ferme Conteneur
FIR	Far Infrared (Infrarouge Lointain)
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
LED	Light Emitting Diode
NIR	Near Infrared
NTU	Number of Transfer Units
PAC	Pompe À Chaleur
PAR	Photosynthetically Active Radiation
PDRC	Passive Daytime Radiative Cooling
PE	Polyéthylène

XX

PFA	Perfluoroalkoxy (isolant téflon)
PID	Proportional Integral Derivative
RSC	Refroidissement par le Ciel / Radiative Sky Cooling
SEM	Scanning Electron Microscopy
SLE	Special Limits of Error
SO	Sous-Objectif
SSP	Single Side Polish
TES	Thermal Energy Storage
TRC	Transparent Radiative Cooling
UV	Ultraviolet

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

Symboles latins

A	Surface active du panneau RSC
c_{pan}	Capacité thermique massique du panneau
c_{wat}	Capacité thermique massique de l'eau
G	Irradiance solaire globale horizontale
\dot{m}	Débit massique du fluide caloporteur
m_{pan}	Masse du panneau RSC
m_{res}	Masse d'eau dans le réservoir TES
P_{atm}	Puissance absorbée par rayonnement atmosphérique descendant
P_{aux}	Puissance extraite par la pompe à chaleur auxiliaire
$P_{cond-conv}$	Puissance échangée par conduction-convection avec l'air ambiant
P_{env}	Flux conductif à travers l'enveloppe du conteneur
P_{LED+eq}	Charge thermique interne (LED + équipements)
P_{net}	Puissance nette de refroidissement radiatif
P_{rad}	Puissance émise par rayonnement vers le ciel
P_{sun}	Puissance solaire absorbée par le panneau
P_{water}	Puissance échangée par le fluide caloporteur entre panneau et réservoir
Q_{RSC}	Énergie thermique extraite passivement par le RSC
t	Temps
T_{amb}	Température ambiante extérieure
T_{int}	Température intérieure de consigne de la ferme conteneur
T_{pan}	Température du panneau RSC

T_{res}	Température du réservoir TES
T_{sky}	Température effective du ciel
U	Coefficient de transmission thermique de l'enveloppe
UA_{walls}	Coefficient de déperditions thermiques de l'enveloppe
UA_{HX}	Coefficient de transfert thermique de l'échangeur

Symboles grecs

α	Absorptivité solaire du matériau
ε	Émissivité thermique du matériau
ε_{HX}	Efficacité de l'échangeur de chaleur (méthode NTU)
λ	Longueur d'onde
θ	Angle de zénith
ϕ	Angle d'azimut
ρ	Réflectivité spectrale
σ	Constante de Stefan-Boltzman

Indices

amb	Ambiant
atm	Atmosphérique
aux	Auxiliaire (pompe à chaleur)
env	Enveloppe du conteneur
eq	Équipements
ext	Extérieur
HX	Échangeur de chaleur

<i>int</i>	Intérieur
<i>pan</i>	Panneau RSC
<i>rad</i>	Radiatif
<i>res</i>	Réservoir TES
<i>sol</i>	Solaire
<i>sky</i>	Ciel effectif
<i>wat</i>	Eau (water)

INTRODUCTION

L'urbanisation croissante et les perturbations récurrentes des chaînes d'approvisionnement alimentaire ont intensifié l'intérêt pour des systèmes de production localisée, capables de s'affranchir des contraintes saisonnières et géographiques. En réponse à ces impératifs, l'Agriculture en Environnement Contrôlé (AEC) a connu un essor notable au cours de la dernière décennie, notamment dans des régions à climat continental rigoureux telles que le Québec, où la dépendance aux importations demeure structurellement élevée (Benis et al., 2017; Gouvernement du Québec, 2020). Parmi les déclinaisons technologiques de ce type d'agriculture, les Fermes Conteneurs (FC) se distinguent par leur modularité et leur facilité de déploiement au cœur des environnements urbains. Ces systèmes de culture hydroponique ou aéroponique intensifs, intégrés dans des conteneurs maritimes reconvertis, permettent une production tout au long de l'année, indépendamment des conditions extérieures.

Cette isolation complète vis-à-vis du milieu extérieur constitue néanmoins la source de contraintes énergétiques importantes qui compromettent la viabilité économique et environnementale de ces installations. La densité de culture élevée exige un éclairage artificiel intensif par LED, dont la quasi-totalité de la puissance consommée est convertie en chaleur sensible au sein de l'enceinte. À cette charge thermique interne s'ajoute, durant la période estivale québécoise, l'apport solaire absorbé par l'enveloppe métallique du conteneur et transmise à l'intérieur de l'espace de culture. L'ensemble génère une demande de refroidissement continue et particulièrement intense, qui nécessite le recours à des systèmes mécaniques de Chauffage, Ventilation et Conditionnement d'Air (CVCA) dont la batterie froide est actuellement alimentée par des cycles de compression de vapeur.

Or, la dépendance quasi exclusive à la réfrigération par ce type de cycle engendre une consommation électrique, qui pèse directement sur les coûts d'exploitation et fragilise la rentabilité des fermes urbaines (N. Zhou & Liu, 2025). Ce bilan énergétique défavorable est encore aggravé par les émissions indirectes associées à la production d'électricité ainsi que par les émissions directes liées aux fuites éventuelles de fluides frigorigènes à fort potentiel de réchauffement global (PRG). Dans un contexte de décarbonation des systèmes de production

agricole, il devient impératif de concevoir des alternatives de refroidissement passif capables de réduire la demande en intrants électriques, sans compromettre les conditions environnementales requises par les cultures.

Ce mémoire s'inscrit dans cette perspective en examinant l'intégration d'une technologie de refroidissement radiatif passif, désignée dans la littérature par l'acronyme RSC (Radiative Sky Cooling), dans le contexte spécifique des Fermes Conteneurs. Le principe physique repose sur la capacité d'une surface à émettre son rayonnement thermique vers l'espace à travers la fenêtre de transparence atmosphérique (8 à 13 μm), qui constitue un canal radiatif naturel vers le froid cosmique (3K) (Raman et al., 2014). La littérature a démontré expérimentalement qu'en plein ensoleillement, une surface dotée d'une sélectivité spectrale appropriée pouvait atteindre une température inférieure à celle de l'air ambiant, ouvrant ainsi la voie à une génération nouvelle de dispositifs de refroidissement.

Cependant, un fossé technologique subsiste entre les démonstrations fondamentales de ces dernières années, reposant le plus souvent sur des métamatériaux ou des nanomatériaux fabriqués à l'échelle micrométrique dans des conditions de laboratoire, et les exigences d'un déploiement opérationnel à l'échelle pilote (Zhao et al., 2019). Ce mémoire vise précisément à combler cette lacune, en articulant la recherche autour d'une application concrète : la ferme conteneur expérimentale installée sur le campus de l'École de technologie supérieure (ÉTS) en septembre 2025. Ce cas d'application a permis de structurer la démarche autour de contraintes concrètes en matière de gestion thermique, d'architecture et de climat, offrant un cadre de validation rarement disponible dans la littérature sur le RSC. Pour atteindre les objectifs de recherche associés à ce contexte, trois sous-objectifs ont été définis :

- 1) SO1 : Sélectionner et caractériser à l'échelle microscopique différentes surface émettrices, couvrant un spectre technologique allant de structures photoniques multicouches de référence à des revêtements commerciaux accessibles et industrialisables.
- 2) SO2 : Concevoir et instrumenter un dispositif expérimental sur mesure permettant de quantifier la puissance de refroidissement nette de ces matériaux sous des conditions réelles d'exposition diurne et nocturne.

- 3) SO3 : Dimensionner une infrastructure pilote dotée d'une surface active d'environ 5 m², compatible avec la toiture d'un conteneur standard, en s'appuyant sur l'analyse quantitative des besoins thermiques du système.

La progression de ce mémoire suit la logique du cycle en « V » illustrée ci après, allant de l'identification des besoins à l'échelle macroscopique vers la caractérisation des matériaux à l'échelle microscopique, puis remontant vers l'intégration et le dimensionnement du système pilote. Le Chapitre 1 constitue la revue critique de la littérature, articulée autour des besoins thermiques des FC, de la physique du transfert radiatif et de l'état de l'art des émetteurs. Le Chapitre 2 expose la méthodologie de recherche globale, justifiant les choix technologiques et l'architecture expérimentale. Le Chapitre 3, rédigé sous la forme d'un article scientifique soumis à la revue *Solar Energy*, présente les résultats de la caractérisation expérimentale et la comparaison des performances des trois architectures retenues. Enfin, le Chapitre 4 est consacré au développement du banc d'essai extérieur et au dimensionnement du système pilote à l'échelle de la toiture de la ferme.

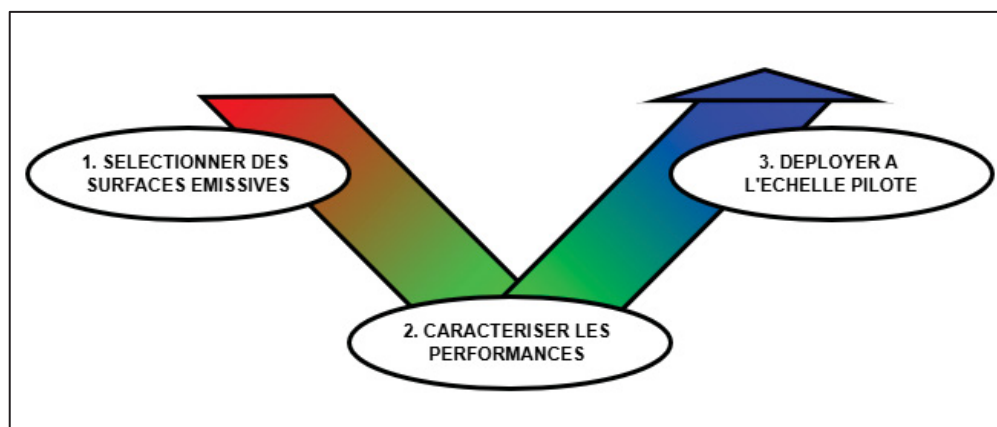


Figure 0.1 Diagramme en V de la méthodologie suivie

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Ce premier chapitre dresse un état des lieux critique des connaissances relatives au refroidissement radiatif passif (RSC) et à son application potentielle dans le secteur de l'Agriculture en Environnement Contrôlé (AEC). L'analyse est structurée de manière à aborder d'abord les besoins spécifiques des fermes conteneurs pour mettre en contexte l'étude, avant de détailler la physique du rayonnement et les différents matériaux capables d'assurer cette fonction de refroidissement. Cette progression logique permet de justifier l'orientation de notre axe de recherche vers des solutions adaptées aux charges thermiques extrêmes de la production intérieure dans les FC.

1.1 Stratégie d'étude bibliographique

Le domaine du RSC se situe à l'interface de plusieurs domaines de la science : étude des matériaux, de l'optique et de la thermodynamique. La complexité de cette technologie, et le contexte spécifique de l'étude sur le projet pilote de FC à l'ÉTS impose une stratégie de recherche bibliographique rigoureuse afin de recueillir les articles les plus pertinents dans notre application spécifique. Cette section détaille les objectifs visés par cette revue ainsi que la méthodologie employée pour garantir l'exhaustivité des sources sélectionnées.

1.1.1 Objectifs

L'objectif de cette revue de littérature est de réaliser un état de l'art exhaustif portant sur la technologie de refroidissement radiatif (RSC) et d'évaluer son potentiel de réponse aux défis thermiques spécifiques des infrastructures d'Agriculture en Environnement Contrôlé (AEC) que sont les fermes conteneurs. Cette étude bibliographique se concentre sur les axes directeurs suivants :

- Analyse des besoins thermiques en environnement contrôlé : Caractériser les charges thermiques internes des Fermes Conteneurs (FC) afin de justifier la nécessité de solutions de refroidissement passives.

- Étude du potentiel physique et climatique : Approfondir les mécanismes de transfert radiatif via la fenêtre atmosphérique et analyser l'influence des facteurs climatiques locaux sur la puissance de refroidissement exploitable.
- Examen critique des architectures matérielles : Recenser les technologies d'émetteurs radiatifs, des structures de haute précision aux solutions à grande échelle, tout en synthétisant les méthodes de caractérisation optique et thermique de ces matériaux.
- Évaluation de l'intégration technologique : Identifier l'état actuel de l'intégration du RSC dans le domaine de l'AEC et mettre en lumière les lacunes scientifiques concernant son application aux systèmes conteneurisés.

À terme, cette revue vise à établir une base théorique solide permettant de délimiter un axe de recherche innovant, visant à réduire la dépendance énergétique des fermes conteneurs par l'usage du refroidissement radiatif.

1.1.2 Méthodologie

La méthodologie adoptée pour cette revue de littérature repose sur une approche systématique et structurée de sélection bibliographique. Cette démarche consiste à identifier les publications scientifiques pertinentes en s'appuyant sur une construction rigoureuse d'équations de recherche booléennes. Ces équations ont été conçues pour isoler les contributions majeures selon trois axes stratégiques.

- Axe 1 : Fondamentaux, physique et état de l'art des matériaux RSC.
Cet axe vise à recenser les revues de littérature traitant des principes physiques (fenêtre atmosphérique, émissivité sélective) et des avancées récentes dans les matériaux (nanostructures, polymères poreux) en excluant l'application de gestion thermique personnelle. L'objectif est d'établir une compréhension globale des phénomènes en jeu dans les différentes technologies et d'offrir une base de comparaison pour nos prototypes pilotes. Ainsi, pour cet axe les recherches d'articles sont limités à ceux de type « Revue »
L'identification des publications pour cet axe repose sur l'équation de recherche suivante :

```
TITLE-ABS-KEY ( ( "radiative cooling*" OR "PDRC" OR "radiative sky cooling*" )
AND ( "fundamental*" OR "physics*" ) AND ( "materials*" OR "nanostructure*" OR
"metamaterial*" OR "nanocomposite*" ) ) AND NOT TITLE-ABS-KEY ( "textile*"
```

OR "wearable*" OR "fabric*" OR "clothing" OR "personal thermal management")
AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "re"))

- Axe 2 : Analyse des charges et modélisation énergétique des FC

Ici, l'objectif est d'isoler la dynamique thermique propre aux structures en conteneurs maritimes. Cet axe se concentre sur les modèles de calcul des charges de refroidissement et la consommation énergétique liée aux systèmes HVAC, indépendamment du RSC. Une attention particulière est portée à l'élimination des articles abordant d'autres applications que l'agriculture pour les conteneurs. L'identification des publications pour cet axe repose sur l'équation de recherche suivante :

TITLE-ABS-KEY (("container farm*" OR "shipping container farm*" OR "freight farm*") AND ("energy model*" OR "energy simulation*" OR "cooling load " OR "building energy performance" OR "HVAC" OR "energy consumption" OR "electricity demand" OR "power")) AND NOT TITLE-ABS-KEY ("greenhouse gaz*" OR "supply chain" OR "logistics") AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "re"))

- Axe 3 : Intégration du RSC aux AEC

Cet axe final aborde l'application stricte du refroidissement radiatif aux AEC. Il vise à identifier les travaux traitant de l'impact thermique du RSC sur les cultures et sur les infrastructures. Il a pour but de rassembler les différentes applications existantes du froid produit par RSC dans les AEC. L'identification des publications pour cet axe repose sur l'équation de recherche suivante :

TITLE-ABS-KEY (("radiative cooling*" OR "daytime radiative cooling*" OR "RSC*" OR "Radiative sky cooling*") AND ("greenhouse*" OR "CEA*" OR "indoor farm*" OR "container farm*") AND ("energy saving" OR "cooling load" OR "thermal modeling" OR "energy consumption")) AND NOT TITLE-ABS-KEY ("greenhouse gas") AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "re"))

L'exécution de ces trois requêtes de manière indépendante au sein de la base de données Scopus permet de générer un corpus initial brut de respectivement $37+11+28=76$ articles, en excluant les doublons. L'ensemble des références ainsi collectées constitue le corpus bibliographique de cette étude. Ces travaux, regroupant à la fois des revues et des études appliquées récentes, serviront de fondement à l'analyse présentée dans les chapitres suivants. Cette base documentaire permet d'articuler l'état de l'art autour des trois piliers identifiés : la physique des

matériaux radiatifs, la modélisation thermique des conteneurs et la convergence de ces technologies vers une application en agriculture contrôlée.

1.2 Analyse des charges et besoins thermiques des Fermes Conteneurs (FC)

Les fermes conteneurs représentent une solution prometteuse pour renforcer la résilience alimentaire urbaine et s'affranchir des contraintes climatiques saisonnières (E. J. Choi et al., 2025; Schmidt Rivera et al., 2023). Leur viabilité économique est cependant compromise par une demande énergétique intense (Song et al., 2023) : une enquête menée auprès des exploitants nord-américains confirme que la consommation électrique et les coûts de démarrage constituent les principaux obstacles perçus par la profession (Kaminski & Babbitt, 2024). La littérature récente documente des efforts de réduction de cette empreinte énergétique par l'optimisation des systèmes d'éclairage LED et des stratégies de contrôle intégrées (Xiong et al., 2026; N. Zhou & Liu, 2025). L'analyse des besoins se décompose en trois niveaux : l'interaction de l'enveloppe avec le climat extérieur, la répartition interne des charges thermiques, et la gestion de la charge latente liée à l'évapotranspiration des cultures.

1.2.1 Caractérisation thermique de l'enveloppe

L'enveloppe du conteneur constitue l'interface entre la dynamique thermique intérieure et les conditions climatiques extérieures, et sa caractérisation est la première étape nécessaire pour établir le profil énergétique du système. La validation de modèles énergétiques de type EnergyPlus sur des FC en conditions réelles, notamment à Boston, a démontré que les conteneurs maritimes isolés possèdent une forte inertie thermique, ce qui est essentiel pour découpler l'environnement intérieur des fluctuations météorologiques extérieures (Liebman-Pelaez et al., 2021).

Cette performance thermique repose en partie sur les propriétés intrinsèques de l'enveloppe. Dans leur configuration d'origine non isolée, les parois d'acier d'un conteneur maritime standard présentent une résistance thermique négligeable, avec des valeurs U de l'ordre de 5,0 à 6,0 $W/m^2 \cdot K$ (Z. Yu et al., 2024). L'ajout d'une isolation en mousse polyuréthane projetée ou laine minérale permet d'abaisser ce coefficient à des valeurs comprises entre 0,20 et 0,45

W/m²·K selon l'épaisseur et la nature du matériau isolant retenu, ce qui se rapproche des exigences des codes du bâtiment applicables aux constructions commerciales légères (Z. Nie et al., 2024). Ces valeurs U constituent les paramètres d'entrée fondamentaux des modèles de simulation thermique développés au Chapitre 4.

Toutefois, cette isolation crée une forte dépendance de la gestion thermique interne au contexte climatique de déploiement. Une analyse comparative entre un climat tropical (Indonésie) et un climat tempéré (Corée) révèle que la demande énergétique annuelle est de 8,9 à 15,0 % supérieure en climat chaud, l'enveloppe piégeant la chaleur interne au lieu de la dissiper (E. J. Choi et al., 2023). À l'inverse, les simulations couvrant plusieurs régions nord-américaines indiquent que les stratégies d'économiseurs d'air *Free Cooling* réduisent la demande de refroidissement de 3,5 % à 58,3 % dans les climats froids, confirmant l'importance du contexte géographique (Song et al., 2023). Néanmoins, même dans ces conditions favorables, la persistance de fortes charges internes maintient un besoin de refroidissement actif tout au long de l'année, notamment durant les périodes estivales (E. J. Choi et al., 2025).

1.2.1.1 Fenestration et ouvertures

Les conteneurs maritimes ne disposent d'aucune fenestration native; toute ouverture est une intervention délibérée qui crée des discontinuités dans l'enveloppe thermique. Dans le contexte des FC, ces ouvertures se divisent en deux catégories : les pénétrations techniques liées aux équipements, et les ouvertures fonctionnelles destinées à la ventilation ou à l'éclairage.

Les pénétrations les plus courantes concernent les passages de câbles, les entrées d'alimentation électrique et les orifices pour les unités de refroidissement. Chacune de ces ouvertures constitue un pont thermique potentiel si elle n'est pas correctement traitée.

La question du vitrage se pose principalement dans les FC qui intègrent un espace de travail ou de supervision en plus des équipements informatiques. Dans ce cas, les valeurs U du vitrage sont nettement supérieures à celles des parois opaques isolées, ce qui en fait le point faible de l'enveloppe. Les valeurs de référence pour le vitrage se trouvent dans la norme (ASHRAE, 2025).

1.2.2 Analyse du bilan thermique interne

Pour quantifier les flux énergétiques, des modèles de simulation thermique dynamique (sur des logiciels tels qu'EnergyPlus) ont été développés et validés par des mesures sur site, montrant une cohérence robuste et permettant de valider les modèles établis (Liebman-Pelaez et al., 2021; Z. Yu et al., 2024). L'analyse de la répartition des charges montre une prédominance de l'éclairage artificiel et du système CVCA. Selon les configurations, le système CVCA peut représenter entre 16 % et 54 % de la consommation totale d'énergie (E. J. Choi et al., 2025). Des études récentes sur des conteneurs rapportent une répartition où l'éclairage LED consomme 72 % de l'énergie, contre 14 % pour le CVC (Xiong et al., 2026). L'équation du bilan thermique doit intégrer la dynamique des cultures. En effet, la modélisation de la consommation énergétique spécifique pour la production de biomasse (kWh/kg) nécessite de prendre en compte les interactions entre la croissance des plantes, l'éclairage et l'environnement thermique (N. Zhou & Liu, 2025). L'équation de bilan énergétique en régime permanent pour une FC, considérant l'air intérieur comme volume de contrôle, est définie dans la littérature comme présenté dans l'équation (1.1) (Liebman-Pelaez et al., 2021) :

$$0 = -Q_{Cooling} + Q_{Envelope} + Q_{Infiltration} + Q_{Equipment} + Q_{Lights} + Q_{Ventilation} + Q_{Dehumidifier} + Q_{Plants} \quad (1.1)$$

Où les termes, exprimés en Watts, sont définis ainsi :

- $Q_{Cooling}$: Représente l'énergie extraite de la ferme conteneur par le système de refroidissement (valeur négative dans le bilan).
- $Q_{Envelope}$: Correspond à l'énergie échangée à travers l'enveloppe du conteneur par conduction et rayonnement.
- $Q_{Infiltration}$: Désigne l'énergie échangée via les infiltrations d'air involontaires.
- $Q_{Equipment}$: Représente le gain de chaleur interne généré par les équipements divers.
- Q_{Lights} : Est le gain de chaleur interne dû à l'éclairage électrique, qui constitue souvent la charge thermique sensible dominante (Liebman-Pelaez et al., 2021; Song et al., 2023).
- $Q_{Ventilation}$: Correspond à l'énergie échangée via la ventilation mécanique.

- $Q_{Dehumidifier}$: Représente les gains de chaleur sensible et latente apportés au système par le fonctionnement du déshumidificateur autonome.
- Q_{Plants} : Représente les échanges de chaleur sensible et latente entre les plantes et l'air intérieur. Ce terme est crucial pour une modélisation précise car il intègre l'évapotranspiration, transformant une partie de l'énergie incidente en chaleur latente plutôt qu'en chaleur sensible.

Cette décomposition met en évidence que l'équilibre thermique ne dépend pas uniquement de l'extraction de chaleur ($Q_{Cooling}$), mais résulte d'une interaction complexe entre les gains internes (lumières, équipements), les échanges avec l'extérieur (enveloppe, infiltration) et les processus biologiques (Q_{Plants}). La littérature souligne d'ailleurs que l'optimisation simultanée de ces paramètres, notamment l'intensité lumineuse et la température en fonction des besoins des plantes, peut réduire la consommation d'énergie spécifique de plus de 30 % (N. Zhou & Liu, 2025). Bilan énergétique d'une ferme conteneur, tirée de (Liebman-Pelaez et al., 2021)

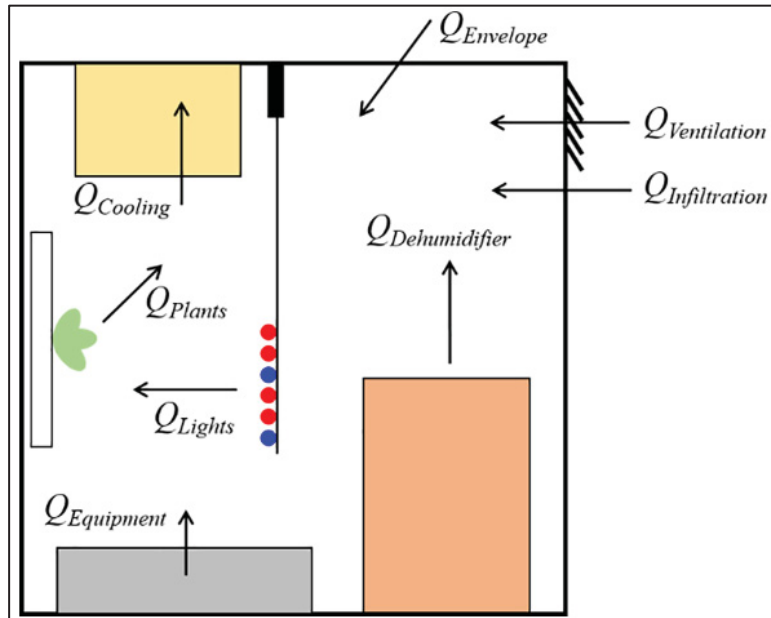


Figure 1.1 Bilan énergétique d'une ferme conteneur, tirée de (Liebman-Pelaez et al., 2021)

1.2.3 Dynamique des besoins en déshumidification

La gestion de l'humidité représente un défi énergétique critique pour les fermes conteneurs. Dans certaines configurations, en fonction de l'évapotranspiration des plantes dans le conteneur, la charge de déshumidification peut représenter jusqu'à plus de 50 % de la demande énergétique totale, aussi bien dans les climats tropicaux que tempérés (E. J. Choi et al., 2023). Cette proportion s'explique par l'intensité de l'évapotranspiration des cultures sous éclairage artificiel continu, qui génère un flux de vapeur d'eau important que les systèmes CVCA conventionnels peinent à gérer indépendamment de la charge sensible.

L'inefficacité des systèmes conventionnels à découpler la régulation de la température et de l'humidité est bien documentée : en l'absence d'unité dédiée, la pompe à chaleur seule laisse l'humidité relative atteindre jusqu'à 95,7 %, compromettant le déficit de pression de vapeur (VPD) nécessaire à la physiologie des cultures (E. J. Choi et al., 2025). L'intégration d'une unité de déshumidification dédiée permet non seulement de rétablir un VPD optimal, mais aussi de réduire la consommation mensuelle de la pompe à chaleur de 13,7 % à 24,5 % (E. J.

Choi et al., 2025). L'identification des facteurs clés influençant l'environnement thermique interne confirme que la température et le débit de l'air soufflé sont les variables les plus déterminantes, tandis que l'humidité spécifique de soufflage pilote la teneur en eau de l'air (Z. Nie et al., 2024).

1.2.4 Synthèse des besoins de management thermique des FC

L'analyse de la littérature permet de caractériser les fermes conteneurs comme des systèmes à bilan thermique interne dominant, où la charge à rejeter est générée presque entièrement par les équipements électriques plutôt que par les flux solaires extérieurs. Trois axes prioritaires structurent les stratégies d'amélioration documentées.

La maîtrise de la charge latente s'impose comme le défi le plus critique. La déshumidification peut absorber plus de la moitié de la demande énergétique totale (E. J. Choi et al., 2023), et les systèmes CVC conventionnels ne permettent pas de la gérer efficacement sans surconsommation. Des stratégies de découplage thermique et hydrique, telles que l'intégration de déshumidificateurs dédiés, permettent des économies allant jusqu'à 25 % sur la pompe à chaleur tout en maintenant un environnement de culture optimal (E. J. Choi et al., 2025).

L'optimisation des consignes environnementales constitue le second levier : l'ajustement dynamique de l'intensité lumineuse, de la température et de la concentration en CO₂ en fonction des cycles de croissance offre un potentiel d'économie d'énergie spécifique supérieur à 30 % (N. Zhou & Liu, 2025).

Enfin, l'intégration des ressources locales et renouvelables, notamment le couplage avec des systèmes photovoltaïques et de stockage, améliore significativement le bilan carbone du cycle de vie, y compris dans les environnements à forte contrainte climatique (Guo et al., 2025; Sambor et al., 2020).

Ces trois axes convergent vers un constat structurant pour ce travail : réduire la charge de refroidissement sensible active, par un apport de froid passif, constitue un levier complémentaire et sous-exploité dans la littérature sur les FC. C'est ce positionnement qui justifie l'approche développée dans ce mémoire. Un intérêt particulier est porté à la solution

passive utilisant le RSC (dont le concept est détaillé dans la section suivante) dans la suite de ce travail.

1.3 Physique des transferts radiatifs et analyse de la ressource de refroidissement

Cette section vise à définir de manière exhaustive le concept physique de refroidissement radiatif et à évaluer son potentiel de déploiement géographique. Le refroidissement radiatif est un processus thermodynamique passif reposant sur l'émission de chaleur sous forme d'ondes électromagnétiques. Contrairement à la conduction et à la convection, ce mode de transfert ne constitue le seul mécanisme d'échange thermique opérant dans le vide. La puissance rayonnée par un corps réel est régie par la loi de Stefan-Boltzmann (équation (1.2)) :

$$P = \epsilon \sigma A T^4 \quad (1.2)$$

, où l'émissivité de surface (ϵ) pondère l'efficacité d'émission par rapport à un corps noir idéal. Ce phénomène exploite le gradient thermique extrême entre la surface terrestre (≈ 300 K) et le fond diffus cosmologique, véritable source froide de l'univers (≈ 3 K) (Raman et al., 2014). La pertinence de cette technologie est confirmée par la loi de Wien (équation (1.3)) :

$$\lambda_{max} = b/T \quad (1.3)$$

Qui démontre qu'un corps à température ambiante terrestre émet son pic de rayonnement autour de $9,66 \mu m$. Cette émission thermique coïncide précisément avec la fenêtre de transparence atmosphérique, permettant ainsi l'évacuation sélective de la chaleur terrestre vers l'espace, présentée en Figure 1.2.

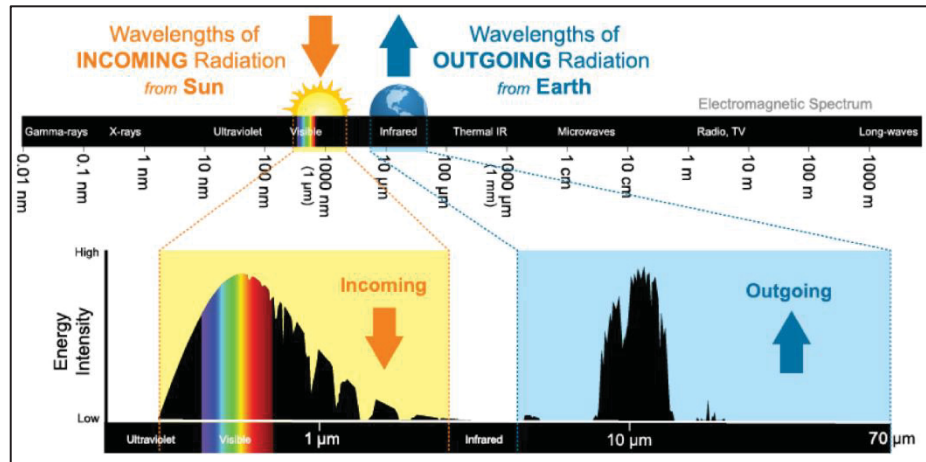


Figure 1.2 Fenêtre de Transparence Atmosphérique, tirée de (NOAA, 2023)

1.3.1 Équations du bilan énergétique de surface

Le principe fondamental du refroidissement radiatif repose sur l'équilibre des flux de chaleur entre la surface émettrice et son environnement. Pour un panneau exposé au ciel, la puissance de refroidissement nette s'exprime par le bilan suivant (équation (1.4)), illustré à la Figure 1.3 :

$$P_{cool}(T) = P_{rad}(T) - P_{atm}(T_{amb}) - P_{sun} - P_{cond+conv} \quad (1.4)$$

Où

- $P_{rad}(T)$ représente la puissance rayonnée par le refroidisseur,
- $P_{atm}(T_{amb})$ désigne la puissance du rayonnement atmosphérique absorbée,
- P_{Sun} est la puissance solaire absorbée,
- $P_{cond+conv}$ représente les pertes par conduction et convection.

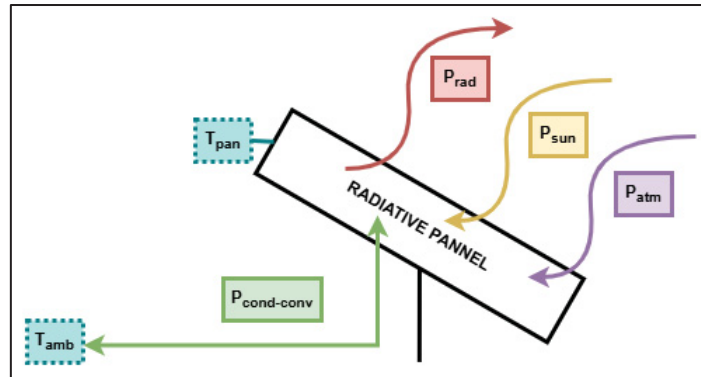


Figure 1.3 Bilan RSC sur un panneau

1.3.1.1 Puissance rayonnée

La puissance thermique émise par la surface, $P_{rad}(T)$, est régie par la loi de Stefan-Boltzmann, intégrée sur l'ensemble du spectre et de l'hémisphère d'émission. Elle dépend de la température de surface T et de l'émissivité spectrale et directionnelle $\epsilon(\lambda, \theta, \phi)$ selon l'équation (1.5) :

$$P_{rad}(T) = A \int_0^{\infty} d\lambda \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi/2} \epsilon(\lambda, \theta, \phi) I_{BB}(T, \lambda) \cos \theta \sin \theta d\theta \quad (1.5)$$

Où :

- A est la surface émettrice
- $I_{BB}(T, \lambda)$ est l'intensité spectrale du corps noir, définie par la loi de Planck (équation (1.6)) :

$$I_{BB}(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} \quad (1.6)$$

Avec :

- h la constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$),
- c la vitesse de la lumière ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$),
- k_B la constante de Boltzmann ($1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$).

Pour simplifier les calculs d'ingénierie, la littérature considère l'émissivité hémisphérique spectrale en réduisant sa dépendance angulaire, en considérant directement l'intégrale sur un hémisphère Ω , réduisant l'expression à l'équation (1.7) :

$$P_{rad}(T) = A \Omega \int_0^{\infty} \epsilon(\lambda) I_{BB}(T, \lambda) d\lambda \quad (1.7)$$

1.3.1.2 Puissance absorbée (Atmosphérique et Solaire)

Le refroidisseur absorbe également le rayonnement thermique incident provenant de l'atmosphère. Cette puissance, $P_{atm}(T_{amb})$, est modélisée comme l'émission d'un corps noir à la température ambiante T_{amb} , pondérée par l'émissivité de l'atmosphère $\epsilon_{atm}(\lambda)$ et l'absorptivité du matériau (équation (1.8)) :

$$P_{atm}(T_{amb}) = A \int_0^{\infty} \epsilon(\lambda) \epsilon_{atm}(\lambda) I_{BB}(T_{amb}, \lambda) d\lambda \quad (1.8)$$

Simultanément, en journée, le matériau absorbe une partie du rayonnement solaire incident P_{Sun} . Selon la loi de Kirchhoff (équation (1.9)), pour un corps opaque en équilibre thermodynamique, l'absorptivité spectrale directionnelle $\alpha(\lambda, \theta)$ est égale à l'émissivité spectrale directionnelle :

$$\alpha(\lambda, \theta) = \epsilon(\lambda, \theta) \quad (1.9)$$

La puissance solaire absorbée s'écrit donc en fonction de l'irradiance solaire standard $I_{AM1.5}(\lambda)$ comme présenté dans l'équation (1.10) :

$$P_{Sun} = A \int_0^{\infty} \epsilon(\lambda, \theta_{Sun}) I_{AM1.5}(\lambda) d\lambda \quad (1.10)$$

L'optimisation d'un refroidisseur diurne implique donc de maximiser la réflectivité solaire ρ_{sol} (où $\rho_{sol} = 1 - \alpha_{sol}$), afin de minimiser ce terme de gain thermique.

1.3.1.3 Pertes non radiatives

Enfin, les échanges par conduction et convection avec l'air ambiant constituent des pertes parasites, modélisées par la loi de refroidissement dans l'équation (1.11) :

$$P_{cond+conv} = Ah_c(T_{amb} - T) \quad (1.11)$$

Où :

- h_c est le coefficient global de transfert thermique, englobant la convection (naturelle ou forcée) et la conduction.

Pour atteindre des températures sub-ambiantes, il est impératif de minimiser ce coefficient h_c , souvent par l'utilisation de couvertures convectives transparentes aux IR, tel que des films de polyéthylène fins (Raman et al., 2014).

Ainsi, la performance du refroidissement radiatif repose sur une sélectivité spectrale stricte : une émissivité maximale dans la fenêtre atmosphérique pour maximiser P_{rad} , couplée à une réflectivité maximale dans le spectre solaire pour minimiser P_{Sun} .

1.3.2 Propriétés de la fenêtre atmosphérique

La faisabilité thermodynamique du refroidissement radiatif passif repose sur une caractéristique spectrale de l'atmosphère terrestre : la « fenêtre de transparence » infrarouge (ATW). Bien que l'atmosphère agisse globalement comme une couverture thermique en absorbant la majorité du rayonnement terrestre, elle présente une transmittance élevée dans la bande spectrale comprise entre 8 et 13 μm .

Cette fenêtre spectrale est définie par l'absence relative de bandes d'absorption moléculaires majeures. En dehors de cette plage, les molécules de vapeur d'eau (H_2O), de dioxyde de carbone (CO_2) et d'ozone (O_3) absorbent fortement les rayonnements infrarouges et les

réémettent vers la surface terrestre (rayonnement atmosphérique descendant), limitant le flux net sortant.

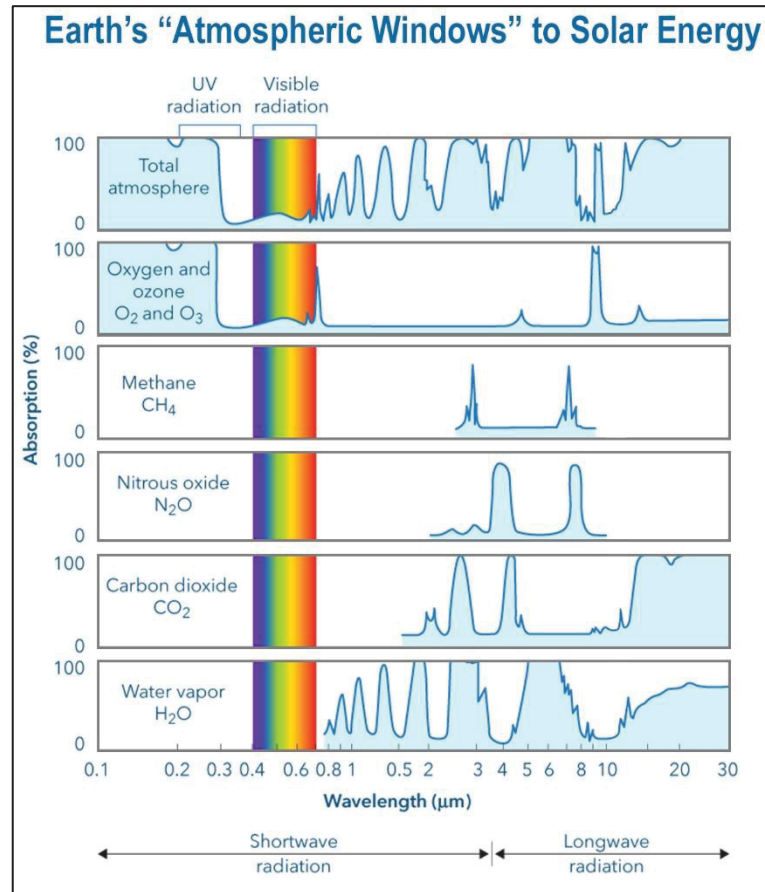


Figure 1.4 Absorption spectrales des composant de l'atmosphère, tirée de (NASA PACE, 2026)

Cependant, à l'intérieur de la fenêtre 8–13 μm , le coefficient de transmission atmosphérique peut dépasser 80 % par ciel clair et sec. C'est ce couplage entre le pic d'émission du corps gris terrestre selon (selon la loi de Wien) et la transparence atmosphérique qui permet d'établir un canal radiatif direct vers l'espace froid (3 K) agissant comme un puits thermique puissant.

1.3.3 Influence des facteurs climatiques locaux

Le bilan énergétique théorique établi à la section 1.3.1 définit le potentiel maximal du RSC en conditions idéales. Sa performance réelle est modulée par les conditions atmosphériques locales, qui affectent directement la transmittance de la ATW et donc la puissance de refroidissement nette exploitable.

La nébulosité est le facteur le plus déterminant. Les nuages agissent comme des barrières thermiques : leur concentration en H_2O et CO_2 absorbe le rayonnement infrarouge émis par la surface et le réémet vers le sol, réduisant ainsi le flux net sortant. Bien qu'un échange radiatif avec la base des nuages soit thermodynamiquement possible, la puissance nette est drastiquement atténuée car la température des nuages est nettement supérieure à celle du fond cosmologique. Une campagne de mesure menées pour des conditions typiques du Colorado quantifient cet impact : la puissance nette peut chuter de $\sim 100 \text{ W/m}^2$ par ciel clair à $\sim 10 \text{ W/m}^2$ sous couverture nuageuse dense (Zhao et al., 2019).

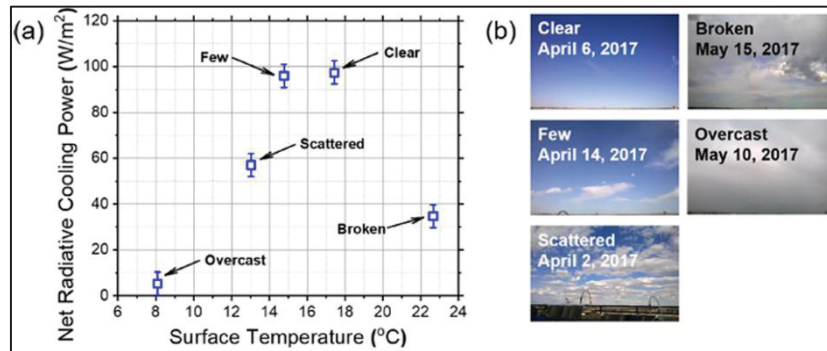


Figure 1.5 Impact des conditions climatiques locales sur la performance du RSC, tirée de (Zhao et al., 2019)

Parallèlement, la teneur en vapeur d'eau atmosphérique joue un rôle critique en dehors de la fenêtre ATW. Les régions arides, caractérisées par une faible colonne d'eau précipitable, présentent la transmittance la plus élevée dans la bande 8–13 μm . Des cartographies mondiales du potentiel de refroidissement, basées sur des données satellitaires intégrant la température de surface, l'humidité et la nébulosité, identifient les déserts subtropicaux comme les sites les plus

favorables, combinant une forte demande en froid et un accès dégagé à la ressource radiative (Aili et al., 2021).

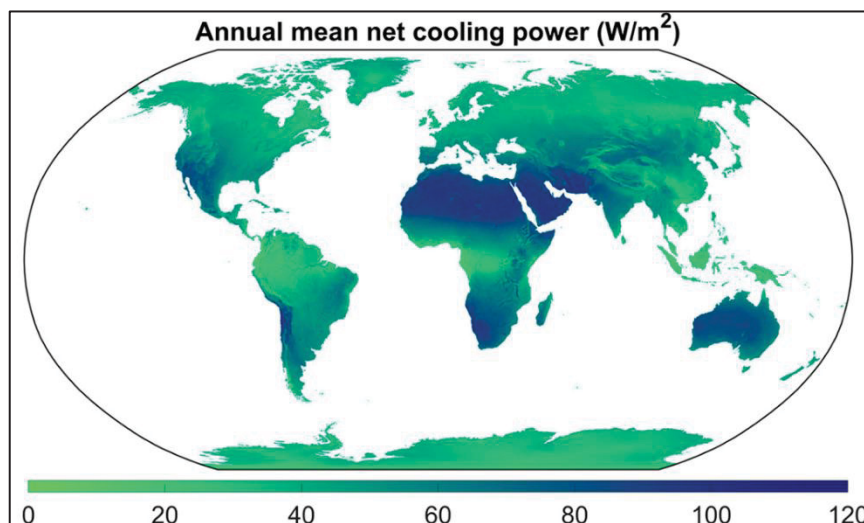


Figure 1.6 Répartition globale de la ressource de refroidissement radiatif, tirée de (Aili et al., 2021)

Le contexte montréalais, caractérisé par une humidité relative estivale structurellement élevée et une nébulosité significative, représente donc un cas d'application exigeant pour le RSC. Cette contrainte climatique locale constitue l'une des principales motivations pour évaluer expérimentalement les performances des émetteurs en conditions réelles plutôt que de se limiter aux simulations numériques, comme développé au Chapitre 4. Des facteurs secondaires, tels que l'accumulation de poussière sur la surface émissive couplée à une pluviométrie insuffisante pour assurer le nettoyage naturel, peuvent également dégrader les propriétés optiques à long terme et réduire le rendement effectif du dispositif (W. Fan et al., 2023).

1.4 État de l'art des émetteurs radiatifs: matériaux, technologies et caractérisations

Le RSC repose sur une gestion stricte du bilan radiatif de surface. Pour atteindre des températures inférieures à l'ambiance sous ensoleillement direct, la littérature scientifique récente a convergé vers des architectures matérielles capables de minimiser l'absorption solaire tout en maximisant l'émissivité dans la fenêtre de transparence atmosphérique (Zhao et al., 2019).

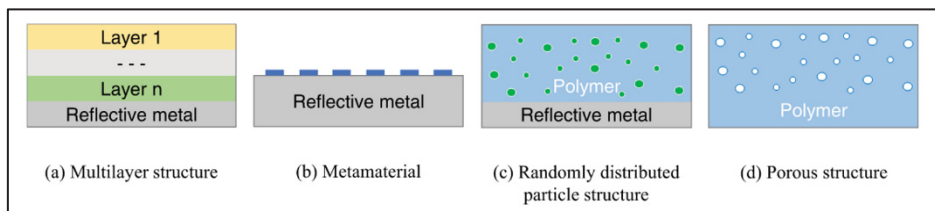


Figure 1.7 Schéma des architectures de RSC dans la littérature, tirée de (X. Yu et al., 2021)

Les solutions techniques se divisent principalement en quatre catégories : les structures photoniques multicouches, les métamatériaux nanostructurés, les polymères poreux et les composites particuliers (W. Li et al., 2020). Ces approches exploitent des mécanismes physiques distincts pour optimiser le flux thermique net, qui peut théoriquement dépasser $100 \text{ W}/\text{m}^2$ dans des conditions idéales (Wu et al., 2023).

1.4.1 Émetteurs sélectifs de haute précision

La conception d'émetteurs radiatifs de haute performance s'appuie sur l'ingénierie nanophotonique pour sculpter le spectre d'émission avec une précision quasi-monochromatique. L'objectif fondamental est de découpler thermiquement la surface du rayonnement solaire incident tout en maximisant son couplage radiatif avec l'espace (Zhao et al., 2019). Deux approches technologiques dominent cet état de l'art : les structures photoniques multicouches et les métamatériaux nanostructurés.

1.4.1.1 Structures multicouches (1D)

Les refroidisseurs radiatifs multicouches constituent l'approche la plus mature pour obtenir une sélectivité spectrale proche de l'idéal théorique. Ces dispositifs fonctionnent grâce à des interférences optiques constructives et destructives générées au sein d'un empilement alterné de couches minces diélectriques à indices de réfraction contrastés (W. Li et al., 2020).

Généralement, ces structures reposent sur un substrat métallique hautement réfléchissant, tel que l'argent (Ag) ou l'aluminium (Al), qui agit comme un miroir à large bande pour bloquer l'absorption solaire directe (Zhao et al., 2019). Les couches diélectriques superposées sont composées de matériaux soigneusement sélectionnés pour leur transparence dans le spectre solaire et leur absorptivité dans l'infrarouge, tels que le dioxyde de silicium (SiO_2), le dioxyde de titane (TiO_2), le nitrure de silicium (Si_3N_4) ou l'oxyde d'hafnium (HfO_2) (W. Li et al., 2020).

Cette dynamique d'optimisation structurelle est illustrée par le tableau ci-dessous, qui synthétise les performances expérimentales de divers films multicouches développés entre 2014 et 2022 (Kousis & Pisello, 2023):

Study	Year	no of layers	City	type	av R	av E_m	type	parasitic insulation	period of exp (month)	duration of exp	calculated net cooling power (W/m^2)	DT surface	DT in-field	in-lab	in-air
Raman et al. ^[32]	2014	7	Stanford, US	film	0.97	0.5–0.8	S	✓	12	10:00- 15:00	40.1	4.9 (max)	–	✓	–
Kou et al. ^[46]	2017	2, 3	Pasadena, US	film	0.90, 0.90	0.20–0.90, 0.90–0.99	B	✓	–	00:00- 24:00	107, 127	7.2 8.2	–	✓	–
Zhou et al. ^[44]	2019	2	Buffalo, US	film	–	0.95	S	✓	2	11:00- 15:00	120	9.5 (in-lab) 11 (in-field)	–	✓	✓
Ao et al. ^[47]	2019	2, 2	Beijing, CH	film	0.94, 0.93	0.7–1.0, 0.65–0.75	B	✓	11	00:00- 24:00	–	2.5, 1.5	–	✓	–
Chae et al. b ^[64]	2020	4	Seoul, KR	film	0.95	0.87	S	–	5	72 h	–	–	–	–	–
Chae et al. a ^[65]	2020	2, 3, 3	Seoul, KR	film	–	0.61, 0.92, 0.91	S	✓	3	09:00 24:00	62.5 89.5, 98.9	8.24, 8.75, 9.82	–	✓	–
Ma et al. ^[63]	2020	8	Suzhou, CH	film	0.98	0.7–0.99	S	✓	10,11	09:00- 24:00	87	8	–	✓	–
Tian et al. ^[66]	2021	2	Boston, US	film	0.93	–	S	✓	–	16:00- 13:00	104	5	–	✓	–
Banik et al. ^[49]	2021	3	Oldenburg, DE	film	0.97	0.86	S	–	8	11:00- 18:00	93.7	6.8	–	✓	–
Kang et al. ^[50]	2020	2	Harbin, CH	film	0.90	0.95	S	–	–	11:50- 12:30	–	4.5	–	✓	✓
Kim et al. ^[67]	2021	6	Seoul, KR	film	0.73 (av)	>0.9	B	✓	9	27 h	76-138	10.1 (max)	–	✓	–
Ji et al. ^[68]	2022	3	Shanghai, CH	film	0.94	0.79	B	✓	6	10:00- 12:00	–	7.8 (max)	–	✓	–

Figure 1.8 Comparaison des performances des émetteurs multicouches, tirée de (Kousis & Pisello, 2023)

La démonstration de ce principe par (Raman et al., 2014) a établi qu'un empilement optimisé de sept couches alternant HfO_2 et SiO_2 sur un substrat d'argent permet de réfléchir 97 % du rayonnement solaire incident, atteignant un refroidissement sub-ambient de ~ 5 °C en plein

soleil. Des études ultérieures ont montré une tendance à la simplification des architectures : des structures à deux ou trois couches parviennent à générer des puissances nettes supérieures à 100 W/m^2 , contre $40,1 \text{ W/m}^2$ pour le prototype initial à sept couches, grâce au maintien d'une réflectivité solaire moyenne systématiquement supérieure à 0,90 (Kousis & Pisello, 2023; W. Li et al., 2024; Tian et al., 2025).

Malgré ces performances, ces structures présentent des limitations pratiques déterminantes pour une application à grande échelle. La dépendance de leur efficacité à l'angle d'incidence et le coût prohibitif des procédés de dépôt sous vide (évaporation par faisceau d'électrons, dépôt de couches atomiques) limitent leur industrialisation à des surfaces de quelques centimètres carrés (Gong et al., 2024). Ces contraintes motivent directement la comparaison avec des solutions plus accessibles dans la présente étude.

1.4.1.2 Métamatériaux Nanostructurés (2D/3D)

Au-delà des empilements unidimensionnels, des recherches sur les métamatériaux exploitent aussi des motifs géométriques à l'échelle sub-longueur d'onde pour le contrôle spectral et directionnel, en jouant sur la géométrie des interférences. Ces structures artificielles reposent sur des réseaux périodiques de nanostructures (trous, piliers, pyramides) ou des inclusions de nanoparticules conçues pour exciter des modes de résonance spécifiques. L'introduction de micro-billes de verre (SiO_2) ou de motifs prismatiques permet par exemple de coupler le rayonnement incident à des modes guidés, renforçant l'émission dans l'infrarouge tout en reflétant efficacement dans le visible. Ces absorbeurs métamatériels peuvent ainsi atteindre une absorption quasi-unitaire sur des bandes de fréquences ciblées, indépendamment des propriétés des matériaux constitutifs (Duan et al., 2019).

Cette maîtrise spectrale se traduit par des performances expérimentales élevées, recensées dans la méta-analyse récente.

Study	Year	City	type	av R	av E_{in}	type	parasitic insulation	period of exp (month)	duration of exp	calculated net cooling power (W/m^2)	DT surface	DT air	in-field	in-lab
Zou et al. ^[51]	2017	–	film	–	0.7–0.95	S	–	–	–	68.84	7.36 (sim)	–	–	✓
Jeong et al. ^[70]	2020	Hong Kong, CH	film	0.95	0.98	S	✓	6, 9	00:00- 24:00	19.7	6.2	–	✓	–
Zhang et al. ^[71]	2020	Shanghai, CH	film	0.95	0.96	S	✓	5	12:00- 14:30	90.8	5.1	–	✓	✓
Heo et al. ^[69]	2020	Gwangju, SK	film	–	0.70-0.99, 0.75-0.99	S, B	✓	1	14:00- 18:00	58.1, 67.0	6, 5	–	✓	–
Hossain et al. ^[72]	2015	–	film	0.97	>0.8	S	–	–	–	–	9 (sim)	–	–	–
Kong et al. ^[52]	2019	–	film	0.95	>0.9	B	–	–	–	–	9.6 (sim)	–	–	–
Mishra et al. ^[73]	2021	–	film	0.94	0.96	B	–	–	–	81.8	–	–	–	–
Tian et al. ^[74]	2022	Boston, US	film	0.99	0.90	B	–	6	11:30- 13:00	104	5.1	–	–	–

Figure 1.9 Comparaison des performances des émetteurs nanostructurés, tirée de (Kousis & Pisello, 2023)

L'analyse de ces données expérimentales, compilées dans l'analyse (Kousis & Pisello, 2023) met en évidence plusieurs tendances technologiques majeures. Premièrement, les dispositifs nanostructurés parviennent désormais régulièrement à franchir le seuil symbolique des $100 W/m^2$ sous ensoleillement direct. À titre d'illustration, des puissances respectives de $127 W/m^2$ et $120 W/m^2$ ont été rapportées pour des structures optimisées, validant ainsi le potentiel de ces technologies pour des applications à haute densité énergétique (Gao & Chen, 2023; Mascaretti et al., 2023). Deuxièmement, une corrélation directe est observée entre la réflectivité moyenne et la performance thermique finale : les prototypes les plus performants, tel que celui testé à Boston affichant $104 W/m^2$, présentent une réflectivité solaire quasi-idéale de 0,99, confirmant que la minimisation de l'absorption solaire reste le facteur critique limitant (Tian et al., 2025).

L'état de l'art actuel dépasse même désormais le refroidissement statique pour s'orienter vers des métamatériaux "dynamiques" capables de moduler leur émissivité en fonction de la température ambiante. L'intégration de matériaux à changement de phase comme le dioxyde de vanadium (VO_2) aux nanostructures permet de basculer entre un état isolant (transparent aux IR) à basse température et un état métallique (émissif) à haute température, offrant une régulation thermique adaptative (Dong et al., 2026; Ko et al., 2021; Xie et al., 2025).

1.4.2 Matériaux à structures poreuses et particulières

Contrairement aux métamatériaux qui exigent une précision nanométrique, cette classe de matériaux exploite le désordre des structures pour obtenir les propriétés radiatives propres au RSC. L'approche repose sur la diffusion aléatoire de la lumière (scattering) pour maximiser la réflectivité solaire, tout en utilisant les propriétés des polymères ou des minéraux utilisés pour assurer une forte émissivité thermique. Ces solutions offrent un potentiel de mise à l'échelle industrielle supérieur par rapports aux applications à haute précision (Ahmed et al., 2021).

1.4.2.1 Milieux poreux organisés et polymères

Les refroidisseurs radiatifs poreux fonctionnent sur le principe de la réflexion diffuse générée par de multiples interfaces air-polymère. La matrice polymère (par exemple cellulose ou PMMA) est fabriquée pour contenir une haute densité de micro-pores créant un fort contraste d'indice de réfraction avec l'air environnant. Cette particularité géométrique force le rayonnement solaire incident à subir de multiples diffusions (back-scattering), empêchant son absorption par le substrat même sans couche d'argent réfléchive sous le polymer. Le polymère assure quant à lui une émissivité élevée dans l'infrarouge thermique (Peng et al., 2025; Uyanga et al., 2025).

Des matériaux écologiques issus de la biomasse font également leur apparition dans cet espace. Des structures dérivées du bois ou de l'acétate de cellulose, dont la hiérarchie poreuse naturelle offre une réflectivité solaire supérieure à 96 % après traitement chimique, constituent une piste prometteuse pour des applications à faible empreinte environnementale (Jia et al., 2025). Ces structures sont généralement obtenues par des procédés d'inversion de phase ou de moussage (foaming), plus simples et moins cher que la lithographie (Peng et al., 2025).

1.4.2.2 Solutions composites

Les revêtements composites combinent une matrice polymère émissive et des charges particulières diffusantes. Cette catégorie englobe la quasi-totalité des peintures radiatives (cool paints) applicables par pulvérisation, qui constituent la solution la plus directement industrialisable pour de grandes surfaces (Lai et al., 2025; X. Li et al., 2021). La réflectivité

solaire est assurée par des particules diélectriques, comme le TiO_2 , SiO_2 ou BaSO_4 , dont la taille est soigneusement calibrée pour correspondre aux longueurs d'onde du spectre solaire (0,5–1,0 μm) afin d'optimiser l'efficacité de diffusion lorsque la lumière visible traverse le milieu (Gong et al., 2024; X. Li et al., 2021).

L'utilisation de distributions de tailles disperses améliore la couverture spectrale par rapport aux tailles d'insertions uniformes (Gong et al., 2024). Une densité particulaire trop élevée, bien que favorable à la réflectance, peut néanmoins compromettre l'intégrité mécanique du revêtement et créer une rugosité qui peut s'avérer néfaste pour la réflectivité solaire. Les développements récents visent à intégrer des propriétés hydrophobes aux revêtements composites pour garantir leur durabilité et leur nettoyage autonome en conditions extérieures prolongées, grâce à l'écoulement de l'eau de pluie (F. Fan et al., 2024; Lai et al., 2025).

1.4.3 Méthodes de caractérisation optique et thermique

1.4.3.1 Caractérisation spectrale

Les caractéristiques optiques des prototypes de refroidisseurs radiatifs (RR) sont évaluées en fonction de deux paramètres clés :

- 1) L'absorption solaire : Cette propriété quantifie la fraction du spectre solaire incident absorbée par le dispositif. Le spectre solaire, qui s'étend typiquement de 0,3 μm à 2,5 μm , comprend des longueurs d'onde allant de l'ultraviolet (UV) au proche infrarouge (NIR). Une absorption solaire élevée peut entraîner un échauffement du dispositif, ce qui est contre-productif pour le refroidissement. Ainsi, l'objectif est de minimiser l'absorption solaire et donc de maximiser la réflexion dans cette plage spectrale. Ces mesures sont souvent faites par spectrophotométrie. La spectrophotométrie est une méthode standard qui mesure la fraction de lumière incidente transmise, réfléchi et absorbée par un échantillon dans la plage spectrale allant de l'ultraviolet (UV) au proche infrarouge (NIR), c'est-à-dire de 0,3 μm à 2,5 μm (Raman et al., 2014).
- 2) L'émissivité thermique : Cette propriété caractérise la capacité du dispositif à émettre un rayonnement infrarouge dans la plage spectrale de 8 μm à 13 μm , correspondant à la fenêtre atmosphérique où l'atmosphère terrestre est transparente. L'émissivité thermique, définie comme le rapport entre le rayonnement émis par le dispositif et celui émis par un corps noir à la même température, doit être maximisée dans cette plage spectrale pour optimiser le refroidissement radiatif. Ces mesures sont faites par FTIR (Fourier Transform Infrared spectroscopy) (Fortin et al., 2023).

Ces propriétés intrinsèques aux matériaux présentées ci-dessus sont synthétisées graphiquement sous la forme d'un spectre de réflectance et d'émittance spectrale couvrant l'ensemble des plages d'intérêt pour le refroidissement radiatif. Cette représentation permet d'évaluer la sélectivité spectrale du dispositif : un refroidisseur idéal doit présenter une transition abrupte entre une réflectance quasi-totale dans le domaine ultraviolet, visible et proche infrarouge et une émissivité maximale au sein de la fenêtre de transparence atmosphérique.

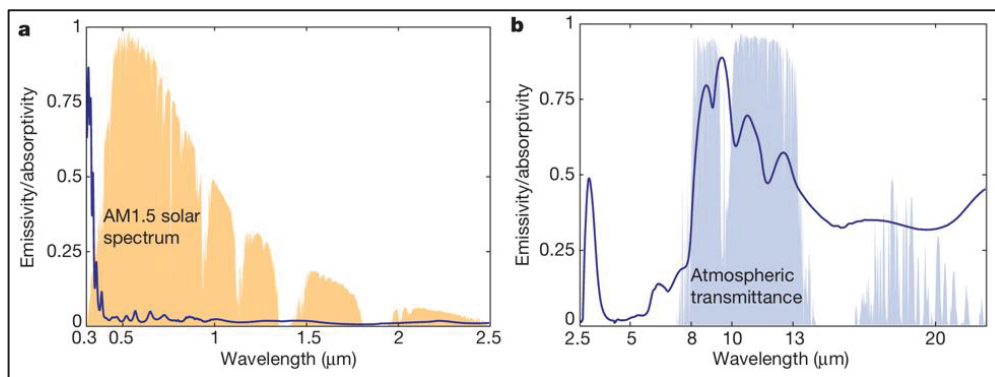


Figure 1.10 Caractérisation optique référence, tirée de (Raman et al., 2014)

La Figure 1.10 ci-dessus illustre cette réponse spectrale différentielle, mettant en évidence la capacité du prototype à rejeter la charge thermique solaire tout en exploitant le puits de chaleur cryogénique de l'espace lointain via la fenêtre atmosphérique.

1.4.3.2 Évaluation des performances thermiques

L'évaluation des performances thermiques des dispositifs de refroidissement radiatif repose principalement sur la quantification de la densité de puissance qui peut être dissipé par unité de surface (W/m^2). Une méthode expérimentale standard, décrite par la littérature (Raman et al., 2014), emploie une résistance chauffante fixée à l'arrière du dispositif pour simuler une charge thermique contrôlée, comme représenté sur la Figure 1.11.

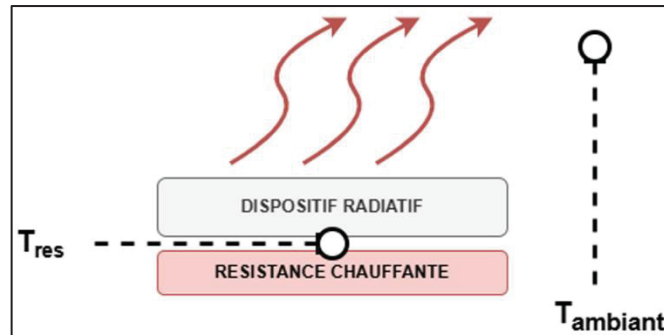


Figure 1.11 Schéma de l'instrumentation pour la caractérisation thermique

Le protocole consiste à augmenter progressivement la puissance électrique injectée jusqu'à atteindre un équilibre thermique où la température du dispositif (T_{sample}) s'égalise avec la température ambiante (T_{amb}), moment où la puissance de refroidissement (P_{cool}) est équivalente à l'énergie fournie par la résistance.

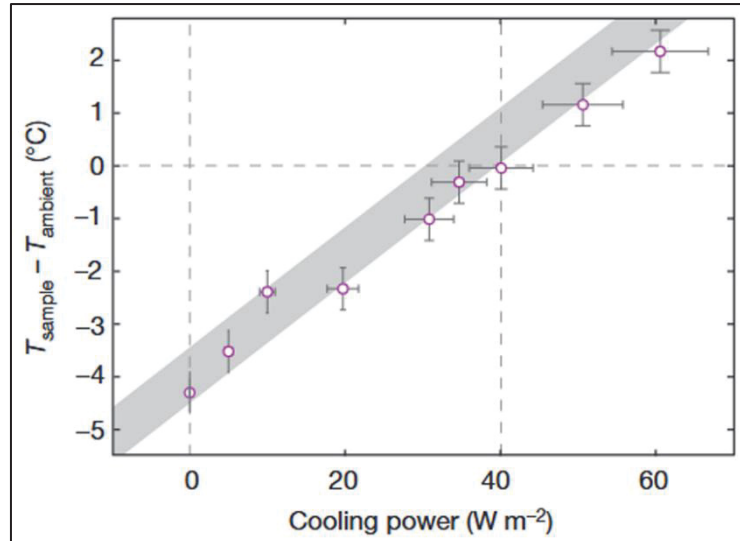


Figure 1.12 Graphique caractéristique des performances thermique d'un prototype, tirée de (Raman et al., 2014)

L'analyse des résultats s'effectue ensuite par la construction d'un graphique caractéristique reliant la différence de température ($\Delta T = T_{sample} - T_{amb}$) à la puissance dissipée, dont la

régression linéaire permet d'extraire les indicateurs de performance intrinsèque du prototype et de comparer objectivement différentes technologies, comme présenté sur la Figure 1.12.

1.5 État de l'Intégration du RSC aux AEC

L'application du RSC au domaine de l'Agriculture en Environnement Contrôlé (AEC) offre une opportunité de rupture technologique pour la gestion thermique des structures de culture, traditionnellement dépendantes de systèmes de ventilation énergivores ou de refroidissement par évaporation (Liu et al., 2019).

1.5.1 État des applications en milieu AEC

Les premières applications du RSC en milieu agricole ont ciblé les serres conventionnelles à enveloppe vitrée ou plastique, confrontées à des charges solaires externes importantes. Les films polymères dopés aux oxydes non métalliques dans une matrice de polyéthylène constituent l'approche pionnière, avec une augmentation documentée de la puissance de refroidissement nette de 28 W/m^2 par rapport à un film non traité, se traduisant par une réduction de la température intérieure de $2,2 \text{ °C}$ (Liu et al., 2019).

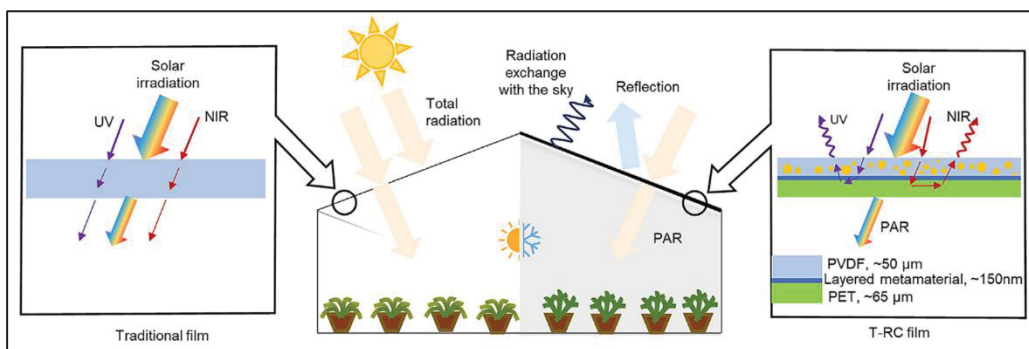


Figure 1.13 Fabrication et caractérisation des films transparent utilisant le RSC en contexte de CEA, tirée de (Zou et al., 2023)

Un compromis s'impose alors dans ce contexte : les matériaux maximisant la réflectance solaire réduisent simultanément la transmittance dans le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR, 400–700 nm), ce qui pénalise la croissance des cultures en l'absence d'éclairage

artificiel compensatoire. Pour lever ce verrou, des matériaux à refroidissement radiatif transparent (Transparent Radiative Cooling, TRC) ont été développés, présentant une sélectivité spectrale extrême : transmittance dans le visible supérieure à 80 % couplée à une émissivité infrarouge supérieure à 0,9 (J. Wang et al., 2026). Des structures bio-inspirées parviennent à une transmittance visible de 89,5 % tout en induisant une réduction de température de 7,4 °C sous flux solaire intense (Ding et al., 2026).

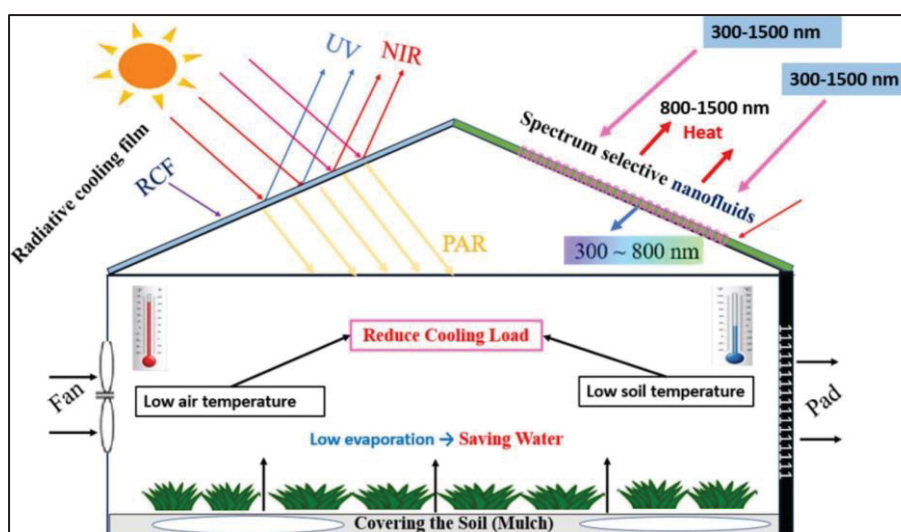


Figure 1.14 Schéma d'intégration des nanofluides en contexte d'AEC pour le RSC, tirée de (Hassanien et al., 2025)

Des approches plus dynamiques font également leur apparition : l'intégration de nanofluides circulant dans les parois des serres permet de combiner le refroidissement radiatif avec une gestion thermique active, particulièrement efficace pour réduire le stress thermique des racines en zones arides (Hassanien et al., 2025).

Des matériaux biosourcés commencent également à trouver leur place dans le domaine du RSC en application AEC. Des feuilles de chitine minéralisée issues de déchets de crustacés atteignent une réflectance solaire de 90,0 % et une émissivité infrarouge de 96,0 %, permettant un abaissement moyen de température de 4,5 °C ainsi qu'une réduction annuelle des besoins énergétiques des bâtiments, tout en étant biodégradables et recyclables comme engrais agricoles (P. Li et al., 2025). Ces propriétés font de ce type de matériau un candidat cohérent

avec les contraintes environnementales propres aux AEC, où la circularité des matériaux peut constituer un critère de sélection important.

1.5.2 Synthèse et identification de l'axe de recherche

La revue de la littérature conduite aux sections précédentes permet de dresser un tableau cohérent de l'état des connaissances sur le refroidissement radiatif passif et sur la thermique des fermes conteneurs. Trois constats structurants se dégagent de cette analyse, dont la confrontation révèle un verrou scientifique précis et justifie l'orientation de la présente recherche.

- Premier constat : Les fermes conteneurs présentent une dynamique thermique interne dominante, fondamentalement différente de celle des serres.

Comme établi à la section 1.2, la charge thermique d'une FC est pilotée non par le flux solaire traversant une enveloppe transparente, mais par les apports internes issus de l'éclairage artificiel et des équipements de contrôle. L'éclairage LED représente environ 70% de la consommation électrique totale et se convertit intégralement en chaleur sensible au sein de l'enceinte (Liebman-Pelaez et al., 2021; Xiong et al., 2026). Il en résulte une demande de refroidissement continue, indépendante des conditions extérieures, dont la satisfaction représente entre 16 % et 54 % de la consommation totale selon les configurations (E. J. Choi et al., 2025; Song et al., 2023). L'enveloppe métallique opaque et fortement isolée du conteneur transforme donc l'enceinte en un volume de contrôle fermé où la chaleur doit impérativement être extraite par des moyens actifs ou passifs, faute de quoi l'environnement de culture se détériore rapidement.

- Deuxième constat : la technologie RSC a démontré sa maturité dans les environnements agricoles à enveloppe transparente, mais ses applications aux enceintes opaques et à haute densité de puissance interne demeurent inexistantes dans la littérature.

Les travaux recensés à la section 1.5.1 portent exclusivement sur des serres conventionnelles, où la fonction principale des émetteurs est de réduire l'entrée du flux solaire (réduction de la charge externe) et d'abaisser la température sous la toiture vitrée. Les matériaux employés dans ce contexte, qu'il s'agisse de films polymères dopés aux oxydes non métalliques (Liu et al.,

2019) ou de revêtements à refroidissement radiatif transparent (Ding et al., 2026; J. Wang et al., 2026), sont optimisés pour opérer en présence de lumière transmise aux cultures. Cette contrainte de transparence dans le visible, propre aux serres, est totalement absente dans le contexte des FC, qui reçoivent leur éclairage intégralement de sources artificielles. En conséquence, aucun des protocoles ou dimensionnements rapportés dans la littérature sur le RSC en AEC ne peut être directement transposé à une ferme conteneur, dont la problématique thermique est d'une nature radicalement différente.

- Troisième constat : un fossé important sépare les performances démontrées en laboratoire et les conditions requises pour un déploiement opérationnel à l'échelle pilote.

Comme mis en évidence à la section 1.4, les émetteurs les plus performants de la littérature (structures photoniques multicouches, métamatériaux nanostructurés) atteignent, même sous ensoleillement direct, des puissances de refroidissement nettes, remarquables en conditions idéales, mais leur fabrication repose sur des procédés complexes et coûteux, difficilement reproductibles hors d'un environnement de salle blanche. Les solutions commerciales disponibles, comme les peintures radiatives à haute réflectance solaire, sont plus accessibles mais moins caractérisées dans des conditions climatiques tempérées et humides, telles que celles du Québec, où la transmittance de la fenêtre atmosphérique est réduite par la forte humidité relative estivale (section 1.3.3). Par ailleurs, la littérature ne fournit aucune évaluation comparée de ces différentes familles de matériaux appliquées à un système hydraulique de récupération thermique à l'échelle du mètre carré.

La convergence de ces trois constats délimite un axe de recherche précis, à l'intersection de la science des matériaux radiatifs et de l'ingénierie des systèmes thermiques agricoles. Il s'agit de déterminer dans quelle mesure un système de refroidissement radiatif passif, intégré en toiture d'une ferme conteneur, peut contribuer à extraire la chaleur sensible générée en interne et réduire ainsi la sollicitation des équipements de climatisation mécanique, dans les conditions climatiques d'un été montréalais. Cette question de recherche impose de traiter simultanément trois niveaux d'analyse : la sélection et la caractérisation à l'échelle microscopique d'émetteurs radiatifs couvrant un spectre technologique représentatif, la validation expérimentale en

conditions réelles de leur puissance de refroidissement nette, et le dimensionnement d'une infrastructure pilote à l'échelle de la toiture du conteneur expérimental de l'ÉTS

CHAPITRE 2

APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE ET CONTRIBUTION ATTENDUE

L'objectif principal de cette étude est de concevoir, valider expérimentalement et dimensionner un système de refroidissement radiatif passif adapté aux contraintes opérationnelles des FC en contexte climatique québécois. Cette démarche répond au besoin identifié à la section 1.5.2 : réduire l'écart entre les performances démontrées en laboratoire pour des émetteurs radiatifs et les exigences d'un déploiement à l'échelle pilote dans une enceinte opaque à forte densité de puissance interne.

La démarche est organisée selon un cycle de validation en « V », et structurée autour des trois sous-objectifs définis dans l'introduction. La branche descendante couvre SO1 et SO2 (sections 2.1.1 et 2.1.2) ; la branche ascendante correspond à SO3 (section 2.1.3). Les données climatiques et thermiques utilisées sont précisées à la section 2.2. La section 2.3 synthétise la contribution attendue de la recherche.

2.1 Architecture de la recherche : la démarche en « V »

La démarche suit un cycle de validation en « V » : elle part des besoins thermiques de la ferme conteneur pour définir et caractériser les émetteurs à l'échelle microscopique, puis remonte vers le déploiement à l'échelle pilote. Ce cycle n'est pas strictement séquentiel : les trois prototypes ont été fabriqués et caractérisés successivement, et chaque itération a permis d'affiner les protocoles de fabrication et de mesure avant de passer au suivant. Une limite sur trois prototypes a été choisie pour permettre de couvrir toute une gamme de technologies disponibles, allant du prototype HighTech fabriqué au LaCIME, à la peinture blanche achetée dans le commerce, en passant par un intermédiaire en terme de prix avec l'aluminium anodisé. Les trois sous-objectifs s'inscrivent dans cette progression itérative et sont détaillés ci-dessous.

2.1.1 SO1 : Sélection des architectures d'émetteurs

L'objectif de cette étape est d'identifier les architectures d'émetteurs radiatifs les plus pertinentes pour une application en ferme conteneur en établissant des critères de comparaison

permettant de les évaluer de manière cohérente. Pour y parvenir, les étapes suivantes ont été réalisées :

- Recenser les technologies d'émetteurs radiatifs documentées dans la littérature scientifique
- Élargir la recherche à la littérature grise (fiches techniques, données fabricants, retours d'expérience industriels) pour les solutions commerciales disponibles sur le marché nord-américain.
- Établir des critères de comparaison communs aux trois technologies : réflectance solaire cible dans la bande 0,3–2,5 μm , émissivité dans la fenêtre atmosphérique 8–13 μm , complexité et accessibilité du procédé de fabrication, et coût estimé par unité de surface.
- Vérifier la faisabilité locale de fabrication et de caractérisation pour chaque prototype, en tenant compte des équipements disponibles à l'ÉTS et dans les installations locales partenaires.
- Obtenir des devis et estimer les coûts d'approvisionnement en matières premières pour les solutions nécessitant une fabrication en laboratoire.

Au terme de cette analyse, trois architectures ont été retenues, couvrant des niveaux de coût et de complexité de fabrication contrastés :

- Un filtre photonique multicouche $\text{SiO}_2/\text{HfO}_2$ déposé par évaporation par faisceau d'électrons, reproduisant le prototype de référence (Raman et al., 2014)
- Une structure nanoporeuse en oxyde d'aluminium anodique (OAA). Cette solution présente une émissivité sélective élevée dans la fenêtre atmosphérique à un coût de fabrication intermédiaire.
- Une peinture radiative commerciale blanche à haute réflectance solaire. Cette solution représente la borne basse de coût et la référence pratique pour un déploiement industriel à grande échelle.

Ce spectre technologique permet d'évaluer la pertinence de chaque architecture pour l'application FC et de quantifier le compromis entre performance spectrale et accessibilité.

2.1.2 SO2 : Caractérisation à l'échelle microscopique

Cette étape porte sur la fabrication en laboratoire et la caractérisation optique des trois architectures sélectionnées à la section 2.1.1. L'objectif est de quantifier les propriétés spectrales intrinsèques de chaque matériau : la réflectance solaire dans la bande 0,3–2,5 μm et l'émissivité thermique dans la fenêtre atmosphérique 8–13 μm , afin d'évaluer leur potentiel de refroidissement radiatif.

Deux instruments complémentaires sont utilisés. La spectrophotométrie UV-Vis-NIR, réalisée avec une sphère d'intégration, mesure la réflectance hémisphérique des échantillons sur le spectre solaire. La spectroscopie FTIR permet d'accéder à l'émissivité spectrale dans la fenêtre atmosphérique, en appliquant la loi de Kirchhoff pour convertir la réflectance mesurée en absorptivité. Ces données sont ensuite intégrées dans le modèle analytique du bilan radiatif (équation (3.1)) pour calculer la puissance de refroidissement nette théorique de chaque surface en conditions stationnaires et diurnes. Les objectifs spécifiques de cette étape sont :

- Mesurer expérimentalement la réflectance solaire et l'émissivité infrarouge de chaque prototype par spectrophotométrie UV-Vis-NIR et spectroscopie FTIR.
- Calculer la puissance de refroidissement nette théorique de chaque matériau en régime stationnaire, à partir des spectres mesurés et du modèle de bilan radiatif présenté au Chapitre 1.
- Comparer les performances simulées des trois architectures dans le contexte thermique d'une ferme conteneur, tel qu'établi à la section 1.2.

Cette étape a abouti à la soumission d'un article scientifique à la revue *Solar Energy* en avril 2026, présenté intégralement au Chapitre 3.

2.1.3 SO3 : Déploiement à l'échelle pilote

Cette étape assure la transition de l'échelle du laboratoire à l'échelle du système. Elle s'appuie sur les propriétés spectrales mesurées lors du SO2 pour dimensionner, instrumenter et déployer un système de refroidissement radiatif hydraulique sur la toiture de la ferme conteneur de l'ÉTS. Elle comprend deux volets :

Le premier est la conception et la mise en service d'un banc d'essai thermique extérieur, destiné à mesurer la puissance de refroidissement nette des échantillons en conditions réelles d'exposition diurne et nocturne sur le toit de l'ÉTS. Les données thermiques recueillies par thermocouple sont croisées avec les conditions météorologiques locales (température ambiante et irradiance solaire), ce qui permet de valider les prédictions du modèle analytique en tenant compte des échanges convectifs et des conditions climatiques locales.

Le second volet est le dimensionnement et l'installation du système pilote, incluant l'acquisition de quatre panneaux hydrauliques pour une surface active totale de 5,3 m², la conception d'un circuit autovidangeable (DrainBack) et l'intégration hydraulique au système thermique de la ferme. Cette étape permet de projeter les performances mesurées à l'échelle de l'échantillon vers une puissance de refroidissement exploitable à l'échelle du bâtiment. Les objectifs spécifiques de cette étape sont :

- Concevoir et fabriquer le banc d'essai extérieur, incluant le support mécanique, le circuit hydraulique instrumenté et le système d'acquisition de données, en tenant compte des contraintes d'exposition en toiture et des conditions climatiques locales.
- Valider expérimentalement la puissance de refroidissement nette des trois architectures en conditions réelles, en croisant les mesures thermiques du banc d'essai avec les données météorologiques locales.
- Dimensionner le système pilote hydraulique (surface active, débit, stratégie DrainBack) à partir des performances validées et des besoins thermiques de la ferme conteneur établis au Chapitre 2.
- Évaluer la faisabilité opérationnelle de l'intégration du système RSC sur la toiture de la ferme conteneur de l'ÉTS, en tenant compte des contraintes d'installation, de protection hivernale et de maintenabilité.

L'ensemble de ces travaux est présenté au Chapitre 4.

2.2 Données d'entrée du modèle et du dimensionnement

Les trois sous-objectifs définis à la section 2.1 reposent sur deux catégories de données d'entrée : des données climatiques, qui alimentent le modèle numérique développé au SO2

ainsi que le banc d'essai déployé au SO3, et des données thermiques, qui servent de référence au dimensionnement du système pilote dans le cadre du SO3. Cette section décrit les sources retenues, les hypothèses associées et leurs limites, afin de permettre l'interprétation des résultats aux chapitres 3 et 4.

Sur le plan climatique, la fenêtre d'intérêt est la période juin-septembre, durant laquelle la demande de refroidissement est maximale et le rayonnement solaire est le plus contraignant pour les émetteurs. Les séries horaires d'irradiance solaire incidente pour Montréal sont extraites de la base de données ERA5 sur l'année 2023 et constituent la variable d'entrée principale du modèle numérique développé au Chapitre 3. L'humidité relative et la nébulosité estivales, bien que non intégrées au modèle, sont documentées et discutées qualitativement : l'humidité réduit la transmittance de la fenêtre atmosphérique (section 1.3.3) et la nébulosité peut annuler partiellement ou totalement le potentiel radiatif lors des épisodes intenses. Ne retenir que l'irradiance solaire est une simplification délibérée, justifiée par la disponibilité des données et la volonté de produire une première estimation du potentiel annuel. En contrepartie, le modèle tend à surestimer la puissance de refroidissement nette disponible, ce qui doit être gardé à l'esprit lors de l'interprétation des résultats aux chapitres 3 et 4.

Sur le plan thermique, les besoins en refroidissement de la ferme servant de référence au dimensionnement du SO3 sont estimés à partir de modèles de simulation validés disponibles dans la littérature (Liebman-Pelaez et al., 2021; Song et al., 2023), en retenant les paramètres représentatifs du conteneur de l'ÉTS en termes de dimensions et de densité d'éclairage. En l'absence de mesures directes sur la ferme à ce stade, ces modèles constituent la seule base disponible pour établir le profil de charge annuel utilisé au dimensionnement.

2.3 Contribution attendue

Cette recherche aborde le refroidissement radiatif passif appliqué aux fermes conteneurs sous trois angles complémentaires : la caractérisation des matériaux, l'ingénierie du système et l'application en AEC.

Sur le plan expérimental, elle fournira la première caractérisation comparative de trois architectures d'émetteurs radiatifs, de la structure photonique de référence à la peinture

commerciale, associée à une caractérisation systématique des microstructures de chaque émetteur.

Sur le plan de l'ingénierie des systèmes, le dimensionnement du système pilote hydraulique, incluant la stratégie DrainBack adaptée au climat hivernal québécois et l'adaptation de plaques de refroidissement pour batteries automobiles, apportera des éléments méthodologiques concrets pour réduire les coûts d'investissement des systèmes de gestion thermique passive.

Sur le plan de la recherche en AEC, cette étude établira un cadre de dimensionnement applicable à d'autres fermes conteneurs, en fournissant des indicateurs quantitatifs sur la puissance de refroidissement exploitable par unité de surface de toiture selon le type d'émetteur et les conditions climatiques locales. Ces résultats permettront d'évaluer la pertinence du RSC comme complément ou alternative partielle aux systèmes CVCA mécaniques dans un contexte d'agriculture urbaine.

CHAPITRE 3

PASSIVE RADIATIVE COOLING FOR CONTAINER FARMS: PANEL DESIGN AND PERFORMANCE ASSESSMENT

Thomas Vrielynck ^a, Mathieu Gratuze ^b, Olivier Richard ^b, Ricardo Izquierdo ^b, Stéphane Gibout ^c, Didier Haillot ^a

^a ÉTS Montréal, Laboratoire des technologies de l'Énergie et de l'Efficacité Énergétique (L3E),

1100 rue Notre-Dame Ouest, H3C 1K3, Montréal, QC, Canada

^b ÉTS Montréal, Laboratoire des Communications et d'Intégration Microélectronique (LaCIME),

1100 rue Notre-Dame Ouest, H3C 1K3, Montréal, QC, Canada

^c E2S UPPA, LaTEP, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 64000 Pau, France

Article soumis pour publication, avril 2026

3.1 Abstract

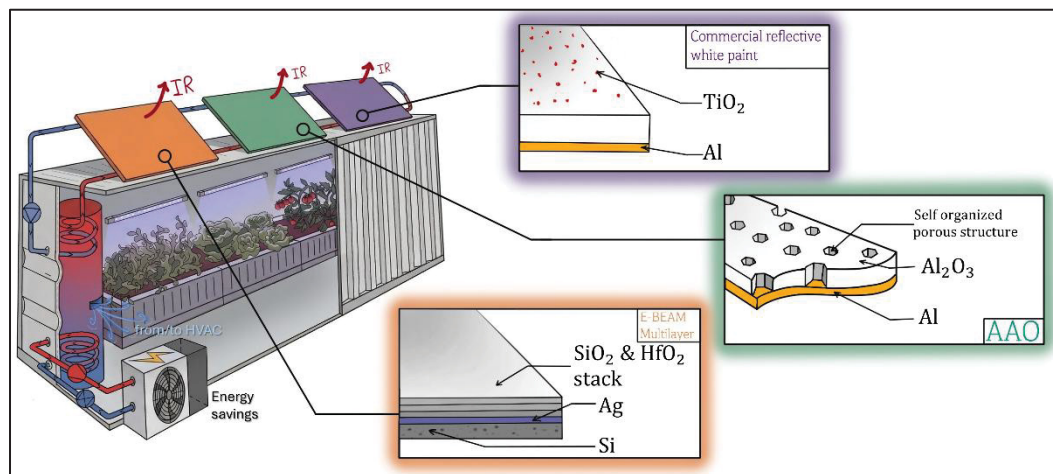


Figure 3.1 Graphical abstract

Container farms (CFs) with hydroponic systems are emerging as one solution for food production independent of outdoor environmental conditions. However, their high thermal insulation, while essential for climate control, traps the waste heat generated by internal

equipment, particularly LED lighting, leading to critical heat accumulation that drives most of the operational energy consumption.

This study evaluates Radiative Sky Cooling (RSC) as a passive thermal mitigation strategy for CFs linking the physical morphology of three emitter architectures to their spectral emission performance and then quantifying their annual cooling potential under a Canadian climate.

Three emitter architectures were characterized: a nanophotonic multilayer, an Anodic Aluminum Oxide (AAO) emitter, and a commercial white paint. Cross-sectional FE-SEM imaging and spectral reflectometry were used to relate their physical morphology to emissivity profiles within the Atmospheric Transmission Window (ATW). A simplified numerical framework was developed to assess the impact of an active fluid management on mitigating diurnal solar penalties for broadband emitters. Results were extrapolated over a full meteorological year in Montreal using a panel array of 5.2 m².

Over a full meteorological year in Montreal, the white paint array covers 6159 kWh_{th} and up to 35% of peak monthly cooling demand in winter and 6.8% at peak summer load. This outperforms both the nanophotonic multilayer (4671 kWh_{th}) and the AAO emitter (4710 kWh_{th}) and represents 18.6% of the annual cooling demand of the CF of 33198 kWh_{th}.

This study provides a transferable framework connecting emitter material characterization to large scale annual cooling performance. By demonstrating that commercial material can outperform engineered nanostructures, it lowers the barrier to adopting RSC in CFs.

Keywords: Radiative cooling, passive thermal management, low-tech design, building energy efficiency, Container farming

3.2 Introduction

The increasing frequency of extreme thermal anomalies driven by anthropogenic climate change has precipitated a critical rise in global space cooling demands, establishing a detrimental feedback loop of energy consumption and carbon emissions (IEA, 2018; W. Li et al., 2020). In response to these climatic instabilities, Controlled Environment Agriculture (CEA); specifically container farming (CF), has emerged as a resilient strategy to decouple

crop production from meteorological extremes and reduce supply chain complexities (Kaminski & Babbitt, 2024; Schmidt Rivera et al., 2023; N. Zhou & Liu, 2025).

However, CFs function as thermally isolated, opaque control volumes dominated by internal heat generation, distinguishing their energy balance paradigm from passive greenhouses (Song et al., 2023; N. Zhou & Liu, 2025). High-intensity artificial lighting (LEDs) and auxiliary equipment generate substantial sensible cooling loads, making thermal regulation the primary driver of operational energy consumption (Cai et al., 2025; E. J. Choi et al., 2025; Liebman-Pelaez et al., 2021; Song et al., 2023). Precise management of this thermal load is critical to maintain the Vapor Pressure Deficit (VPD) and prevent crop heat stress (Z. Nie et al., 2024). Currently, this regulation relies predominantly on energy-intensive vapor-compression HVAC systems, occasionally augmented by dedicated dehumidification units to decouple sensible and latent loads (E. J. Choi et al., 2025; Liebman-Pelaez et al., 2021). Given that the operational phase dictates 98% of a CF's carbon footprint (Guo et al., 2025), recent literature has explored various optimization strategies to mitigate this prohibitive energy intensity. These include optimizing the building envelope's thermal transmittance (Bu et al., 2024; Song et al., 2023), implementing air-side economizers (Song et al., 2023; Z. Yu et al., 2024), integrating internal highly reflective materials (Cai et al., 2025), and shifting lighting schedules to cooler nighttime hours (Song et al., 2023). Despite these advancements and the integration of IoT monitoring (Xiong et al., 2026) or photovoltaic-battery systems (Guo et al., 2025), severe grid dependency remains a critical barrier in off-grid settings. This underscores the urgent need for passive, scalable alternatives capable of mitigating lighting-induced thermal loads.

Radiative Sky Cooling (RSC) constitutes a passive thermal management strategy that dissipates terrestrial heat into the cold heat sink of outer space ($\sim 3\text{K}$) via the 8–13 μm Atmospheric Transmission Window (ATW) (Huang et al., 2024; Poredo et al., 2024; Xu et al., 2023). Achieving net diurnal cooling requires emitters to exhibit near-unity solar reflectance and high ATW hemispherical emissivity, adhering to rigorous spectral and structural optimizations (S.-W. Choi et al., 2025; Lakshmanan & Rajaram, 2025; S. Nie et al., 2025; Ran et al., 2026; F. Wang et al., 2025).

Current RSC technologies can be broadly categorized into precisely engineered nanostructures and random disordered media. While highly structured designs—such as lithographed

selective emitters, multi-layer photonic stacks, and adaptive metamaterials—demonstrate theoretically optimal cooling limits, their fabrication complexity fundamentally restricts large-scale deployment (W. Li et al., 2024; Lv et al., 2025; Yao et al., 2024; X.-Q. Yu et al., 2026). Consequently, scalable disordered media utilizing Mie scattering for broadband solar reflection have gained interest (Ni et al., 2025). This category includes polymers, hierarchical porous structures, and bio-inspired arrays (W. Fan et al., 2023, 2024; Hu et al., 2025; J. Li et al., 2025; L. Zhou et al., 2026). For immediate industrial applicability, dielectric particle coatings (e.g., Al_2O_3 in acrylic binders) offer highly accessible solutions, provided their particle size distribution is strictly optimized to maximize scattering efficiency (Lai et al., 2025; Lim et al., 2024; Yoon et al., 2024).

Despite these material advancements, RSC translation into CEA remains mainly unexplored and predominantly confined to greenhouse applications. Previous studies have examined thermodynamic synergies between RSC and greenhouse roofing, scalable polymer films to alleviate plant heat stress, and Janus spectrally selective glazing (Gholami et al., 2025; Huang et al., 2025; Jiang et al., 2025; Liu et al., 2019). However, to the best of our knowledge, the specific application of radiative emitters to CFs remains unexplored, leaving a critical gap regarding the feasibility of passive cooling to offset continuous, lighting-dominated thermal loads.

Accordingly, this study aims to quantify the potential of passive RSC as a viable thermal management strategy for containerized agriculture. The specific objectives are:

- to systematically compare the spectral optical properties and microstructural features of distinct RSC architectures
- to assess the steady-state thermal performance of these RSC architectures
- to project the potential energy savings for a standard agricultural container unit

The subsequent sections detail the fundamental theory and experimental protocols (Section 2), present microstructural and optical results (Section 3), and scale these metrics into a comprehensive dynamic CF case study utilizing an active fluid management strategy (Section 4).

3.3 Materials and methods

This section delineates the methodological approach employed to evaluate and compare the three RSC architectures, as summarized in Tableau 3.1. The investigation begins with the fundamental thermodynamic principles and energy balance equations governing sub-ambient cooling (Section 2.1). Subsequently, the technoeconomic design choices and fabrication protocols for the nanophotonic multilayer, the nanoporous AAO, and the commercial coating are detailed (Section 2.2). The methodology then transitions to the high-resolution microstructural analysis (Section 2.3) and the comprehensive spectral optical characterization protocols (Section 2.4). Finally, the numerical framework developed to translate these experimental spectral data into dynamic, system-scale cooling metrics for containerized agricultural systems is established (Section 2.5).

Tableau 3.1 Comprehensive experimental and analytical framework for the evaluation of the three RSC architectures

Sample	Photonic multilayer (raman et al., 2014)	Nanoporous alumina (aao)	Commercial cool roof paint
Fabrication method	E-beam evaporation	Controlled electrochemical anodization	Paint deposition
Microstructural characterization	Sem (cross-section): validation of nanometric thicknesses	Sem (surface/cross-section): pore diameter, periodicity and roughness	Sem (surface): particle distribution and roughness
Optical characterization	Uv-vis-nir (lambda 1050) & nir-fir (soc-100)		
Analytical objective	Theoretical performance benchmark	Evaluation of viability in container farms	

3.3.1 Radiative Sky Cooling: Fundamental Theory and Energy Balance

The thermal performance of a Radiative Sky Cooling (RSC) surface is governed by the instantaneous net power exchange between the terrestrial emitter and the surrounding environment. Under steady-state conditions, the net cooling power P_{cool} of an emitting area A at temperature T is defined by the global energy balance (Raman et al., 2014) in equation (3.1):

$$P_{cool}(T) = P_{rad}(T) - P_{atm}(T_{amb}) - P_{sun} - P_{cond+conv} \quad (3.1)$$

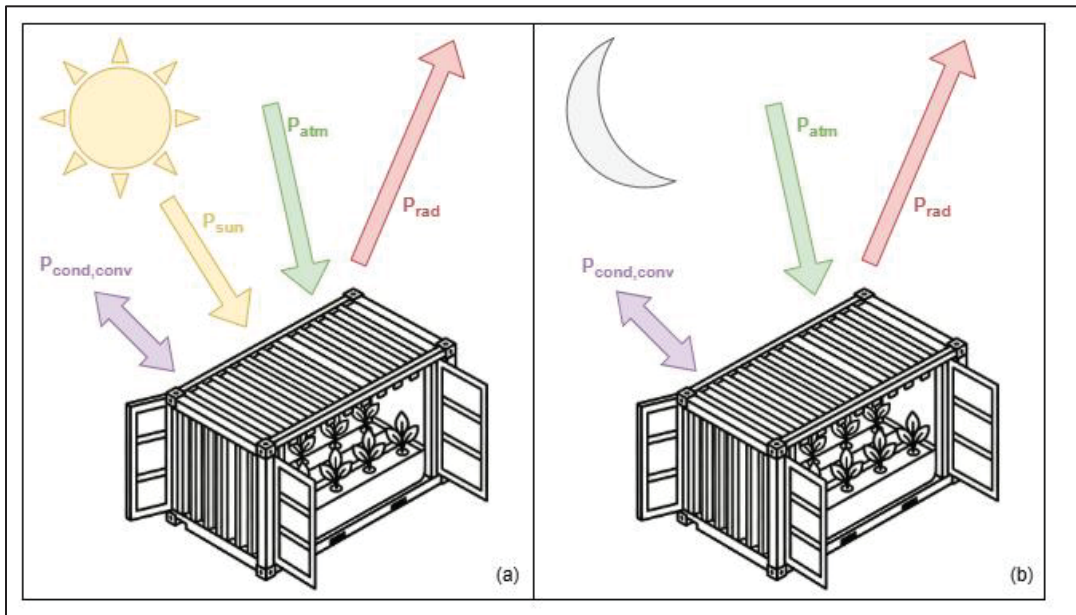


Figure 3.2 Schematic representation of the thermal energy balance for a radiative cooling emitter under (a) diurnal (daytime) and (b) nocturnal (nighttime) conditions. The vectors illustrate radiative, convective, and conductive heat fluxes

The individual radiative heat flux components (specifically the surface radiative power (P_{rad}), the absorbed atmospheric thermal radiation (P_{atm}), the absorbed solar irradiance (P_{sun})) are quantified using standard spectral and angular integrations:

$$P_{rad}(T) = A \int_0^\infty \int_\Omega \epsilon(\lambda, \theta) I_{BB}(T, \lambda) \cos \theta d\Omega d\lambda \quad (3.2)$$

$$P_{atm}(T_{amb}) = A \int_0^\infty \int_\Omega \epsilon(\lambda, \theta) \epsilon_{atm}(\lambda, \theta) I_{BB}(T_{amb}, \lambda) \cos \theta d\Omega d\lambda \quad (3.3)$$

$$P_{sun} = A \int_0^{\infty} \epsilon(\lambda, \theta_{sun}) I_{AM1.5}(\lambda) d\lambda \quad (3.4)$$

The non radiative heat exchange is quantified using a combined convective-conductive heat transfer coefficient (equation (3.5)):

$$P_{cond+conv} = Ah_c(T_{amb} - T) \quad (3.5)$$

Where:

- $\epsilon(\lambda, \theta)$ represents the surface spectral directional emissivity,
- $I_{BB}(T, \lambda)$ is the theoretical Planck blackbody spectral radiance,
- $\epsilon_{atm}(\lambda, \theta)$ is the atmospheric emissivity derived from the HITRAN database,
- $I_{AM1.5}(\lambda)$ is the standard AM1.5 solar spectrum
- h_c is the combined convective-conductive heat transfer coefficient.

Achieving continuous diurnal cooling demands costly, highly selective emitters to overcome massive solar gains. Rather than forcing continuous operation, this approach utilizes an active thermal decoupling strategy. An active fluid management system restricts circulation exclusively to periods when the panel is colder than the thermal storage, effectively isolating the useful nocturnal cooling from daytime solar penalties.

3.3.2 Design and Fabrication of RSC Emitters

Three radiative cooling architectures were selected to balance thermodynamic performance with the potential scalability, as visually presented in Figure 3.3. To establish a high-selectivity baseline, a nanophotonic multilayer stack was replicated (Raman et al., 2014). To address the prohibitive infrastructure costs in agricultural settings, two scalable alternatives were introduced: Nanoporous Anodic Aluminum Oxide (AAO) as a surface-enhanced emitter, and a commercial cool roof paint as the low-cost baseline for rapid container farm deployment. The specific substrates, fabrication methods, and critical process parameters for each architecture are summarized in Tableau 3.2

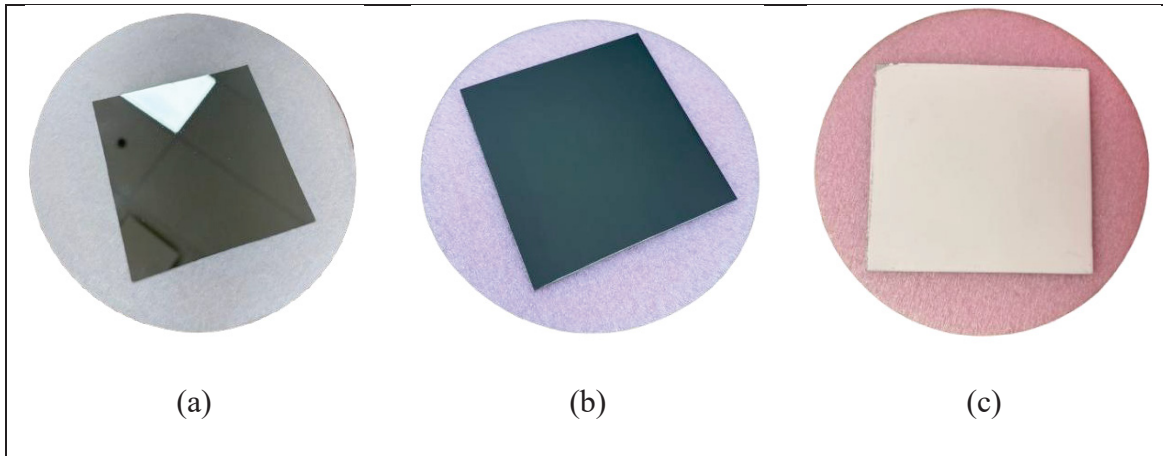


Figure 3.3 Photographs of the fabricated samples: (a) photonic multilayer, (b) AAO, and (c) commercial paint

Tableau 3.2 Summary of the substrates, fabrication methods, and key process parameters for the three evaluated Radiative Sky Cooling (RSC) architectures

Emitter architecture	Substrate material	Fabrication method	Key process parameters
Photonic multilayer	Single-side polished silicon wafer	Thermal & e-beam evaporation	20 nm ti / 200 nm ag mirror; Alternating HfO_2 and SiO_2 layers; 5×10^{-8} torr base pressure; 0,2 nm/s deposition rate.
Nanoporous aao	Non-polished aluminum 6061 alloy	Controlled hard anodization (ha)	Single-face treatment; Targeted oxide thickness of $40\mu\text{m}$
Commercial coating	Non-polished aluminum 6061 alloy	Manual application	Single elastomeric layer; Ambient temperature curing; No specialized deposition equipment.

3.3.2.1 Photonic Multilayer Sample Fabrication

The multilayer emitter was designed to replicate the selective spectral response proposed by (Raman et al., 2014). Its fabrication required a preliminary calibration phase, during which successive deposition tests were carried out to optimize the process parameters for each individual material layer. Additional multi-layer test samples were then deposited to characterize the parameter transitions between successive materials, ensuring the thickness reproducibility needed to achieve the target phase-matching conditions in the final stack.

3.3.2.2 Nanoporous AAO Sample Fabrication

The AAO specimen utilized an aluminum substrate chosen for its structural robustness, industrial availability, and superior atmospheric window emissivity compared to steel (Santamouris et al., 2011). The hard anodization was outsourced to the specialized company *Anodisation Expert*, with a target oxide layer thickness of 40 μm . Unlike standard anodization, the targeted Hard Anodization (HA) regime yields a dense hexagonal pore structure with thick cell walls, directly enhancing the broadband emissivity required for cooling (Fu et al., 2019; Lee et al., 2021). The unpolished substrate was deliberately retained to evaluate a "ready-to-scale" configuration, where inherent surface roughness facilitates the diffuse scattering of incident solar radiation.

3.3.2.3 Commercial Radiative Coating Sample Fabrication

Serving as a practical commercial benchmark, the white elastomeric coating was manually applied by the author as a single layer onto a cleaned aluminum substrate. No precise thickness control was applied, deliberately replicating the rapid, real-world deployment conditions typical of field installations. Once cured to a stabilized surface, this broadband emitter provides a highly accessible baseline for evaluating the thermal performance of RSC panels.

3.3.3 Microstructural Analysis

Tableau 3.3 Comparative synthesis of the microstructural and topographic characterization of the RSC architectures, including specimen preparation, instrumentation settings, and metrological objectives

Sample	Photonic multilayer	Aao	Cool roof commercial paint
Structural objective	Layer thickness validation & interface quality	Microstructure (thickness, density)	pore Particle distribution & thickness
I. Sub-surface characterization (cross-section view)			
Metrological goal	Nanometric layer thickness & stack integrity	Bulk thickness & pore characterization	Bulk thickness & sample homogeneity
Sectioning method	Argon ion milling (im4000 plus)	Mechanical sectioning & metallographic polishing	
Sem instrumentation	Hitachi su8230 (cold feg)	Hitachi tm3000 (tabletop sem)	
Imaging parameters	High-magnification @ 15 kv	Bse/se @ 15 kv & edx analysis	
ii. Surface characterization (top view)			
Metrological goal		Structural characterization (pore size and density)	Medium characterization (particle size and distribution)
Sem instrumentation	N.a.	Hitachi tm3000 (tabletop sem)	
Imaging parameters		Bse/se @ 15 kv & edx analysis	

A comprehensive microstructural characterization was performed to validate the geometric fidelity and morphological homogeneity of the fabricated emitters. As detailed in Tableau 3.3,

the experimental protocols were bifurcated into cross-sectional and top-view evaluations to capture the distinct structural requirements of each sample.

3.3.3.1 Cross-sectional Metrology and Interface Integrity

For the photonic multilayer, precise measurement of individual nanometric layers was critical. To resolve these features without inducing the thermal deformation typical of mechanical cleaving, specimens were prepared via Argon-ion milling, ensuring an artifact-free, atomic-scale cross-sectional plane. To mitigate electron beam charging during imaging, a conformal 3 to 5 nm Platinum (Pt) layer was sputtered (Quorum Q150T) over the stack.

Conversely, the AAO and commercial paint samples underwent mechanical sectioning. Specimens were embedded in a stabilizing resin and subjected to sequential metallographic polishing to achieve planar surfaces for bulk thickness verification. Due to the highly insulating nature of its polymer matrix, the commercial paint was additionally coated with a sputtered Gold (Au) layer (with a Sputter Coating Quorum K550X).

3.3.3.2 Surface Topography and Chemical Mapping

The surface morphology of the scalable architectures (AAO and commercial paint) was evaluated using SEM coupled with Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX). This combined approach facilitated high-resolution chemical mapping, to confirm the spatial homogeneity of the anodic oxide composition and the paint's pigment distribution.

3.3.4 Spectral Optical Characterization

To evaluate the spectral selectivity and radiative potential of the fabricated emitters, reflectance measurements were conducted across the solar and infrared spectra. All optical characterizations were performed at the FSCEL laboratory (Polytechnique Montréal) on 1"×1" specimens. The measurement protocols (Tableau 3.4) were tailored to the optical nature of each sample.

Tableau 3.4 Summary of the spectral optical characterization protocols, detailing the specific optical properties measured, instrumentation, and acquisition parameters across the solar and thermal infrared domains

Emitter architecture	Spectral domain	Measured optical property	Instrumentation	Acquisition parameters
Multilayer	Uv-vis-nir	Specular reflectance	Cary 7000 ums	10° to 60° (10°step), S & p pol., 300 nm/min 4 nm bandwidth
	Mir-fir	Directional reflectance	Nicolet 6700 ftir + soc-100	10° to 60° (10°step) 1300 k ir source 4 scans/point, Au reference
AAO & white paint	Uv-vis-nir	Total hemispherical reflectance	Perkinelmer lambda 1050 + integrating sphere	300 nm/min scan rate 4 nm bandwidth, 1 nm interval
	Mir-fir	Hemispherical directional reflectance	Nicolet 6700 ftir + soc-100	10° to 60° (10°step) 1300 k ir source 4 scans/point, Au reference

3.3.4.1 Spectrophotometry and Reflectometry

For the highly specular nanophotonic multilayer, angular reflectance was measured to accurately assess the angular stability of the interference stack. Conversely, the nanostructured AAO and white paint emitters exhibit an inherently diffuse scattering behavior due respectively to their random pore structure and disordered pigment distribution, which makes the use of an integrating sphere strictly necessary in the UV-Vis-NIR domain to capture the full hemispherical reflectance. In the long-wave infrared, all samples were characterized using

the FTIR spectrometer coupled with a hemispherical directional reflectometer to evaluate emission behaviors within the atmospheric transparency window.

3.3.4.2 Reflectance to Emissivity Conversion

The spectral emissivity (ϵ) is derived from all the measured directional-hemispherical reflectance (R) through Kirchhoff's Law of Thermal Radiation (equation (3.6)). Assuming an opaque medium ($\tau \approx 0$) under local thermodynamic equilibrium, the relationship is defined as:

$$\epsilon(\lambda, \theta) = 1 - R(\lambda, \theta) \quad (3.6)$$

This conversion is physically validated by the high thermal conductivity of the underlying substrates and their strict optical opacity in the targeted spectral ranges, which guarantees a negligible temperature gradient across the active surface and simplifies the energy balance. Finally, to account for the unpolarized nature of sky radiation, the total unpolarized emissivity is calculated as the arithmetic mean of the measured S and P polarization components.

3.3.5 Numerical Modeling and CEA Integration Framework

To complement the experimental characterization, a numerical framework was established to translate the measured spectral emissivity profiles into macroscopic thermal load mitigation metrics for containerized agricultural units. This framework is divided into two sequential evaluation stages.

3.3.5.1 Intrinsic Performance and Active Decoupling Strategy

The initial stage assesses the fundamental cooling potential of the materials and evaluates the necessity of thermohydraulic regulation. First, a steady-state radiative exchange analysis quantifies the instantaneous net cooling power ($P_{net-rad}$) by solving the basic energy balance under a theoretical thermal equilibrium between the panel and the ambient environment (equation (3.7)):

$$P_{net-rad}(T) = P_{rad}(T) - P_{atm}(T_{amb}) - P_{sun} \quad (3.7)$$

Building upon these steady-state limits, a short-term transient simulation is then introduced to evaluate the dynamic response of the emitters. By comparing a continuous fluid circulation regime against an active, thermally regulated pumping logic where circulation is strictly restricted to periods when the panel is colder than the storage fluid. This stage physically quantifies the absolute necessity of active thermal decoupling to bypass daytime solar penalties.

3.3.5.2 Dynamic System-Scale Integration and Energy Harvesting

Relying on the validated active decoupling strategy, the second stage assesses the macroscopic energy impact over a full meteorological year (Montreal, 2023). The transient model couples the regulated RSC array to an idealized TES unit representing the internal climate loop of a container farm. Driven by time-series meteorological data, the total cooling energy harvested is integrated over time to evaluate the proportion of autonomous mitigation of containerized agricultural heat loads over the year.

3.4 Experimental results

This section evaluates three RSC architectures. Following the methodology described in Section 3.2., an examination of the microstructure and surface homogeneity of each sample was conducted to validate their physical construction. Second, we present a comparative analysis of their spectral optical properties, directly linking their structural morphology to their thermodynamic cooling potential for reducing heat loads in containerized farming applications.

3.4.1 Microscopic and Structural Characterization

3.4.1.1 Photonic Multilayer Sample

Cross-sectional FE-SEM analysis, performed on specimens prepared via Argon-ion milling (Figure 3a), was utilized to evaluate the geometric fidelity of the electron-beam evaporation process. As clearly depicted in the high-magnification micrographs (Figure 3.4 b and c), the alternating SiO_2 and HfO_2 layers exhibit sharp, well-defined dielectric interfaces, visually validating the deposition stability.

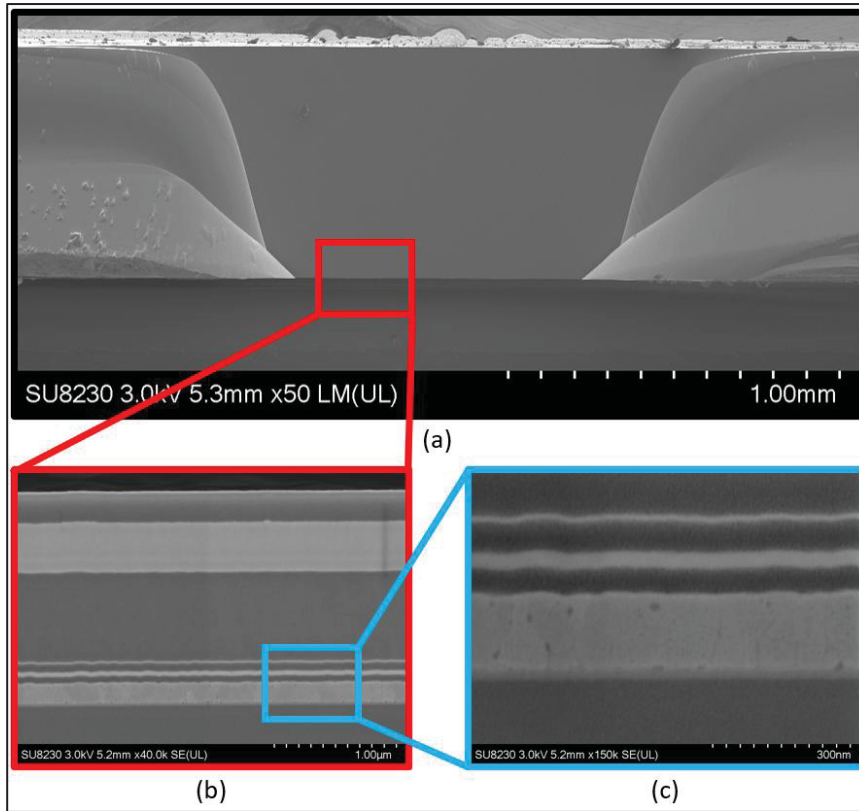


Figure 3.4 (a) Ion milling effect on the sample (750 μm thick Single Side Polish (SSP) silicon wafer (b) alternative E-beam deposition of SiO_2 and HfO_2 at (x40k) (c) SEM observation of the sample at high magnitude (x150k)

Quantitative metrology extracted from these cross-sections is detailed in Tableau 3.5. The analysis demonstrates that absolute thickness deviations (Δd) remain tightly constrained across the multilayer stack, ranging from a minimum of 2 nm to a maximum of 74 nm. To evaluate the optical impact of these variations, the resulting phase shift ($\Delta\phi$) is calculated as follows:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta d}{\lambda} \quad (3.8)$$

At the primary emission target wavelength of $\lambda = 9.5\mu\text{m}$, the maximum observed deviation ($\Delta d = 74 \text{ nm}$) induces a phase error of less than 1%. This minimal phase shift ensures that the constructive interference required for optimal emission within the atmospheric window remains intact.

Tableau 3.5 Comparison between theoretical target thicknesses and effective thicknesses measured via cross-sectional FE-SEM and image analysis. Absolute deviation for each individual layer is providing quantitative basis for the subsequent phase-matching

Layer material	Target thickness (nm)	Measured thickness (nm)	Absolute deviation (nm)
<i>SiO₂</i>	230	261	31
<i>HfO₂</i>	485	411	74
<i>SiO₂</i>	688	734	46
<i>HfO₂</i>	13	18	5
<i>SiO₂</i>	73	64	9
<i>HfO₂</i>	34	39	5
<i>SiO₂</i>	54	52	2
<i>Ag</i>	200	162	38
<i>Ti</i>	20	27	7

Furthermore, the 261 nm Ag back-reflector safely exceeds the skin depth required for total infrared opacity, while the 18 nm Titanium (Ti) interface layer successfully ensures robust substrate adhesion.

3.4.1.2 Nanoporous AAO

The structural and chemical integrity of the HA coating was comprehensively validated through SEM imaging coupled with EDX spectroscopy. As illustrated in the cross-sectional analysis (Figure 3.5a), a uniform oxide layer is conformally grown on the Al 6061 substrate. The thickness of this anodic layer was measured at $42.6 \mu\text{m}$ via cross-sectional image analysis.

The corresponding EDX elemental mapping confirms the expected chemical phase transformation with the Oxygen (O) and Sulfur (S) signals strictly confined to the outer Al_2O_3 oxide layer.

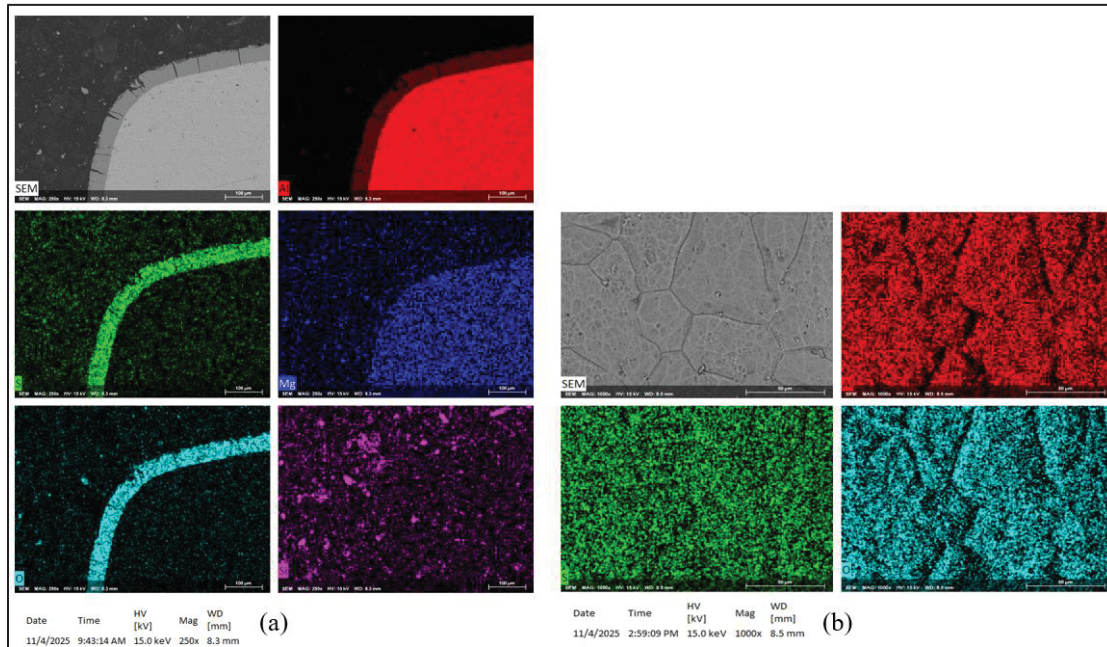


Figure 3.5 SEM-EDS elemental mapping of the AAO cross-section (a) and surface (b)

Top-surface observations (Figure 3.5b) characterize the macroscopic topography of AAO layer. The SEM imaging reveals a micro-fissured surface featuring a characteristic cellular pattern, which is the expected signature of a thick hard anodization process (Lee et al., 2021). Despite this physical segmentation, the corresponding planar EDX mapping demonstrates a high degree of chemical homogeneity across the coating. Crucially, from an optical perspective, this rough topography, with a dimension near ATW wavelength, plays a fundamental role in the material's thermal performance by promoting the high thermal emissivity required for efficient radiative heat dissipation (Lee et al., 2021)

3.4.1.3 Commercial Radiative Coating

Cross-sectional SEM and EDX mapping (Figure 3.6) reveal a highly homogeneous internal structure with a constant 1.18 mm thickness. Elemental mapping confirms a sharp Aluminum substrate boundary beneath a uniform polymer binder phase, as indicated by the Oxygen and Silicon distributions. The Gold (Au) signal is strictly a standard sputter-coating artifact.

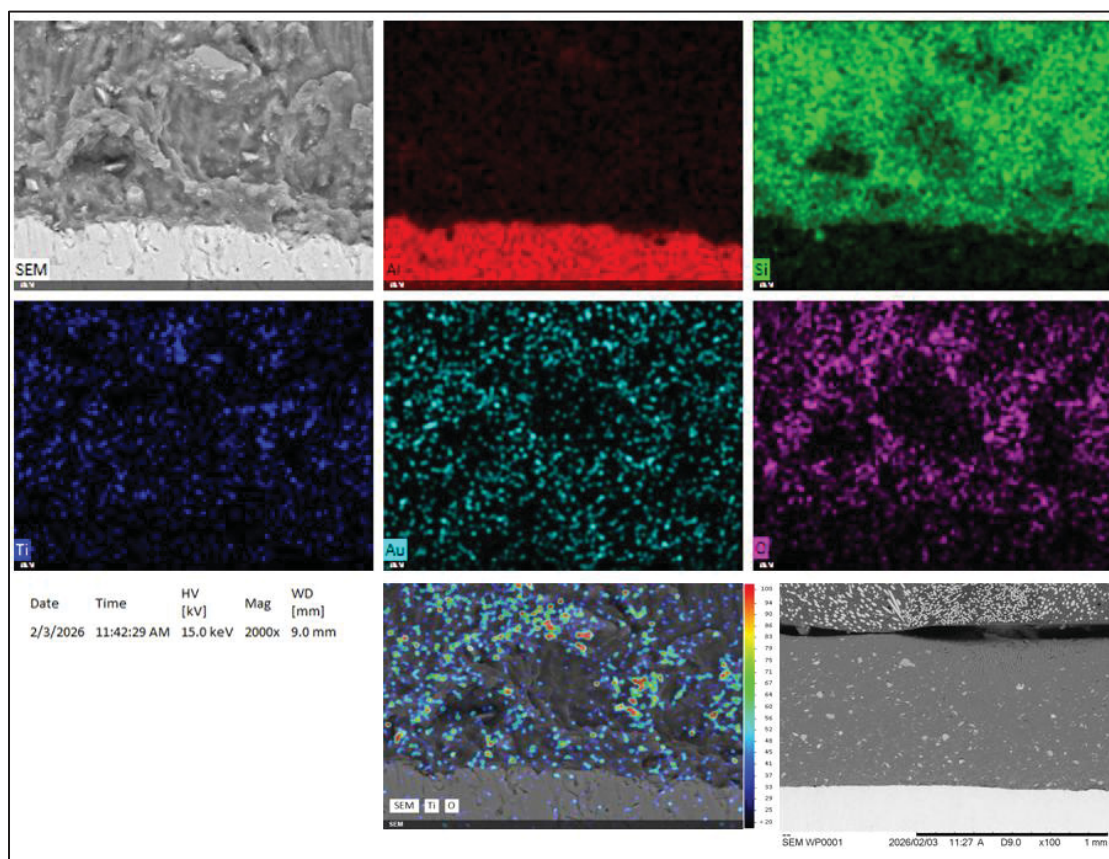


Figure 3.6 SEM-EDS elemental mapping of cross-sectional analysis of the white elastomeric coating

Crucially for optical performance, the Titanium and Oxygen map with intensity overlay highlight a dense, randomized distribution of high-refractive-index pigments (likely TiO_2) featuring localized high-concentration clusters. Dispersed within the homogeneous binder, this dense localized packing triggers the multiple scattering regime required to maximize broadband solar reflectance.

3.4.2 Spectral Characterization

The spectral optical properties of the three evaluated architectures were characterized according to Section 2 methods to determine their thermodynamic potential for radiative cooling. Figure 3.7 presents this comprehensive spectral distribution, directly comparing the experimental emissivity profiles across both the solar and IR domains.

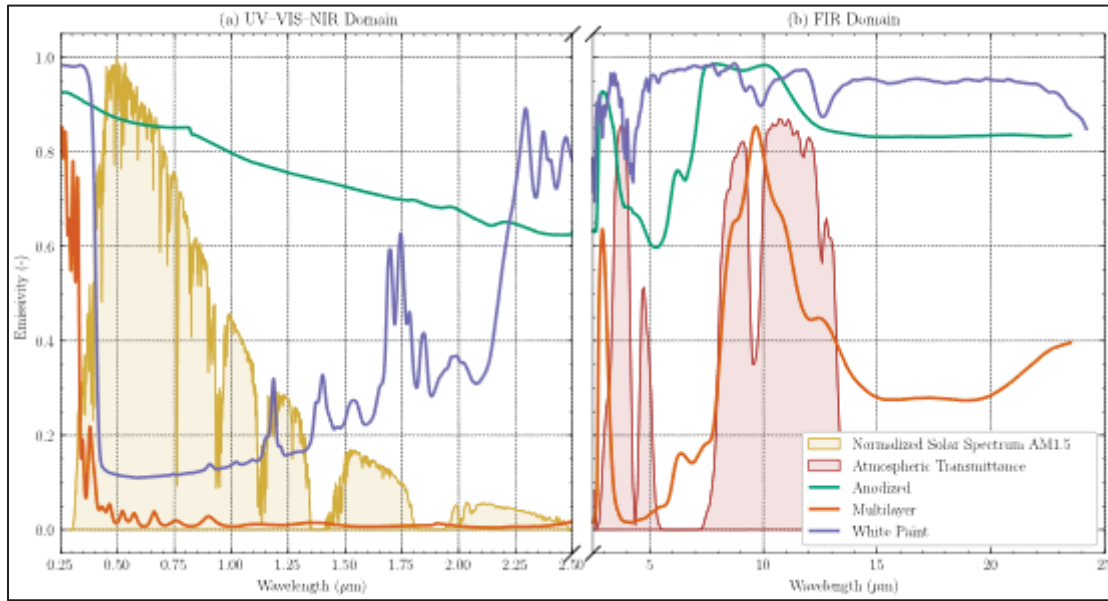


Figure 3.7 Spectral characterization of the three RSC architectures. (a) Emissivity profiles in the UV–Vis–NIR domain ($0.25 \mu\text{m}$ to $2.5 \mu\text{m}$) overlaid with the normalized AM1.5 solar spectrum. (b) Emissivity profiles in the FIR domain ($2.5 \mu\text{m}$ to $25 \mu\text{m}$) compared against the atmospheric transmittance window ($8 \mu\text{m}$ to $13 \mu\text{m}$)

3.4.2.1 UV-VIS-NIR Domain

As depicted in the left panel of Figure 3.7(a) ($0.25 < \lambda < 2.5 \mu\text{m}$), the multilayer and the commercial white paint sample demonstrate robust rejection of incident solar radiation. The multilayer stack maintains a near-zero absorptivity throughout the peak solar irradiance wavelengths, effectively decoupled from solar heat gain by its Ag back-reflector. Similarly, the commercial paint maintains an absorptivity below 0.2 across the visible spectrum, driven by efficient Mie scattering from its dense pigment distribution. Conversely, the AAO structure

exhibits high near-unity absorption in the UV, declining to approximately 0.6 in the NIR. As correlated with the structural analysis, physical inhomogeneities comparable to incident wavelengths act as scattering centers that facilitate parasitic absorption.

3.4.2.2 FIR Domain

In the mid-to-far infrared regime, shown in the right panel of Figure 3.7b ($2.5 < \lambda < 25\mu\text{m}$), the materials exhibit distinct emission strategies. Only the multilayer functions as a truly selective emitter, achieving a dominant emissivity peak of 0.85 centered at $9.5\mu\text{m}$ while effectively suppressing parasitic emission outside the ATW. In contrast, both the AAO and the commercial paint behave as broadband emitters, maintaining high emissivity across the entire measured FIR spectrum. The AAO reaches a mean emissivity of 0.92 within the ATW but remains similarly elevated outside this window. The commercial paint exhibits a near-constant emissivity profile approaching 1.0 across the full spectrum. While this broad emission facilitates robust radiative exchange through the ATW, the high emissivity maintained outside this window implies equally high absorptivity in those bands, where the atmosphere is optically thick and emits strongly downward. Consequently, both broadband emitters absorb a significant fraction of the incident atmospheric thermal radiation outside the ATW, generating parasitic heat gains that partially offset their nocturnal cooling potential compared to the spectrally selective multilayer architecture.

3.5 Case Study: Numerical Simulation of Cooling Potential for Container Farming

In this section, the experimental optical measurements are extrapolated to a full panel-scale simulation, accounting for the thermal inertia of the radiative surface and its coupling to a TES unit. An active fluid circulation management strategy is implemented to prevent parasitic solar heat gains from compromising the system's cooling performance during daytime operation.

3.5.1 Transient System Modeling

To transition from an idealized radiative power balance described in equation (3.1) to a realistic operational assessment, a transient nodal thermal model was developed. The model couples an RSC panel to an idealized TES unit, as schematically represented in Figure 3.8, and integrates the principal heat exchange mechanisms governing the system dynamics. On this figure, double arrows represent the physical water flow circulating within the closed loop, while single arrows denote the power components involved in the energy balances of the TES and the RSC panel.

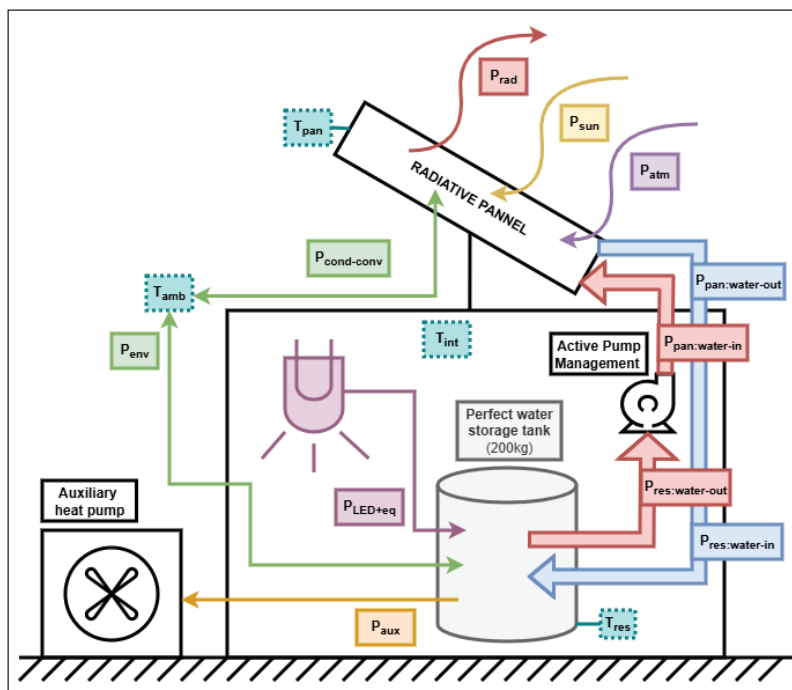


Figure 3.8 Schematic representation of the numerical model

The following assumptions are adopted throughout:

- the radiative panel is treated as a single thermal mass with uniform temperature T_{pan} ;
- the TES is modeled as a perfectly insulated water tank: all thermal losses to the surroundings are neglected;
- the internal load P_{LED+eq} , representing the sensible heat injected by LED lighting and ancillary equipment, is determined by the lighting schedule, and dissipated into the thermal storage tank;
- the heat transfer fluid exits the panel at T_{pan} and exits the reservoir at T_{res} ;
- the ambient temperature T_{amb} and solar irradiance G follow 2023 hourly Montréal meteo data from ERA5 database.

The panel energy balance is defined by (equation (3.9)):

$$m_{pan} c_{pan} \frac{dT_{pan}}{dt} = -P_{rad} + P_{atm} + P_{sun} + P_{cond-conv} + P_{water} \quad (3.9)$$

where m_{pan} and c_{pan} are the mass and effective specific heat capacity of the composite radiative structure, assumed constant over the temperature range of interest. All flux terms appearing in this balance have been defined and characterized in Section 2. The $+P_{water}$ term reflects that when the pump is active ($T_{pan} < T_{res}$), the warm fluid leaving the reservoir deposits energy at the panel surface. This reduces the net radiative cooling capacity but simultaneously extracts heat from the TES. As illustrated in Figure 3.8, the fluid circuit involves four boundary fluxes at the panel and reservoir interfaces. Under hypothesis (4), these reduce to a single net exchange term (equation (3.10)):

$$P_{water} = \varepsilon \dot{m} c_{wat} (T_{res} - T_{pan}) = \left(1 - e^{-\frac{UA_{HX}}{\dot{m} c_w}}\right) \dot{m} c_{wat} (T_{res} - T_{pan}) \quad (3.10)$$

where ε is the heat exchanger effectiveness evaluated by the NTU method and \dot{m} the fluid mass flow rate.

The TES energy balance is defined by (equation (3.11)):

$$m_{res} c_{wat} \frac{dT_{res}}{dt} = P_{load} - P_{chill} \quad (3.11)$$

The term P_{load} represents the total aggregated thermal load on the container minus the power from the composite radiative structure, expressed as:

$$P_{load} = P_{LED+eq} + P_{env} + P_{water} \quad (3.12)$$

To simplify the model, we assume a perfect heat exchange between the container's indoor air and the TES unit. Consequently, all components of P_{load} are directly coupled to the TES. Within this total load, P_{env} is the net conductive and radiative flux through the container envelope, calculated using the sol-air temperature ($T_{sol-air}$) method as described in the ASHRAE Handbook:

$$P_{env} = h_o(T_{sol-air} - T_s) = h_o[T_o + \frac{\alpha E_t}{h_o} - \frac{\varepsilon \Delta R}{h_o} - T_s] \quad (3.13)$$

In (Eq 3.14), α is the solar absorptance of the surface, E_t the incident solar radiation, h_o the outer surface heat transfer coefficient (convection and long-wave radiation), T_o the outdoor air temperature, T_s the surface temperature, ε the hemispherical emittance, and ΔR the difference between incident long-wave radiation from the sky and surroundings and that emitted by a blackbody at T_o . Due to the perfect coupling assumption, this envelope flux acts directly on the TES as a free cooling source in winter and a parasitic load in summer. The P_{LED+eq} is a schedule-based power input injected directly into the TES, combining a constant ancillary equipment load P_{eq} with a time-varying lighting contribution P_{LED} , active during two successive 9-hour ON / 3-hour OFF cycles per day. The auxiliary heat pump activates only when $T_{res} \geq T_{int}$, extracting the residual load from the TES that the RSC panel cannot passively cover:

$$P_{chill} = \begin{cases} P_{LED+eq} + P_{env} - P_{water} & \text{if } T_{res} \geq T_{int} \\ 0 & \text{if } T_{res} < T_{int} \end{cases} \quad (3.14)$$

where T_{int} is the optimal agronomic setpoint temperature for the container interior. Under the perfect coupling assumption, T_{res} is constrained to remain below T_{int} : whenever the storage temperature exceeds this threshold, the auxiliary chiller activates to extract the surplus thermal

load and maintain the growing conditions required for crop health. To prevent reverse heat transfer, the circulation pump is governed by:

$$\text{Pump ON} \Leftrightarrow T_{pan} < T_{res} \quad (3.15)$$

This conditional strategy ensures that fluid circulates only when the panel provides a net cooling effect on the reservoir, decoupling the total radiative cooling capacity from the effective energy stored in the TES. When the pump is OFF, $P_{water} = 0$ in the previous equations.

3.5.2 Comparative Analysis of Cooling Potential

Before engaging the full transient model, a steady-state analysis first isolates the radiative behavior of each material under continuous solar exposure, establishing the baseline thermal penalties that motivate the active pump management strategy

3.5.2.1 Steady-State Baseline and Active Decoupling

Over a full 24-hour cycle of steady-state radiative-only analysis ($P_{cond-conv} = 0$) for the sole RSC surface, as presented in Figure 8, all three surfaces exhibit a baseline nighttime net radiative emission of approximately -100 W/m^2 , with the broadband emitters (white paint and AAO) marginally outperforming the multilayer in terms of nocturnal cooling flux. At solar noon, Figure 8a reveals highly divergent responses to solar irradiance. The selective multilayer naturally resists solar gains, with $P_{sun} = 63 \text{ W/m}^2$ and a dominant radiative emission of $P_{rad} = -144 \text{ W/m}^2$, maintaining a net cooling regime throughout the day. Conversely, the broadband emitters absorb massive solar loads: the white paint reaches $P_{sun} = 268 \text{ W/m}^2$ against a radiative emission of only $P_{rad} = -342 \text{ W/m}^2$, while the anodized AAO peaks at $P_{sun} = 747 \text{ W/m}^2$ with $P_{rad} = -315 \text{ W/m}^2$. This intense solar absorption shifts the broadband materials into a severe daytime heating regime (Figure 8b), peaking at approximately $+160 \text{ W/m}^2$ for the white paint and $+640 \text{ W/m}^2$ for the AAO at solar noon, generating a profound parasitic heat load. The integration of these instantaneous heat fluxes over a complete 24-hour cycle

yields the cumulative daily energy balance, summarizing the macroscopic impact of these daytime penalties (Table 7)

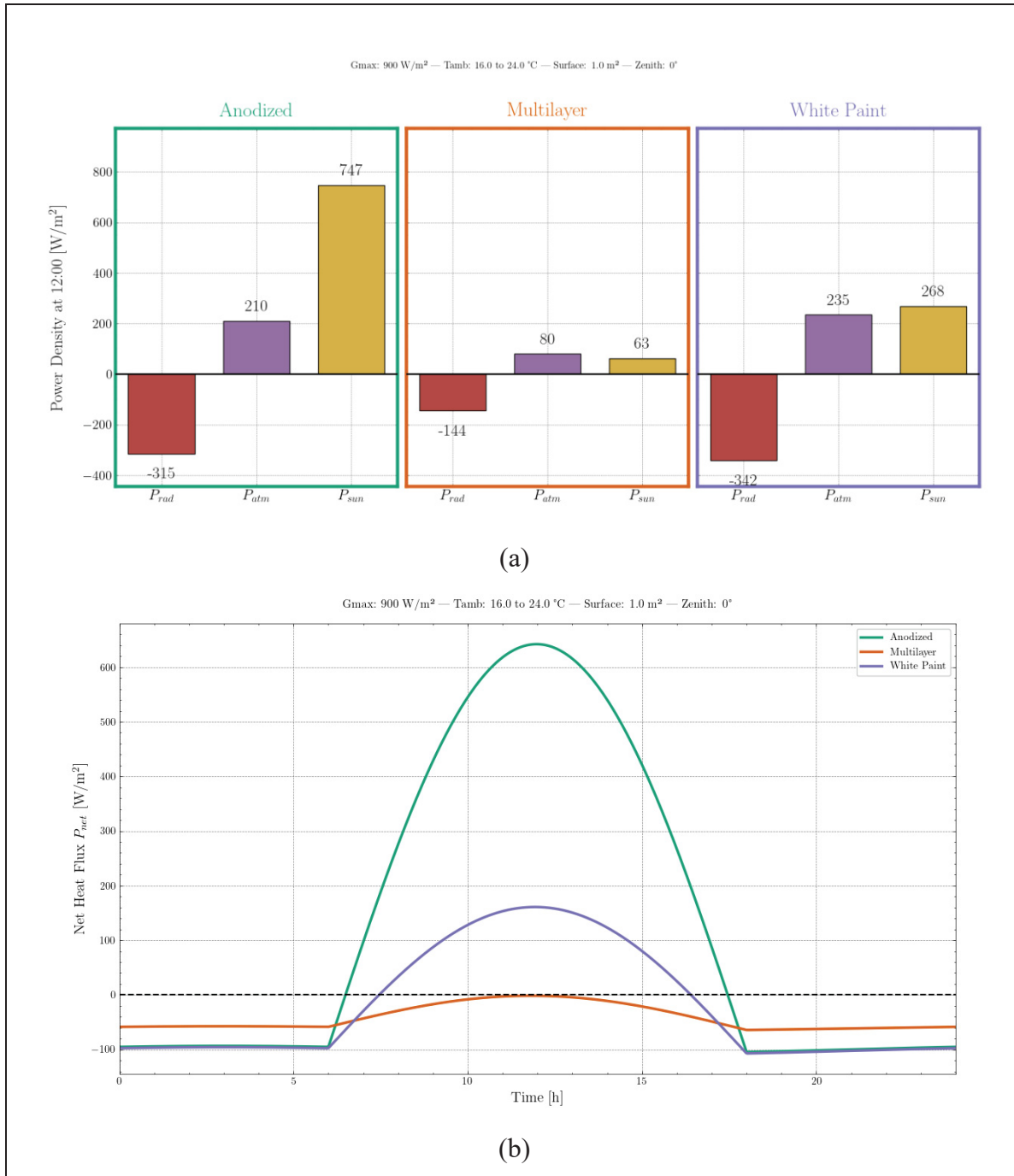


Figure 3.9 Comparative steady-state radiative cooling performance. (a) Continuous 24-hour temporal evolution of the net heat flux ($P_{net-rad}$). (b) Specific power density breakdown at solar noon (12:00)

The integration of these instantaneous heat fluxes over a complete 24-hour cycle yields the cumulative daily energy balance, summarizing the macroscopic impact of these daytime penalties (Tableau 3.6).

Tableau 3.6 Cumulative daily energy balance and resulting thermal regime for each material under steady-state, continuous 24-hour exposure

Material	Daily energy balance (kWh/m²/day)	Net thermal impact
Anodized aluminum	3.297	Heating
Multilayer	-0.997	Cooling
White paint	-0.414	Cooling

While the selective multilayer maintains a continuous, stable cooling regime, the broadband emitters are significantly affected by environmental conditions. The white paint still manages to extract a net cooling yield over a full day, but the AAO experiences such massive daytime heat accumulation that its nocturnal performance vanishes.

Consequently, to effectively harness the superior nocturnal emissivity of these broadband materials without succumbing to their diurnal thermal penalties, an active pump management strategy is strictly required as presented in equation (3.14). The 120-hour dynamic simulations presented in Figure 3.10 illustrate the system's operational behavior under representative winter (January, Figure 3.10a) and summer (July, Figure 3.10b) conditions. In both seasons, the pump control logic successfully decouples the RSC panel from the TES during daytime hours, quarantining solar absorption and preserving the cooling reservoir for nighttime discharge.

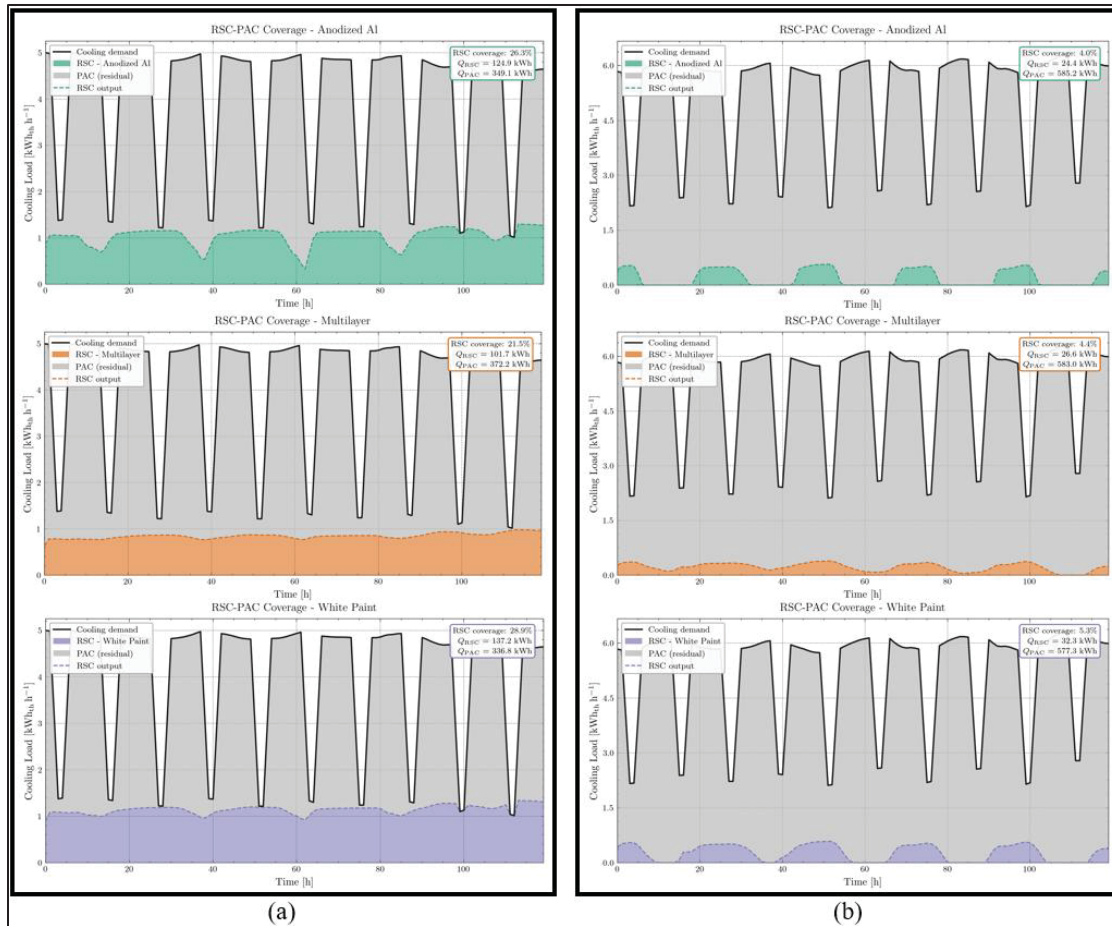


Figure 3.10 RSC and auxiliary heat pump simulated cooling load coverage over 120 hours in winter (a) and summer (b) for the three emitter materials

The seasonal contrast is pronounced. In January, all three materials achieve RSC coverage fractions between 21.5% and 28.9%, with the white paint delivering the highest offset ($Q_{RSC} = 137.0$ kWh, 28.9% coverage) and the multilayer the lowest ($Q_{RSC} = 101.7$ kWh, 21.5%). In July, coverage collapses to 4.0–5.3% across all materials, as the cooling demand nearly doubles while shorter, warmer nights drastically reduce the available radiative cooling window. In both seasons, the white paint consistently outperforms the multilayer, while the anodized aluminum occupies an intermediate position.

In all cases, the auxiliary heat pump assumes the dominant share of the thermal load, confirming that RSC operates as a meaningful but partial offset rather than a standalone cooling solution.

3.5.2.2 Integration Potential for a Container Farm in Montreal

Building upon the fundamental necessity of active thermal decoupling demonstrated over the 120-hour evaluation, the analysis is scaled to a full meteorological year to definitively determine the optimal material solution for a real-world deployment. Having already procured an experimental Radiative Sky Cooling (RSC) array of 5.2 m², this annual simulation serves as the primary decision-making tool to identify which of the three emitter technologies will maximize passive cooling when integrated into a CF located in Montreal, Canada. The system boundary conditions and operational logic are summarized in Tableau 3.7.

Tableau 3.7 System parameters, physical values, and boundary conditions for the annual dynamic container farm simulation

Parameter	Value	Description
Array surface area	5.2 m ²	Physical size of the experimental rsc array deployed.
Tes	250 kg	Perfectly insulated tes (from experimental size).
Internal thermal load	Schedule-based	Sensible heat injected into the tes from three sources: led lighting (3 880 w, active 18 h/day), ancillary equipment (51 w/m ²), and dehumidification units (143 w/m ²). Envelope conduction is coupled directly to the tes, with u-values of 0.43 w/m ² /k (walls & roof) and 0.18 w/m ² /k (floor), and a fixed interior setpoint of 22 °c.
Mass flow rate	0.5 kg/s	Constant circulation rate of the heat transfer fluid when the pump is active.

Tableau 3.7 System parameters, physical values, and boundary conditions for the annual dynamic container farm simulation (suite)

Parameter	Value	Description
Meteorological data	Era5 (hourly)	Ambient temperature and global horizontal irradiance data for montreal (2023).
Operational logic	Active pump management	Circulation strictly restricted to periods where $T_{panel} < T_{res}$ to prevent solar heating.
Thermal constraints	0°C min $T_{int} = 22^{\circ}C$ max	Pump deactivated at 0°C to prevent freezing; Auxiliary chiller instantly activated when $T_{res} > T_{int}$ to maintain optimal agronomic conditions.

The annual simulation in Figure 3.11 confirms that passive RSC cooling covers only a fraction of the total cooling demand, with the remainder supplied by the auxiliary chiller. A strong seasonal dependency governs both the total cooling requirement and the passive contribution. Total demand varies significantly across the year, peaking at approximately 3 200 kWh·month⁻¹ in July and dropping to a minimum of 2 000 kWh·month⁻¹ in February. This seasonal fluctuation in demand is compounded by an inverse trend in RSC efficiency: white paint achieves its highest autonomy during winter, covering approximately 35% of the monthly cooling requirement in January and 36% in February, before deteriorating sharply to roughly 7% in July as rising ambient temperatures suppress the net radiative cooling rate. Across all months, white paint consistently delivers the highest passive fraction among the three materials, confirming that the added cost of engineered selective emitters is not warranted for this application. Two literature benchmarks are shown for reference. The Liebman-Pelaez reference line at 2273 kWh per month corresponds to a container farm cooling load reported for a Boston climate, which belongs to the same ASHRAE climate zone 6 as Montreal, and falls consistently within the range of our simulated total demand across winter months,

validating the order of magnitude of the present model, with a constant COP used at 4.7. The Song benchmark at 3576 kWh per month is reported for a facility of equivalent footprint in the same ASHRAE climate zone, yet exhibits a systematically higher cooling load. This discrepancy likely reflects differences in internal heat gain assumptions, particularly LED lighting schedules and installed power density, and serves as an upper bound reference illustrating the sensitivity of container farm cooling demand to operational parameters.

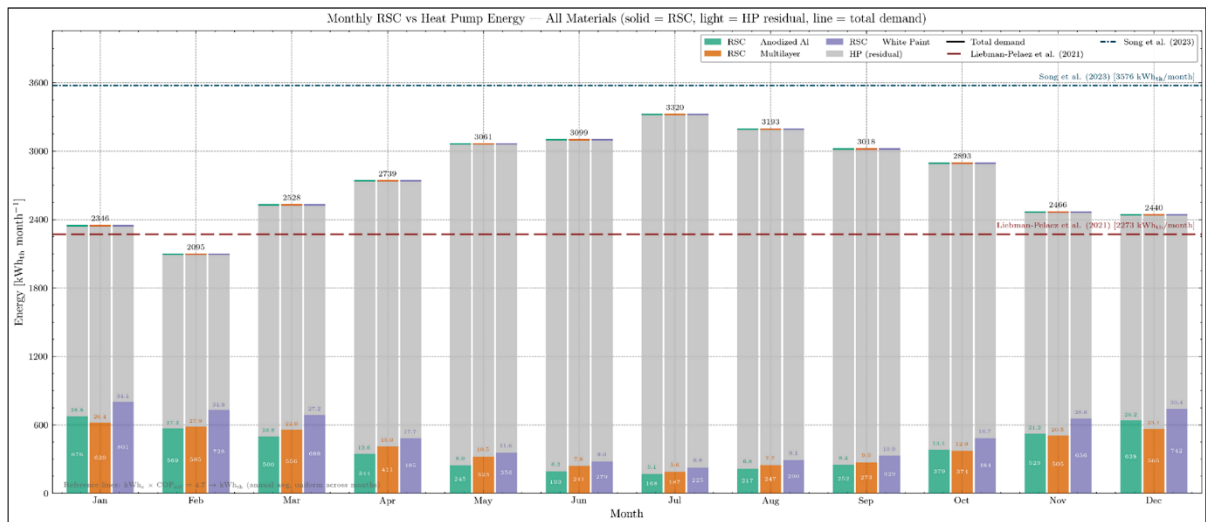


Figure 3.11 Monthly RSC energy contribution versus total cooling demand for all emitter materials over a full meteorological year in Montreal

3.5.3 Assessment of gap and limitations

The results presented hereinabove are derived from nodal numerical simulations and strictly define a theoretical upper bound on passive cooling performance. Several limitations must be acknowledged before extrapolating to real-world deployments.

The thermal model likely underestimates auxiliary chiller demand, as ventilation, infiltration, and plant evapotranspiration terms were neglected in the TES energy balance. The thermohydraulic circuit is modeled as lossless, neglecting convective piping losses, fluid-to-storage interface resistance, parasitic pump energy consumption, and TES standby thermal losses, all of which will systematically reduce net cooling yield in practice. Critically, as stated, the simulation represents a no-plan scenario. In an operational cultivation environment

transpiration-driven latent loads not only augment the total cooling demand but critically shift it toward dehumidification which sensible cooling alone cannot address if relied upon exclusively. Long-wave infrared performance is further sensitive to local atmospheric humidity: elevated precipitable water vapor narrows the transmission window and disproportionately penalizes broadband emitters during Montreal's humid summer nights. Finally, all optical characterizations rely on pristine samples, and progressive dust accumulation and UV-induced degradation will alter both solar reflectance and emissivity profiles over time. Future experimental field validation and longitudinal durability assessments are therefore necessary to quantify the gap between simulated and achievable passive cooling fractions.

3.6 Conclusions

This study evaluates the integration of RSC under specific context of container farming. By comparing a high-performance photonic multilayer, a nanoporous AAO surface, and a commercial cool roof coating, we demonstrated that the viability of an RSC system depends fundamentally on the synergy between its optical properties and the operational fluid dynamics.

The spectral characterization and steady-state modeling confirmed that while highly selective emitters (multilayer) are strictly required for continuous sub-ambient diurnal cooling, their fabrication complexity remains a barrier for large-scale agricultural deployment. Conversely, scalable broadband emitters like the commercial white paint and AAO exhibit superior nocturnal cooling yields (extracting $1630 \text{ Wh.m}^{-2}.\text{day}^{-1}$ and $1517 \text{ Wh.m}^{-2}.\text{day}^{-1}$ net respectively) but suffer thermal penalties during daylight hours if operated continuously.

Crucially, the dynamic system simulations revealed that implementing an intelligent, thermally regulated circulation pump entirely mitigates this daytime solar penalty. Under regulated operation, the accessible commercial white paint outperformed the advanced nanophotonic structures, extracting the maximum useful thermal energy from the storage system.

These findings indicate that the most viable pathway for decarbonizing the cooling loads of containerized agriculture does not necessarily rely on advanced, costly metamaterials. Instead, coupling accessible, highly reflective broadband coatings with a TES management provides a robust, low-tech solution for energy efficiency in resource-constrained settings for container farming. To validate these numerical results under real operating conditions, complementary experimental measurements will be conducted on a dedicated prototype installed on the ETS rooftop. In parallel, a full-scale deployment on the ETS container farm will allow the assessment of system performance under actual agricultural conditions, providing critical empirical data to further refine and guide the design of RSC-assisted cooling solutions.

CHAPITRE 4

DÉVELOPPEMENT EXPÉRIMENTAL ET INTÉGRATION PILOTE DU SYSTÈME RSC

Ce chapitre présente l'ensemble des travaux de développement expérimental réalisés en parallèle de l'étude théorique et de la rédaction de l'article. Ces travaux couvrent trois volets distincts : la conception et l'instrumentation d'un banc d'essai thermique extérieur dédié à la caractérisation des matériaux RSC, la sélection et l'acquisition des panneaux radiatifs à l'échelle pilote, et le dimensionnement ainsi que l'intégration du système hydraulique sur la ferme conteneur de l'ÉTS. Ces contributions constituent le socle expérimental sur lequel s'appuieront les campagnes de mesure futures.

4.1 Conception et réalisation du banc d'essai thermique extérieur

Le banc d'essai a été entièrement développé au sein de l'HélioLab Michel Trottier situé sur le toit de l'école (ÉTS, Montréal) afin de mesurer la puissance de refroidissement sub-ambiant de différents émetteurs RSC en conditions réelles. Sa configuration s'inspire du protocole de caractérisation proposé par la littérature (Raman et al., 2014), adapté aux contraintes climatiques du site et aux exigences d'une utilisation sur toit.

4.1.1 Design structurel

La conception mécanique a été réalisée sous Autodesk Fusion 360 à partir de profilés d'aluminium standardisés, choisis pour leur rigidité et leur reproductibilité (présenté en Figure 4.1) Le cœur du dispositif est une enceinte en Plexiglas, thermiquement isolée par une couche d'isolant commercial de 2,5 cm. Les surfaces extérieures de l'enceinte sont recouvertes d'une feuille d'aluminium à haute réflectivité, qui limite les échanges de chaleur radiatifs avec l'environnement immédiat.

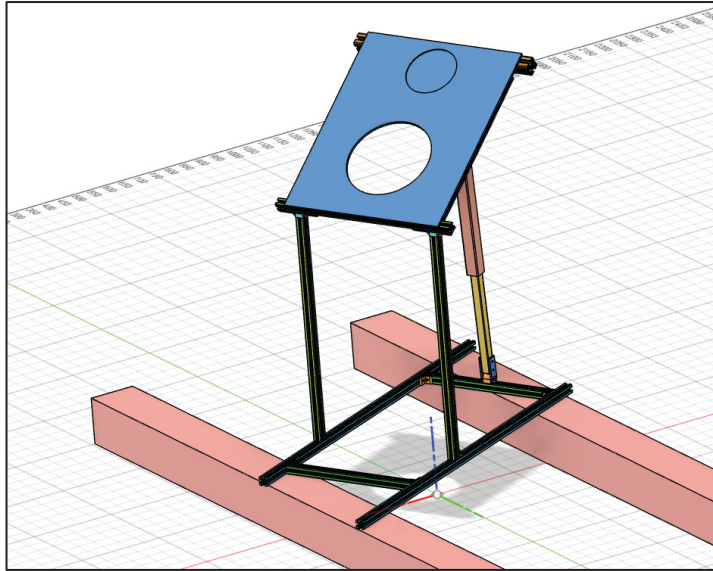


Figure 4.1 Modèle 3D numérique du banc d'essai pendant la phase de conception

L'ouverture supérieure est scellée par un film mince de polyéthylène (PE) de grade commercial. Ce matériau est transparent dans le FIR, ce qui permet le passage du rayonnement thermique émis par l'échantillon vers le ciel, tout en bloquant les turbulences atmosphériques et en réduisant les pertes convectives sur l'échantillon.

Le banc intègre un mécanisme d'inclinaison variable par pieds télescopiques à incréments calibrés, permettant de positionner l'échantillon de 0° à 60°. L'angle d'inclinaison du panneau peut être déterminé selon l'équation (4.1), expliquée par le schéma en Figure 4.2 :

$$\theta = \pi - \left[\cos^{-1} \left(\frac{L_{base}}{L_{diagonal}} \right) + \cos^{-1} \left(\frac{L_{diagonal}^2 + L_{pied\ arri\ere}^2 - L_{panneau}^2}{2 \cdot L_{diagonal} \cdot L_{pied\ arri\ere}} \right) \right] - \left[\cos^{-1} \left(\frac{L_{panneau}^2 + L_{pied\ arri\ere}^2 - L_{diagonal}^2}{2 \cdot L_{panneau} \cdot L_{pied\ arri\ere}} \right) \right] \quad (4.1)$$

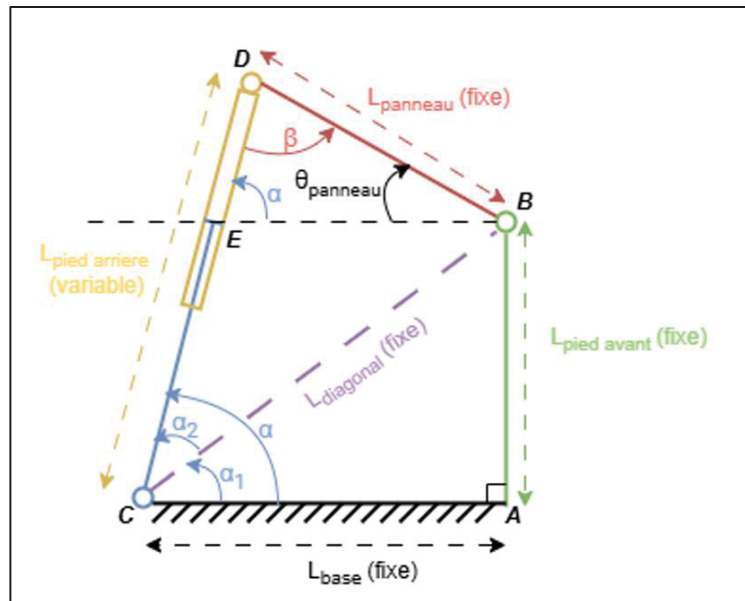


Figure 4.2 Schéma pour le calcul exact de l'angle d'inclinaison

L'appareil est orienté plein sud sur le toit de l'ÉTS afin de maximiser l'exposition solaire et de soumettre les matériaux RSC à la charge thermique la plus exigeante. L'influence radiative de l'environnement urbain a été atténuée par l'orientation directionnelle et le film réfléchissant de l'enceinte.

4.1.2 Instrumentation et chaîne d'acquisition

Le banc est instrumenté avec des capteurs de haute précision pour mesurer les variables thermiques et environnementales en temps réel. La Figure 4.3 illustre le fonctionnement de ce banc d'essai.

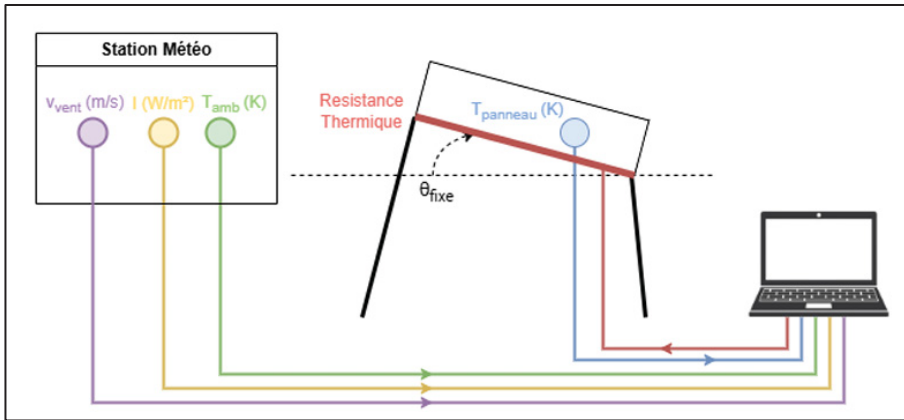


Figure 4.3 Schéma de l'instrumentation thermique en toiture

La température est mesurée par des thermocouples de type T (Cuivre-Constantan), série Omega 5TC, calibre 36 AWG. Ce calibre se justifie par sa faible masse thermique, qui assure une réponse transitoire rapide, et par sa précision dans les plages de température proches de l'ambiance. Les capteurs sont conformes à la norme Special Limits of Error (SLE) et EN 60584-2 (Classe de tolérance 1), garantissant une précision de $\pm 0,5$ °C. L'isolation PFA (Teflon) des fils assure la tenue en conditions extérieures. L'interface thermique entre les sondes et les spécimens est optimisée par des étiquettes adhésives en polyimide, qui minimisent la résistance thermique au point de contact. Les câbles sont prolongés sur plusieurs mètres pour relier le toit à une station de mesure intérieure, assurant la sécurité des opérateurs et la protection du matériel.

L'irradiance solaire globale est mesurée par un pyranomètre Kipp & Zonen CMP10, monté dans le même plan que le porte-échantillon, afin de refléter fidèlement la charge solaire incidente sur les spécimens inclinés.

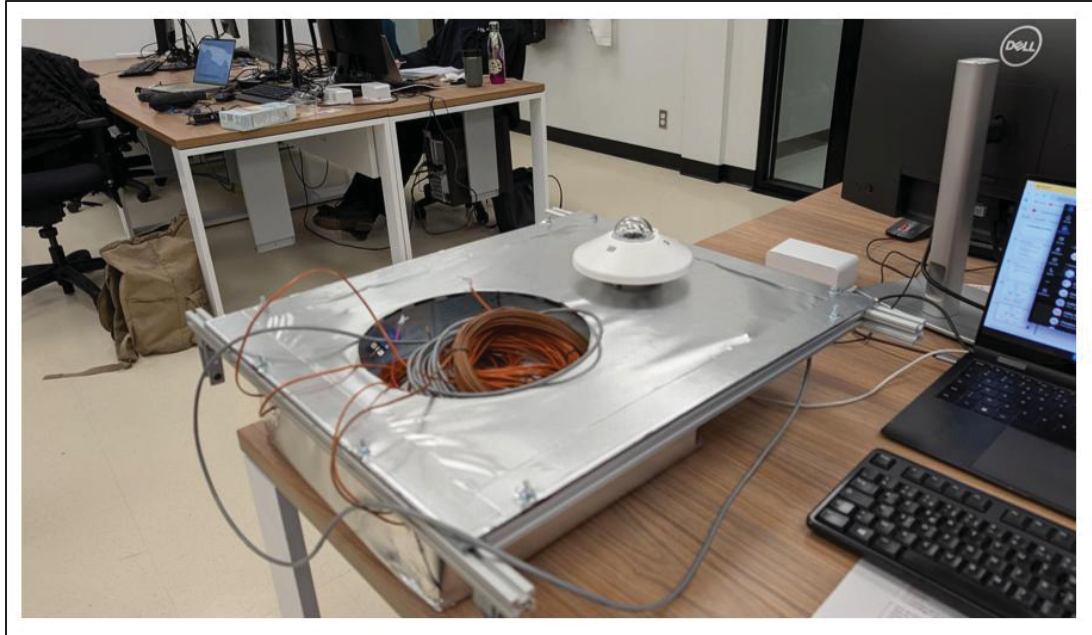


Figure 4.4 Instrumentation sur le banc d'essai
(Pyranomètre, TC, Résistance chauffante)

L'ensemble des instruments présentés précédemment sont installés sur le banc d'essai, présenté sur la Figure 4.4. La résistance et les TC se trouvent dans la chambre de mesure. Les rallonges des TC et de l'alimentation de la résistance sont visibles sur la photographie.

4.1.3 Système de contrôle et d'acquisition LabVIEW

Un programme de contrôle et d'acquisition a été développé sous LabVIEW pour automatiser le protocole expérimental. Ce programme remplit deux fonctions distinctes.

La première est l'acquisition en temps réel des signaux issus des thermocouples et du pyranomètre. Les données sont lues en continu via un module DAQ provenant de *National Instrument* horodatées et enregistrées localement pour le post-traitement.

La seconde est le contrôle PID de la résistance chauffante fixée à l'arrière du porte-échantillon. Cette résistance simule une charge thermique contrôlée, conformément au protocole disponible dans la littérature (Raman et al., 2014). Le régulateur PID ajuste la puissance électrique injectée pour suivre une consigne définie par l'opérateur.

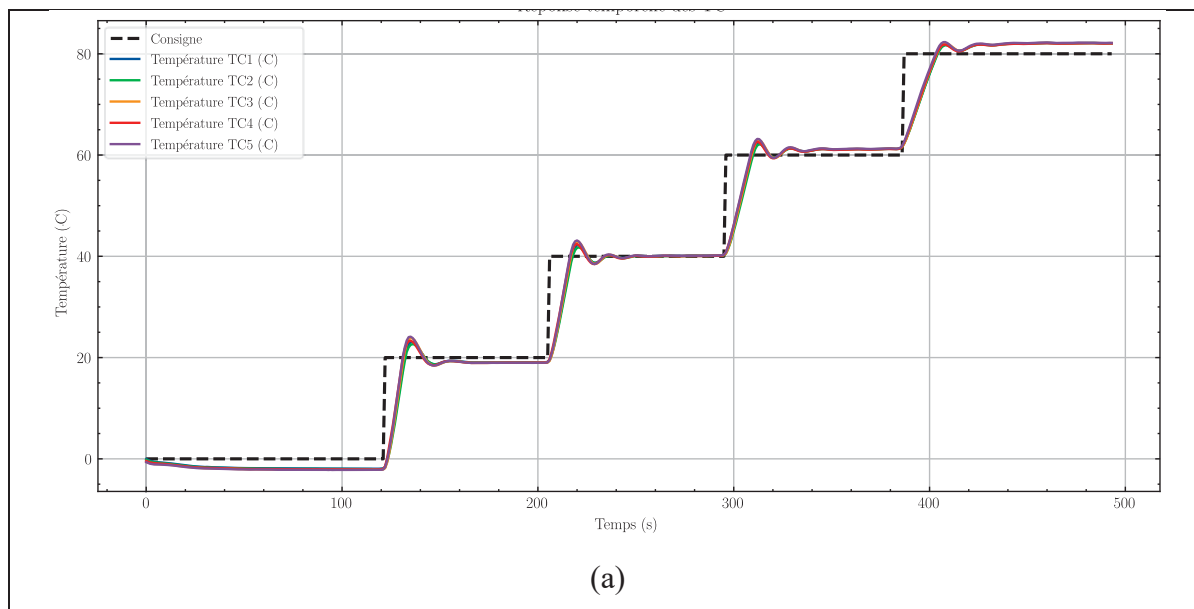
La courbe caractéristique $\Delta T = f(P_{injectée})$ peut ainsi être tracée point par point, et la puissance de refroidissement nette du matériau testé est extraite par régression linéaire, au point où $\Delta T = 0$, c'est-à-dire lorsque la puissance injectée compense exactement le refroidissement radiatif.

La combinaison de ces deux fonctions permet d'exécuter des campagnes de mesure longues de façon reproductible, sans intervention manuelle continue, et de limiter les erreurs d'opérateur sur les relevés.

Avant toute campagne de mesure, les thermocouples ont été calibrés individuellement. La procédure consiste à placer l'ensemble des sondes dans un four à température contrôlée, aux côtés d'une sonde de référence préalablement étalonnée. La température est élevée par paliers de 20 °C, en attendant à chaque palier que le régime stationnaire soit atteint avant de relever les valeurs (

Figure 4.5a). La comparaison entre la température lue par chaque thermocouple et celle de la sonde de référence permet d'établir, pour chaque capteur, une équation de correction appliquée en post-traitement (

Figure 4.5b).



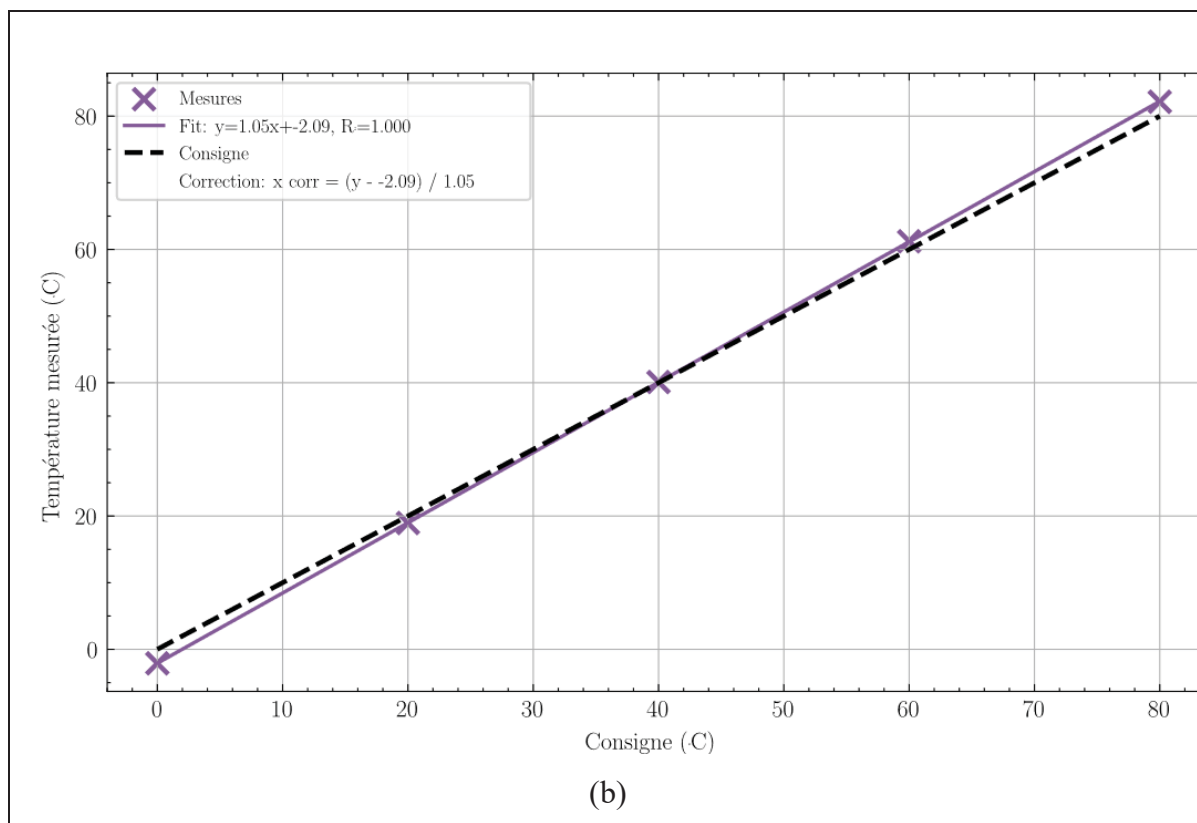


Figure 4.5 Calibration des TC : (a) Test des TC par paliers de température, (b) Graphique résultant pour un TC spécifique pour la correction des valeurs de températures. Cette démarche garantit une mesure fiable et précise afin de s'affranchir des écarts de fabrication propres à chaque thermocouple.

4.2 Sélection et acquisition des panneaux radiatifs

Le passage du banc d'essai à l'échelle pilote sur la ferme conteneur nécessite une surface radiative suffisante pour générer une puissance de refroidissement exploitable. Le dimensionnement a ciblé une surface active d'environ 5 m², répartie sur quatre modules interconnectés. La sélection du type de panneau a fait l'objet d'une revue approfondie de la littérature grise, avant d'aboutir à un comparatif de fournisseurs.

4.2.1 Revue des technologies candidates

Un panneau RSC doit remplir plusieurs conditions simultanément : présenter une surface la plus plane et continue maximisant l'émissivité vers le ciel, permettre un écoulement interne homogène du fluide caloporteur, être fabriqué dans un matériau à conductivité thermique élevée, et s'intégrer à un circuit autovidangeable de basse pression. Cette définition fonctionnelle a guidé la recherche dans la littérature grise pour identifier les familles de produits existants qui pourraient être détournés de leur usage d'origine afin de fabriquer de tels panneaux, puisque les recherches directes n'ont pas abouti concernant la fabrication de tels panneaux. La liste des technologies investiguées se trouvent dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1 Comparatif des technologies de panneaux candidates pour l'application RSC

Technologie	Description	Avantages rsc	Limitations	Décision
Plaque roll-bond aluminium	Canal interne expansé entre deux feuilles d'aluminium liées par laminage. Versions anodisées disponibles sur mesure	Surface plane et continue. Excellente conductivité thermique. Anodisation améliore l'émissivité ir. Option techniquement la plus proche d'un panneau rsc dédié.	Coût élevé pour la surface requise (jusqu'à 4 941 usd). Fabrication sur mesure avec délais.	Écarté
Capteur solaire thermique	Collecteur à plaque plane ou à tubes sous vide, conçu pour absorber le rayonnement solaire.	Utilisé dans des travaux académiques comme émetteur radiatif nocturne (usage inversé). Circuit hydraulique intégré.	Revêtement sélectif absorbant (traitement noir) contre-productif pour le rsc diurne. Coût élevé pour plusieurs m ² .	Écarté

Tableau 4.1 Comparatif des technologies de panneaux candidates pour l'application RSC (suite)

Technologie	Description	Avantages rsc	Limitations	Décision
Cold plate industrielle (électronique)	Échangeur compact en aluminium usiné ou cuivre fretté, pour refroidissement de composants de puissance.	Surface plane. Conductivité thermique élevée. Large disponibilité commerciale.	Surface unitaire très réduite (quelques cm ²). Prix à l'unité élevé. Inadaptée à une couverture de plusieurs m ² .	Écarté
Plaque de refroidissement ev (battery cooling plate)	Plaque aluminium à canal en serpentin, issue de la filière véhicules électriques. Fabrication en grande série.	Surface unitaire 1 à 2 m ² . Légère, plane, étanche. Compatible basse pression (drainback). Coût très compétitif (450 usd/unité).	Non conçue pour une émission radiative optimisée. Revêtement de surface à adapter.	Retenu
Plaque en cuivre	Plaque de refroidissement en cuivre, secteur thermique industriel.	Conductivité thermique ~4× supérieure à l'aluminium. Bonne homogénéité thermique de surface.	Densité 3× supérieure à l'aluminium (8 900 vs 2 700 kg/m ³). Coût matière déséquilibré pour plusieurs m ² .	Écarté

Tableau 4.1 Comparatif des technologies de panneaux candidates pour l'application RSC (suite)

Technologie	Description	Avantages rsc	Limitations	Décision
Échangeur brasé (brazed plate hx)	Échangeur à plaques brasées avec canaux, courant en génie climatique.	Transfert fluide-fluide très efficace. Large disponibilité.	Surface extérieure nervurée et irrégulière : incompatible avec une émission radiative homogène vers le ciel.	Écarté

4.2.2 Comparatif fournisseurs et sélection

À l'issue de cette revue, les technologies Roll-Bond et EV cooling plates ont été retenues comme les plus prometteuses pour faire l'objet d'un comparatif de fournisseurs. La prospection a combiné trois canaux : les catalogues de fabricants et sites web spécialisés, les plateformes d'approvisionnement asiatiques (Alibaba, Made-in-China) pour les solutions à grande série, et les contacts directs avec des distributeurs nord-américains et européens pour les options sur mesure. Treize sources ont été évaluées, en Europe, en Amérique du Nord et en Asie, présentée dans le Tableau 4.2.

Tableau 4.2 Comparatif des fournisseurs pour les panneaux

Numéro	Constructeur	Localisation	Description	Prix
1	BAKNOR	Ontario, CA	Récupération de 2 plaques d'un ancien client (surplus)	226,00 \$
2	Delta T Heat Exchangers Inc.	Ontario, CA	N.A.	N.A

Tableau 4.2 Comparatif des fournisseurs pour les panneaux (suite)

Numéro	Constructeur	Localisation	Description	Prix
3.1	RUBANOX	Bergamo, ITA	High-efficiency Roll-Bond heat exchanger in anodize aluminium	4 941,50 \$
3.2	Stella Holding srl	Bergamo, ITA	Anodized Roll-bond aluminum plate approx. mm 1000x1000 with 2 pipes (Inlet/Outlet)	1 211,00 \$
4	Sea Frost	New Humpshire, USA	N.A.	N.A
5	ATS	Massachusetts, USA	N.A.	N.A
6	Araymond	Ontario, CA	N.A.	N.A
7	Mubea	Ontario, CA	Environ 600x600. Plaque invendue.	N.A
8	Diabaitx	Belgique	N.A.	N.A
9	Metal Supermakets	Ontario, CA	N.A.	N.A
10	Metal CN	Quebec, CA	N.A.	N.A
11	Thermalex	Alabama, USA	N.A.	N.A
12	COTRAN	CHINA	N.A.	N.A
13	METALLI	CHINA	Battery cooling plate	450 \$

Les échangeurs Roll-Bond anodisés de Rubanox (Italie) présentaient les meilleures caractéristiques techniques pour l'application, mais à un coût de 4 941,50 USD pour la surface requise, hors frais de port. Stella Holding proposait une version plus accessible à 1 211,00 USD, mais sans garantie de disponibilité immédiate. Plusieurs fournisseurs contactés (Delta T

Heat Exchangers, Sea Frost, ATS, Araymond, Diabatix) n'ont pas donné suite aux demandes de devis ou n'ont pas pu fournir de données techniques suffisantes pour être évalués. Le coût a été le critère éliminatoire principal pour les options techniquement viables.

4.2.3 Solution retenue : plaques de refroidissement pour batteries

La solution retenue repose sur un détournement de technologie : des plaques de refroidissement pour batteries de véhicules électriques (présentée en Figure 4.6), fournies par Nanjing Metall Industrial Co. (Chine). Ce choix ramène le coût unitaire à 450 USD, soit un total de 1 800 USD pour les quatre panneaux, contre 4 941,50 USD pour la solution Rubanox de comparaison.

Ces plaques présentent plusieurs caractéristiques adaptées à l'application RSC :

- Dimensions : $1906 \times 695 \times 9$ mm par unité, pour une surface d'échange totale de $5,3 \text{ m}^2$ sur quatre panneaux.
- Matériau : alliage d'aluminium Al 3003-0, choisi pour sa conductivité thermique élevée et sa résistance à la corrosion.
- Architecture interne : canal en serpentin couvrant l'intégralité de la surface, optimisé pour l'homogénéité thermique de la plaque.
- Validation d'étanchéité : chaque panneau a été soumis à un test de pression hydraulique à 1,5 bar pendant 5 minutes avant expédition, assuré par le fournisseur.

permettront de quantifier la perte d'émissivité effective en fonction de l'inclinaison, et d'établir ainsi ce compromis sur une base expérimentale.

4.3 Dimensionnement hydraulique et intégration à la ferme conteneur

L'intégration des panneaux radiatifs à la ferme conteneur a nécessité la conception d'un réseau hydraulique dédié. Le système adopté sera de type autovidangeable (DrainBack), ce qui le distingue des circuits solaires thermiques classiques sous pression permanente.

4.3.1 Justification du choix DrainBack

Le principe DrainBack repose sur la vidange automatique des panneaux par gravité dès l'arrêt de la pompe de circulation. Cette architecture a été retenue pour deux raisons principales. La première est la protection contre le gel. À Montréal, les températures hivernales rendent important le risque de rupture des panneaux si de l'eau stagnante reste exposée et viendrait à geler. La vidange automatique supprime ce risque sans recourir aux mélanges eau-glycol : l'eau peut donc être utilisée comme fluide caloporteur, ce qui préserve à la fois la capacité thermique massique (C_p) et la faible viscosité, donc les coefficients de transfert thermique optimaux. Une solution glycolée peut cependant être envisagée pour assurer une circulation continue même en période de gel potentiel.

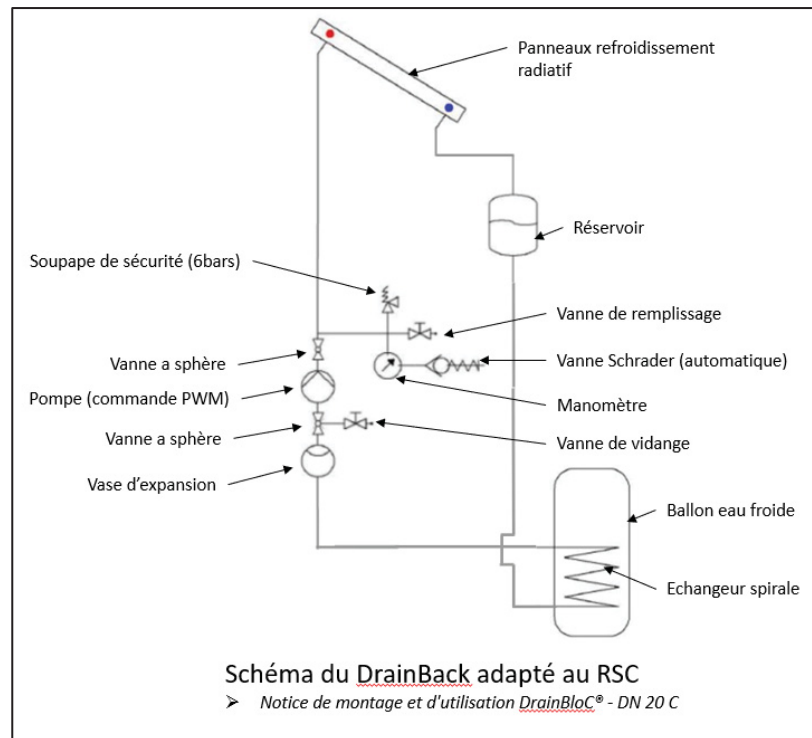


Figure 4.8 Schéma de principe du système Drainback adapté au RSC

La seconde est la flexibilité opérationnelle. Les caractérisations réalisées en laboratoire ont mis en évidence des comportements thermiques différents selon les matériaux : certains revêtements, comme l'oxyde d'aluminium anodique (AAO), performant surtout en régime nocturne, tandis que les peintures radiatives blanches permettent d'envisager un fonctionnement diurne. En mode nocturne, le système DrainBack offre un avantage supplémentaire : les panneaux vides pendant la journée ne captent pas de chaleur solaire, ce qui évite d'injecter une charge thermique indésirable dans le réservoir lors du redémarrage. Le schéma de fonctionnement d'un système DrainBack est présenté sur la Figure 4.8.

4.3.2 Conception du réseau et composants

Le choix des équipements hydrauliques a été réalisé sur la base des données disponibles, comme le réservoir tampon dimensionné pour le volume extérieur estimé à environ 20 litres.

Un dimensionnement hydraulique complet n'a pas pu être mené, faute de données constructeur sur les pertes de charge internes des panneaux Metalli. Cependant, ce dernier aurait dû contenir : le calcul des pertes de charge dans les panneaux, la vérification de la hauteur de la colonne d'eau pour le siphon et la confirmation du diamètre de tuyauterie pour maintenir un écoulement sans trop de perte de charges à faible débit. Ce dimensionnement devra être complété lors de la mise en service, une fois les panneaux disponibles pour caractérisation, et pourra conduire à ajuster le choix de la pompe ou les diamètres si nécessaire. Le schéma du système de plomberie incluant les éléments sélectionnés de manière préliminaire est présenté dans la Figure 4.9, et le détail des composants est cité ci-dessous.

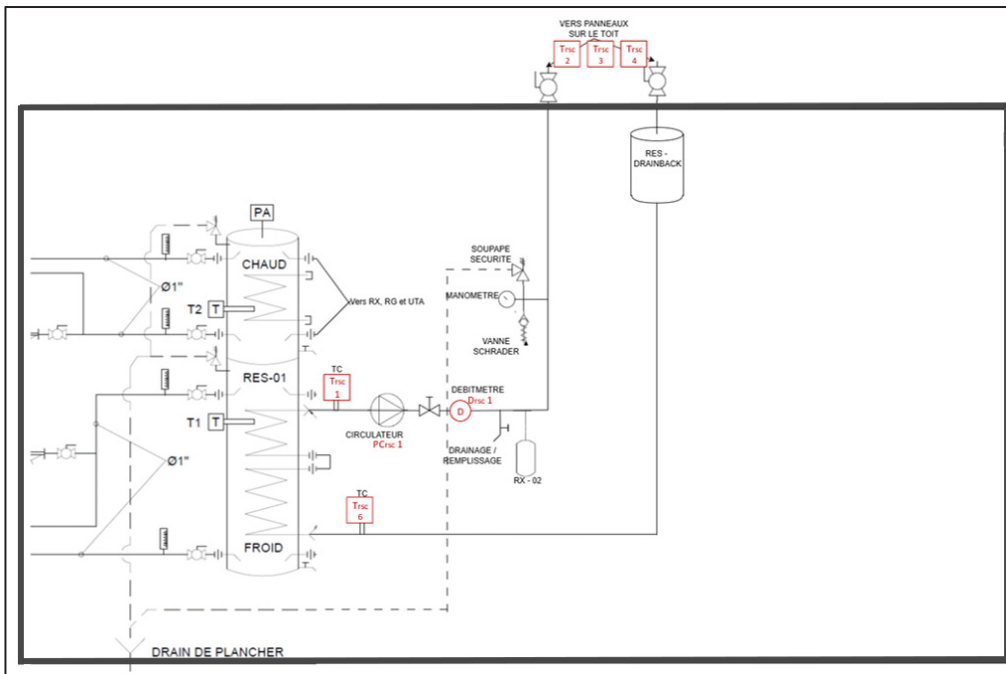


Figure 4.9 Schéma de principe du système de plomberie pour raccorder les panneaux

Le schéma de plomberie développé intègre les composants suivants :

- Pompe de circulation : Grundfos UPS 15-58 FC à trois vitesses, sélectionnée pour sa capacité à fournir la hauteur manométrique nécessaire à l'amorçage du siphon lors du remplissage des panneaux.
- Vanne automatique Schrader : positionnée pour casser le vide à l'arrêt (permettant la vidange) et purger l'air au redémarrage.

- Réservoir tampon : dimensionné pour accueillir le volume total du circuit extérieur (environ 20 litres) sans créer de surpression lors des phases de vidange.
- Instrumentation : débitmètre et thermocouples sur les lignes aller et retour, pour mesurer la puissance thermique extraite lors des phases actives.

4.3.3 Raccordement au système HVAC de la ferme conteneur

L'intégration du système RSC au circuit hydraulique existant de la ferme conteneur a nécessité une analyse préalable de la compatibilité entre les deux systèmes. L'objectif est de permettre au fluide caloporteur refroidi par les panneaux radiatifs de préconditionner la température du fluide entrant dans le système HVAC, réduisant ainsi la charge de refroidissement assurée par compression mécanique.

Le dimensionnement du raccordement est achevé. Il a consisté à identifier les points d'interface sur le circuit HVAC existant et consistait à définir les vannes d'isolation et piquages nécessaires à une intégration sans perturbation du fonctionnement nominal de la ferme. Le raccordement optimal dans l'analyse préliminaire est présenté schématiquement en Figure 4.10. Comme indiqué sur le schéma, des composants d'instrumentation supplémentaires seront nécessaire pour valider les modèles

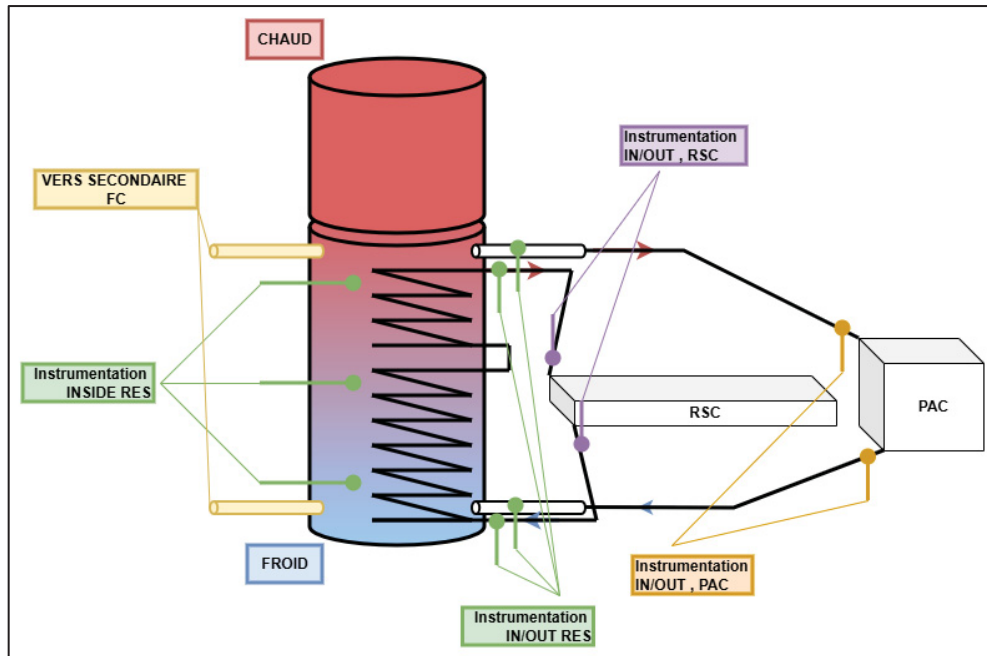


Figure 4.10 Schéma du raccordement des panneaux RSC et de la PAC sur le ballon froid existant

L'installation physique n'a pas encore été réalisée à la date de rédaction de ce mémoire. Les travaux de pose de tuyauterie et de raccordement constituent la prochaine étape du projet, directement planifiable à partir du dimensionnement établi.

4.3.4 Couplage avec le stockage thermique existant

La ferme conteneur de l'ÉTS dispose déjà d'un ballon d'eau froide couplé à une pompe à chaleur eau-eau (PAC). Ce ballon constitue le réservoir tampon thermique du système de climatisation existant. L'architecture retenue pour l'intégration du système RSC exploite directement ce composant : le circuit des panneaux radiatifs est raccordé à l'échangeur interne du ballon, de sorte que l'intégralité de la surface d'échange disponible est utilisée pour transférer le froid produit nocturnement par rayonnement vers le fluide stocké.

Cette configuration présente un avantage opérationnel important : les deux systèmes, RSC et PAC, peuvent fonctionner simultanément. La PAC assure le maintien de la consigne de température dans le ballon indépendamment de l'état du système RSC, tandis que les panneaux

contribuent à réduire la température d'entrée du fluide côté source froide. Le RSC agit donc en appoint passif, sans contraindre ni interrompre le fonctionnement de la climatisation existante. Toute énergie apportée par le RSC se traduit directement par une réduction de la sollicitation de la PAC.

Par ailleurs, l'absence de lien direct entre le circuit des panneaux et l'eau du ballon — les deux circuits étant séparés par l'échangeur — offre une liberté sur le choix du fluide caloporteur côté panneaux. Un mélange eau-glycol pourra être utilisé dans le circuit extérieur sans risque de contamination du réseau principal. La fraction de glycol à retenir sera déterminée dans la suite des travaux en fonction des températures hivernales minimales observées sur le toit de l'ÉTS. Cette protection antigel est complémentaire au système DrainBack : la vidange gravitaire couvre les arrêts planifiés, le glycol couvre les situations imprévues ou les transitions de saison.

4.4 Synthèse des travaux de développement

Ce chapitre documente les quatre volets du travail expérimental et de développement mené en dehors de la contribution théorique présentée dans l'article.

Le banc d'essai thermique constitue un outil de caractérisation complet, capable d'isoler et de quantifier les flux radiatifs faibles en conditions extérieures réalistes. Son instrumentation, la calibration individuelle des thermocouples, et le programme LabVIEW de contrôle PID et d'acquisition développé pour ce projet permettent d'appliquer le protocole proposé dans la littérature de manière reproductible et automatisée (Raman et al., 2014).

La sélection des panneaux radiatifs résulte d'une démarche structurée : revue des technologies candidates dans la littérature grise, comparatif de treize fournisseurs sur trois continents, et identification d'une solution de détournement technologique réduisant le coût d'acquisition de plus de 60 % par rapport à la solution de référence Roll-Bond.

La conception du réseau hydraulique DrainBack, le dimensionnement du raccordement à la ferme conteneur et l'architecture de couplage avec le ballon de stockage existant constituent le travail de dimensionnement le plus structurant pour la suite. Ce système résout la contrainte de gel, maintient la flexibilité opérationnelle, et s'intègre au circuit de climatisation existant sans modifier son fonctionnement.

Les campagnes de mesure n'ont pas pu être menées dans le cadre de ce mémoire. Deux facteurs ont contribué à ce décalage. D'une part, les délais d'approvisionnement des composants critiques ont repoussé la disponibilité du dispositif. D'autre part, les conditions hivernales montréalaises auraient biaisé les mesures de performance intrinsèque et rendu la mise en service sur le toit difficile à interpréter. La décision a été prise de ne pas initier les campagnes dans ces conditions. L'ensemble du dispositif — banc instrumenté et calibré, panneaux acquis, système hydraulique dimensionné, couplage au stockage défini — est prêt pour une mise en service dès les premières conditions météorologiques favorables.

4.5 Perspectives

Les travaux présentés dans ce mémoire établissent le socle sur lequel s'appuiera la prochaine phase de recherche. Le banc d'essai est instrumenté et calibré, les panneaux sont acquis, le système hydraulique est dimensionné et le couplage avec le stockage est défini. Cette section propose une feuille de route des actions à réaliser à court et moyen terme..

Les travaux à venir se divisent en deux niveaux. À court terme, trois étapes de validation expérimentale doivent être menées dans l'ordre : les campagnes de caractérisation thermique sur le banc d'essai, la finition de la plomberie et le raccordement au réseau DrainBack, puis les premières mesures à l'échelle pilote. Ces étapes sont séquentielles et les outils nécessaires sont majoritairement déjà en place.

À moyen terme, cinq axes d'approfondissement sont identifiés. Ils couvrent l'exploration de nouveaux matériaux, l'optimisation de l'angle d'inclinaison des panneaux, la simulation dynamique du stockage couplé RSC-PAC, l'instrumentation complémentaire de la ferme pour affiner le modèle numérique, et l'optimisation de la gestion énergétique en tenant compte des tarifs d'électricité variables. Ce dernier axe est une extension directe du modèle actuel, qui intègre déjà le COP de la PAC : le couplage aux tarifs heures creuses/pleines permettra de maximiser les économies réelles sur la facture, au-delà de la seule réduction de charge thermique.

Le Tableau 4.3 ci-dessous synthétise l'ensemble de ces étapes avec leurs objectifs et livrables proposés pour suivre la continuité du projet.

Tableau 4.3 Feuille de route pour la reprise du projet

Étape	Objectif	Livrables attendus	Horizon
Court terme : validation expérimentale			
Caractérisation thermique sur le banc d'essai	Extraire la puissance de refroidissement nette de chaque matériau RSC en fonction des conditions réelles, et image infrarouge pour l'homogénéité.	Courbes $\Delta T = f(p)$ par matériau. Validation ou ajustement des paramètres optiques du modèle numérique.	Été 2026
Assemblage et installation du pilote sur la fc	Recevoir les panneaux, déposer la couche de peinture blanche, les installer sur la fc avec une structure adaptée	Protocol de fabrication des panneaux détaillé et plan d'exécution de l'installation	Automne 2026
Finition plomberie et raccordement drainback	Poser la tuyauterie extérieure, raccorder au ballon de stockage, purger le circuit et déterminer la fraction de glycol adaptée au site.	Circuit opérationnel et étanche. Fraction glycol définie. Vanne schrader réglée.	Automne 2026
Premières mesures à l'échelle pilote	Mesurer la puissance thermique réellement extraite par les panneaux et comparer aux prédictions du modèle.	Écarts modèle/réel identifiés. Base expérimentale pour calibrer le modèle à l'échelle pilote.	Hiver 2027

Tableau 4.3 Feuille de route pour la reprise du projet (suite)

Étape	Objectif	Livrables attendus	Horizon
Long terme : approfondissement et optimisation			
Exploration de nouveaux matériaux et extension de surface	Tester d'autres revêtements RSC (peintures radiatives, films polymères, matériaux bioinspirés) et évaluer l'intérêt d'augmenter la surface au-delà de 5,3 m ² .	Classement des matériaux par performance. Décision motivée sur l'extension de surface.	Axe 1
Analyse de l'angle d'inclinaison optimal	Déterminer le compromis entre facteur de vue vers le ciel (émissivité maximale à plat) et auto-nettoyage (inclinaison plus forte), à partir des mesures du banc à inclinaison variable.	Angle optimal documenté. Recommandation pour la structure de support définitive.	Axe 2
Analyse thermique dynamique du stockage	Simuler le comportement du ballon en fonctionnement couplé RSC-PAC selon les profils climatiques montréalais et les charges de la ferme.	Plages de température utiles dans le ballon. Stratégie de charge/décharge optimisée.	Axe 3
Instrumentation complémentaire de la fc	Instrumenter les circuits internes de la ferme (températures, débits, pressions) pour affiner le modèle numérique et isoler la contribution du RSC.	Modèle numérique recalibré. Économies attribuables au RSC quantifiées avec précision.	Axe 4

Tableau 4.3 Feuille de route pour la reprise du projet (suite)

Étape	Objectif	Livrables attendus	Horizon
Optimisation du modèle énergétique	Coupler le modèle (cop déjà intégré) aux tarifs d'électricité variables pour définir les plages horaires optimales de fonctionnement du RSC. Inclure un modèle de nébulosité dynamique dans le code existant. Intégration de l'humidité et évapotranspiration des plantes	Stratégie de gestion intelligente heures creuses/pleines. Projection des économies réelles sur la facture énergétique. Validation du modèle avec impact météo et humidité.	Axe 5

DISCUSSION ET CONCLUSION

Ce mémoire s'est inscrit dans une problématique concrète : la gestion thermique des fermes de conteneurs dédiées à la culture en environnement contrôlé. Ces installations présentent une caractéristique thermique atypique (une charge interne importante générée par l'éclairage artificiel, de l'ordre de plusieurs kilowatts), qui maintient une demande de refroidissement active toute l'année, y compris lors des hivers montréalais où les températures extérieures descendent régulièrement sous -15 °C . C'est précisément dans cet écart entre les conditions extérieures froides et la chaleur interne persistante que le refroidissement radiatif par le ciel (RSC) trouve sa fenêtre d'application la plus prometteuse. L'objectif central était d'évaluer si des surfaces à émission infrarouge pouvaient constituer un appoint passif crédible à la climatisation mécanique, sans recours à une source d'énergie. Les trois matériaux caractérisés : la multicouche photonique sélective, la surface nanoporeuse en alumine anodique (AAO) et la peinture radiative commerciale blanche, ont permis d'explorer une large gamme de comportements spectraux, des plus sélectifs aux plus larges bandes.

La comparaison spectrale des matériaux a mis en évidence des comportements fondamentalement différents qui conditionnent leur pertinence opérationnelle. La multicouche photonique présente une émissivité concentrée dans la fenêtre atmosphérique ($8\text{--}13\text{ }\mu\text{m}$) et une absorptivité solaire limitée, ce qui lui permet théoriquement d'émettre de la chaleur vers le ciel même en journée. L'AAO, quant à elle, affiche une émissivité nocturne élevée, proche de l'émissivité d'un corps noir dans l'infrarouge moyen, mais absorbe massivement le rayonnement solaire incident, avec une absorptivité mesurée supérieure à 0,85 dans le visible, ce qui la rend contre-productive en conditions diurnes sans protection solaire. Un résultat structurant de ce travail est celui qui concerne la gestion du fluide caloporteur. Sans logique de pompe conditionnelle, les matériaux à large bande comme l'AAO ou la peinture blanche accumulent de la chaleur pendant les heures d'ensoleillement et annulent intégralement les gains nocturnes accumulés. En l'absence de contrôle, le bilan thermique journalier devient positif : le panneau réchauffe le fluide plutôt que de le refroidir. Avec la logique de pompe conditionnelle activée, les performances se redistribuent. La peinture blanche dépasse les performances de la multicouche photonique sur l'ensemble de la période simulée. Ce

renversement s'explique par la combinaison de deux facteurs : d'une part, la peinture bénéficie d'une émissivité large bande élevée ($\sim 0,95$) qui maximise le flux radiatif nocturne, et d'autre part, la logique conditionnelle filtre efficacement les périodes diurnes défavorables, éliminant le principal inconvénient de son absorption solaire plus élevée. La multicouche, malgré sa sélectivité spectrale supérieure, ne compense pas suffisamment ce différentiel par ses capacités de refroidissement diurne.

Les simulations annuelles sur données météorologiques montréalaises permettent de quantifier avec des premières hypothèses le potentiel du système. La demande thermique mensuelle varie de 2 095 kWh/mois en février à 3 320 kWh/mois en juillet, soit un écart de 58 % entre le mois le plus clément et le plus exigeant. Cette saisonnalité est déterminante pour comprendre la contribution du RSC. En période hivernale, la peinture blanche assure la meilleure couverture : 801 kWh extraits en janvier sur une demande totale de 2 346 kWh, soit un taux de couverture de 34 %. En juillet, cette contribution chute à 200 kWh sur 3 320 kWh, soit 6 %. Ce rapport de 1 à 5 entre hiver et été illustre concrètement pourquoi le RSC constitue avant tout un outil de délestage dans le contexte montréalais, pour les surfaces évaluées. Même au meilleur mois, le résidu à couvrir par la pompe à chaleur demeure de l'ordre de 1 545 kWh, ce qui confirme le rôle d'appoint du système plutôt que de substitut. La comparaison entre matériaux révèle aussi un résultat structurant : la peinture blanche surpasse les deux autres surfaces sur 10 des 12 mois simulés. En janvier, elle délivre 801 kWh contre 676 kWh pour l'AAO et 620 kWh pour la multicouche photonique. La seule exception notable est le mois de juin, où la structure multicouche atteint 387 kWh contre seulement 225 kWh pour la peinture, soit un avantage de 72 %. C'est le seul moment de l'année où la sélectivité spectrale de la multicouche compense réellement son émissivité large bande plus faible, grâce à sa capacité à rejeter de la chaleur même en présence de rayonnement solaire incident.

Ces résultats sont à replacer dans le contexte géométrique du système simulé. Les quatre panneaux acquis couvrent une surface rayonnante de 5,3 m², sur un toit de conteneur dont la surface totale atteint près de 30 m². La simulation porte donc sur environ 18 % de la surface disponible. Si l'on extrapole linéairement à la surface de toiture complète, le taux de couverture hivernal pourrait approcher 190 % de la demande simulée en janvier, ce qui ouvre la voie à un stockage thermique saisonnier. Par ailleurs, la demande thermique retenue pour la

ferme conteneur de l'ÉTS, bien qu'estimée à partir d'hypothèses simplificatrices, reste cohérente avec les références disponibles dans la littérature : (Liebman-Pelaez et al., 2021) rapportent 2 273 kWh/mois et (Song et al., 2023) 3 576 kWh/mois pour des installations comparables considérant un COP constant pour la pompe à chaleur, encadrant ainsi les valeurs simulées dans ce mémoire. Cet ordre de grandeur partagé renforce la crédibilité des résultats obtenus, même si une caractérisation précise de la charge réelle de la ferme de l'ÉTS reste nécessaire pour affiner le dimensionnement.

Les résultats présentés définissent un plafond théorique. Les simulations reposent sur plusieurs hypothèses simplificatrices. La plus structurante est l'utilisation d'un ciel clair permanent : aucune nébulosité n'est modélisée, ce qui maximise artificiellement le flux radiatif vers le ciel froid. Or, à Montréal, le taux de couverture nuageuse moyen dépasse 60 % en hiver et réduit significativement la fenêtre atmosphérique disponible pour le rayonnement. Enfin, la charge interne de la ferme est supposée constante et uniforme sur toute l'année, sans tenir compte des cycles de culture, des variations d'éclairage selon le stade végétatif, ni des périodes d'arrêt. L'ensemble de ces hypothèses va dans le même sens : elles tendent toutes à surestimer les performances du système. Les résultats présentés constituent donc bien un plafond théorique, et non une prédiction opérationnelle. C'est précisément ce que les campagnes de mesure sur le banc d'essai existant devront quantifier. Ces campagnes de mesure expérimentales n'ont pas pu être menées dans le cadre de ce mémoire. Le banc d'essai est instrumenté et calibré, les panneaux sont achetés, le circuit hydraulique DrainBack est dimensionné, mais les données de validation terrain demeurent à acquérir. Il s'agit d'une limite importante : sans confrontation au comportement réel du système sous les conditions locales, la robustesse du modèle reste présumée plutôt que démontrée. Enfin, la question du détournement technologique des panneaux de refroidissement issus de véhicules électriques mérite de l'attention. Si cette approche présente des avantages évidents en termes de disponibilité, de coût et de surface d'échange déjà optimisée, la compatibilité à long terme des matériaux avec un fluide caloporteur différent de celui d'origine, ainsi que la tenue en conditions extérieures prolongées, devra être vérifiée expérimentalement. La démonstration que la peinture commerciale surpasse la multicouche photonique dans un contexte opérationnel réaliste avec gestion conditionnelle du fluide est également un résultat structurant qui a des

implications pratiques immédiates : il oriente les choix de matériaux vers des solutions accessibles, peu coûteuses et facilement applicables, sans nécessiter de procédés de fabrication complexes ou coûteux. Ce résultat rejoint et prolonge les conclusions de travaux précédents en montrant que la sélectivité spectrale n'est pas une condition suffisante à elle seule pour garantir des performances supérieures dans un environnement à contraintes multiples.

Ce mémoire a établi la faisabilité de principe du RSC comme appoint passif à la climatisation mécanique d'une ferme de culture en conteneur à Montréal. Les simulations montrent qu'un système correctement contrôlé couvre jusqu'à 34 % de la demande de refroidissement en janvier et maintient une contribution non négligeable en été, autour de 6 % en juillet. Sur les mois de transition (septembre à novembre), la contribution de la peinture blanche se maintient entre 481 et 656 kWh/mois, ce qui représente un délestage régulier et prévisible de la pompe à chaleur. La peinture radiative commerciale, combinée à une logique de pompe conditionnelle, s'est révélée la configuration la plus performante dans ce contexte opérationnel sur presque toute l'année, à l'exception du mois de juin où la multicouche photonique tire parti de sa sélectivité spectrale. Ce résultat contre-intuitif souligne l'importance de l'intégration systémique par rapport aux seules propriétés intrinsèques du matériau : un matériau spectralement imparfait, bien contrôlé, peu surpasser en performances un matériau technologiquement sophistiqué mal adapté aux contraintes opérationnelles réelles. Le RSC ne remplace pas la climatisation mécanique. Il la complète, réduit sa sollicitation, et allonge potentiellement sa durée de vie en limitant ses cycles. Dans un contexte où les fabricants de fermes de culture verticale cherchent à réduire leur empreinte énergétique pour améliorer leur durabilité économique et environnementale, cet appoint passif représente une piste sérieuse, et accessible.

RECOMMANDATIONS

Ce mémoire a posé les bases analytiques et expérimentales d'un système RSC appliqué à une ferme conteneur, mais plusieurs étapes restent à franchir avant de pouvoir conclure sur ses performances réelles. Les recommandations qui suivent s'articulent en trois horizons temporels : la validation expérimentale immédiate, l'intégration opérationnelle à l'échelle de la ferme, et les extensions du modèle numérique à plus long terme.

À court terme, la priorité est la réalisation des campagnes de caractérisation thermique sur le banc d'essai extérieur, tel que détaillé dans la feuille de route du projet (section 4). Ces mesures permettront d'extraire les courbes de performance réelles de chaque matériau et d'ajuster les paramètres du modèle numérique, notamment les coefficients convectifs et la résistance thermique de contact, qui ont dû être estimés faute de données expérimentales. Les résultats orienteront directement l'étape suivante : la finalisation du raccordement hydraulique sur la ferme conteneur. Une fois le circuit en service, deux paramètres devront être déterminés en conditions réelles : la fraction de glycol adaptée aux hivers du site, et les pertes de charge internes des panneaux Metalli, qui n'étaient pas disponibles au moment du dimensionnement. En parallèle, l'angle d'inclinaison des panneaux devra être optimisé à partir des données du banc à inclinaison variable, afin de trouver l'équilibre entre facteur de vue vers le ciel et capacité d'auto-nettoyage.

À moyen terme, sur le choix des matériaux, la peinture blanche commerciale reste la solution la plus pertinente pour un déploiement à grande échelle selon les résultats de ce travail. Une extension à une plus grande surface permettrait d'évaluer le déploiement du système et de tirer parti des 30 m² de toiture disponible, dont seulement 5,3 m² ont été simulés ici. Ce passage à l'échelle constituerait également un terrain de validation pour les modèles de stockage journalier et pourquoi pas saisonniers.

À plus long terme, deux extensions du modèle numérique méritent d'être poursuivies. La première est le couplage aux tarifs horaires d'Hydro-Québec : le COP de la pompe à chaleur est déjà intégré dans le modèle, ce qui rend cette extension directement réalisable et permettrait de quantifier les économies réelles sur la facture, au-delà de la seule réduction de charge thermique. La seconde, plus structurante, est l'intégration d'un modèle de nébulosité horaire

réelle et de transpiration végétale. Les cultures sous éclairage artificiel génèrent des échanges latents importants qui modifient le bilan thermique du réservoir et la demande en déshumidification, effets absents du modèle actuel et qui représentent une source d'écart anticipée entre les projections simulées et les conditions réelles d'une ferme en production.

ANNEXE I

DOCUMENTATION PHOTOGRAPHIQUE

Dans cette Annexe, des photographies des appareils utilisés pour la fabrication et les mesures sont présentées pour ajouter un aspect concret sur la partie expérimentale de ce travail.

I.1 Fabrication de l'échantillon Multicouche au LACIME (ÉTS)

Le dépôt multicouche a donc été fabriqué par E-Beam (évaporation par faisceau d'électrons), grâce à l'instrument présenté sur la Figure A I-1 suivante.

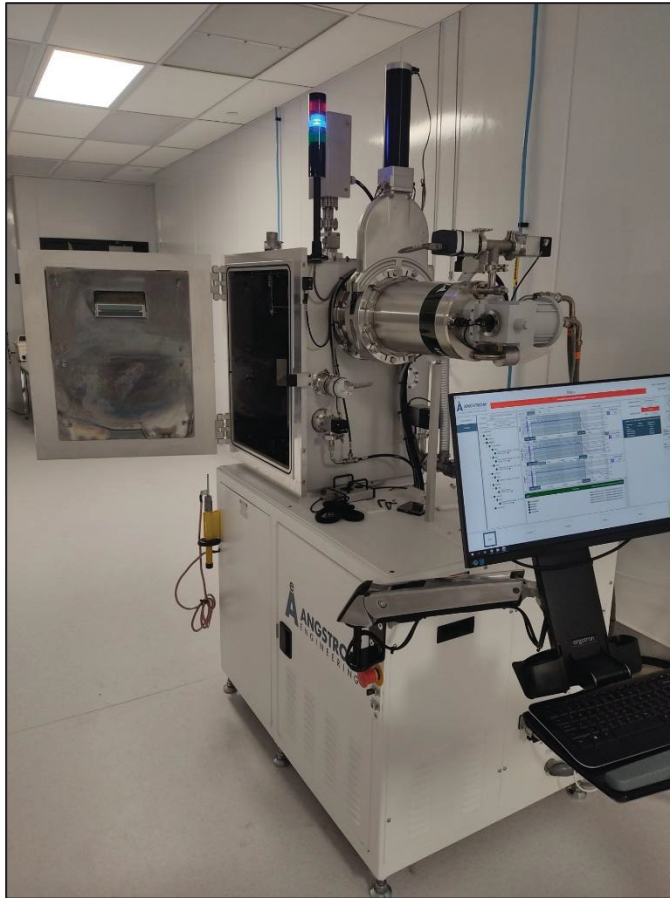


Figure-A I-1 Évaporateur par faisceau d'électrons (LACIME, ÉTS)

Le fonctionnement avec les instruments principaux de l'évaporateur est présenté sur la Figure A.I-2 suivante :

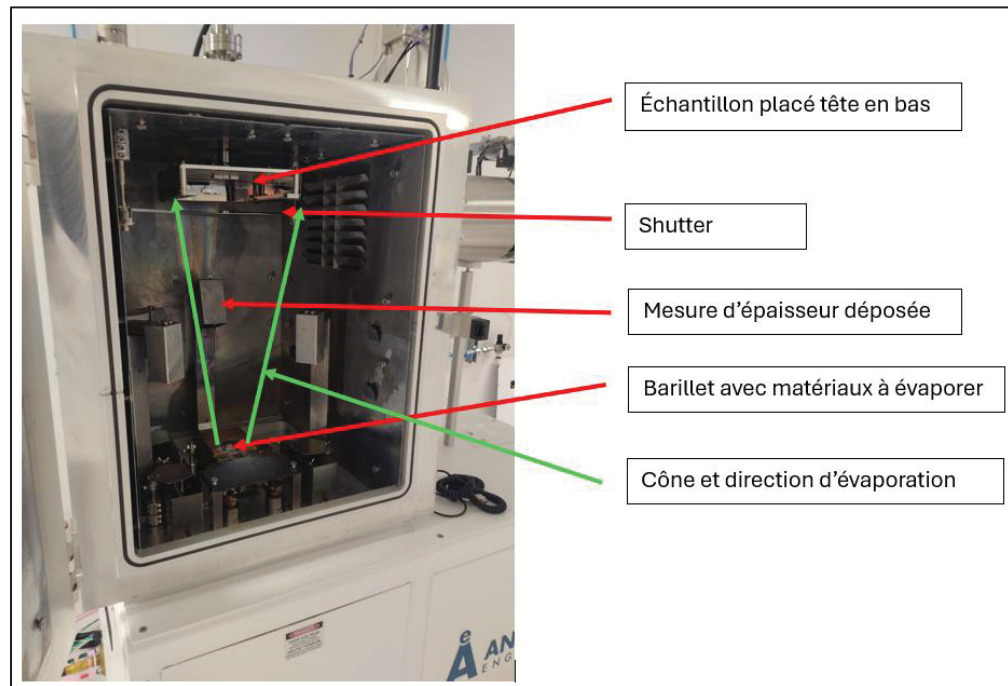


Figure-A I-2 Fonction de l'évaporateur

I.2 Caractérisation optique des matériaux au FSCEL (Polytechnique Montréal)

Les matériaux ont été mesurés sur des appareils de mesure de réflectance sur l'ensemble du spectre évalué (0,25 – 25 μm). Le SOC-100 qui a permis les mesures dans le FIR, avec son ellipse recouverte d'or est présentée sur la Figure A.I-3.



Figure-A I-3 Appareil de mesure IR (SOC 100)

L'appareil pour le spectre UV-VIS-NIR (Lambda 1050) est quant à lui présenté sur la Figure A.I-4

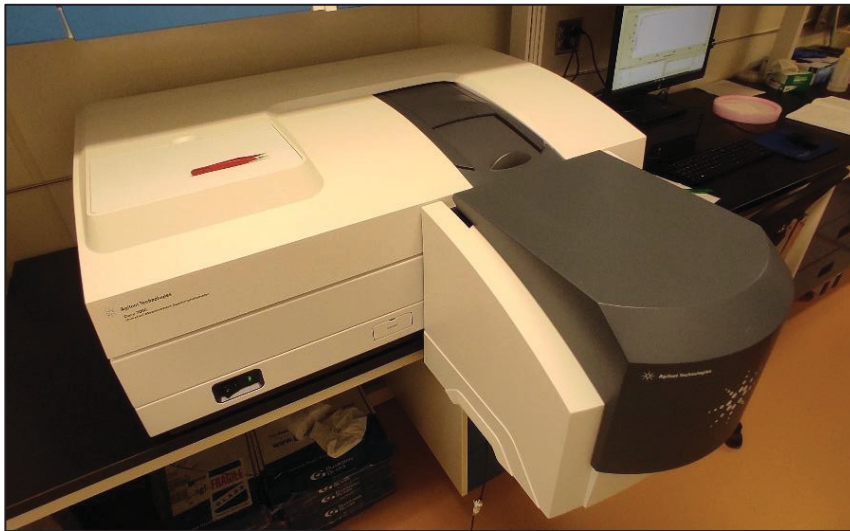


Figure-A I-4 Appareil de mesure UV-VIS-NIR (Lambda 1050)

Ces appareils nous ont permis de mener à bien la caractérisation. L'ÉTS dispose d'un appareil pour le spectre FIR (Nicolet) mais ce dernier était en réparation lors des mesures.

I.3 Fabrication des échantillons Anodisé et de Peinture blanche pour la microscopie

Après la fabrication de la surface émettrice, les échantillons ont dû être préparés pour passer au microscope pour l'analyse de côté (cross section). Le procédé inclue donc un enrobage à chaud (Figure A.I-5), qui a pu endommager légèrement les échantillons mais qui était obligatoire.

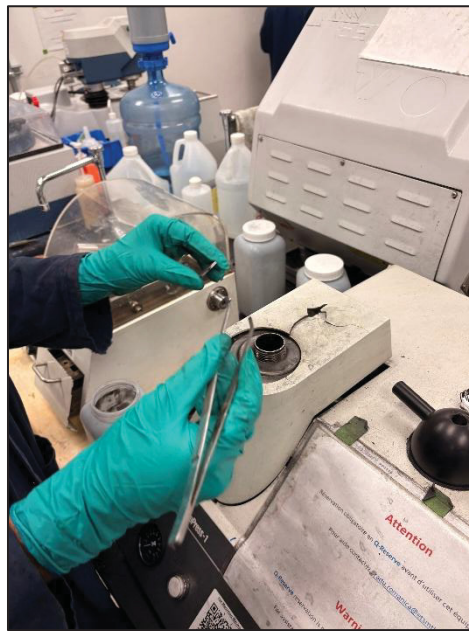


Figure-A I-5 Enrobage à chaud
dans les laboratoires de l'ETS

L'échantillon de peinture blanche a subi un léger décollement de la surface de dépôt en aluminium. L'étape suivante est le polissage manuel de l'échantillon enrobé (Figure A.I-6). C'est un procédé long et minutieux qui demande beaucoup de régularité pour éviter de faire un biseau sur la coupe de l'échantillon.



Figure-A I-6 Polissage manuel
dans les laboratoire de l'ETS

La dernière étape consiste à l'analyse microscopique des échantillons, et éventuellement un sputtering avec un élément conducteur si l'échantillon ne l'est pas pour assurer une belle image au microscope. Le microscope utilisé était donc un TM 3000, dans le laboratoire ouvert de génie mécanique de l'ETS (Figure A.I-7).



Figure-A I-7
Microscope
TM 3000 dans les
laboratoires de
l'ETS

I.4 Instrumentation et commande par LabView

Le test de la commande par PWM de la résistance, grâce à un PID implémenté sur LabView à été conduit au laboratoire du L3E (Figure A.I-8). Un *heat sink* à été utilisé car le SSR trouvé dans notre matériel pour assurer la gestion de la puissance de manière sécurisé pour la carte DAQ était sous dimensionné pour le courant dans la résistance. Ainsi, le *heat sink* évite l'échauffement du SSR pour les périodes d'utilisation prolongée et permet d'améliorer ses performances.

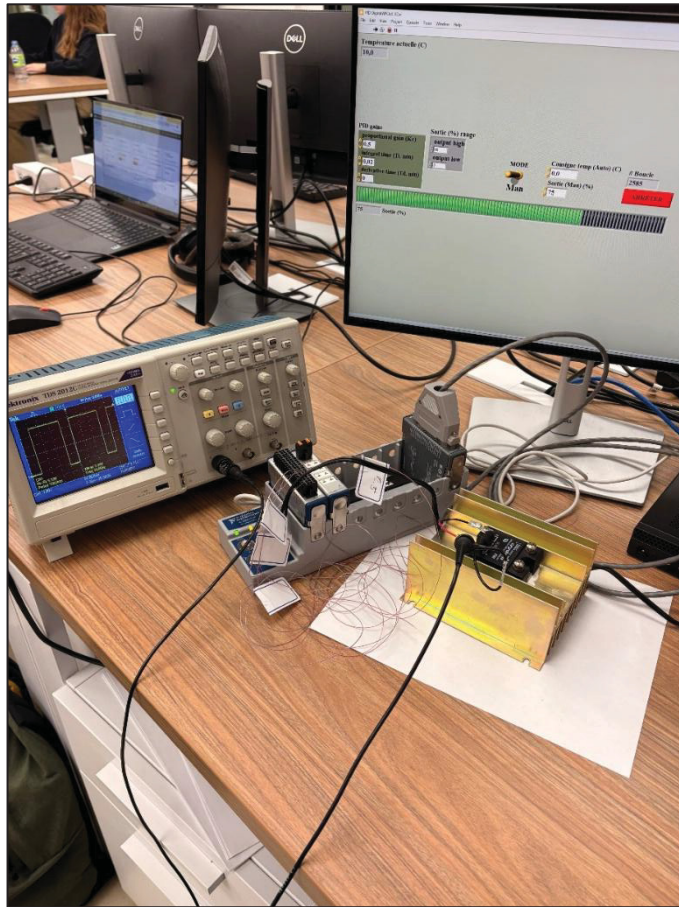


Figure-A I-8 Carte de commande et test de la commande numérique par LabView

L'interface LabView d'acquisition est présenté dans la figure suivante et le schéma logique associé est quant à lui décrit ci après.

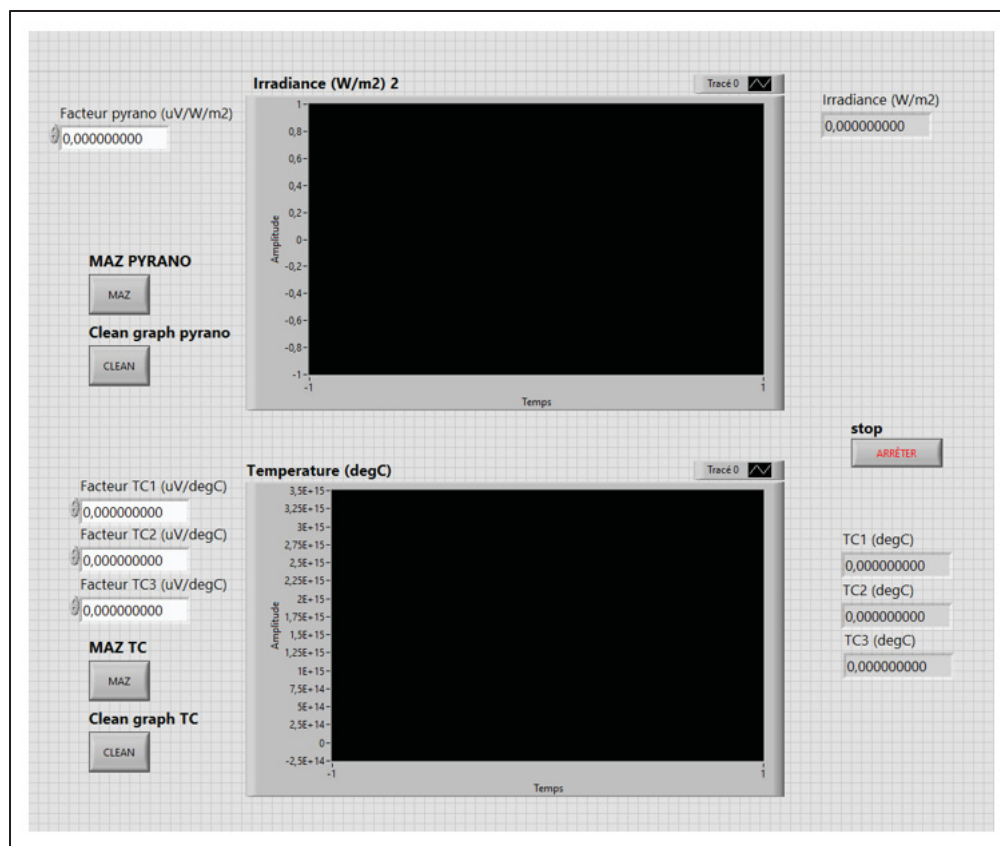


Figure-A I-9 Interface LabView d'acquisition

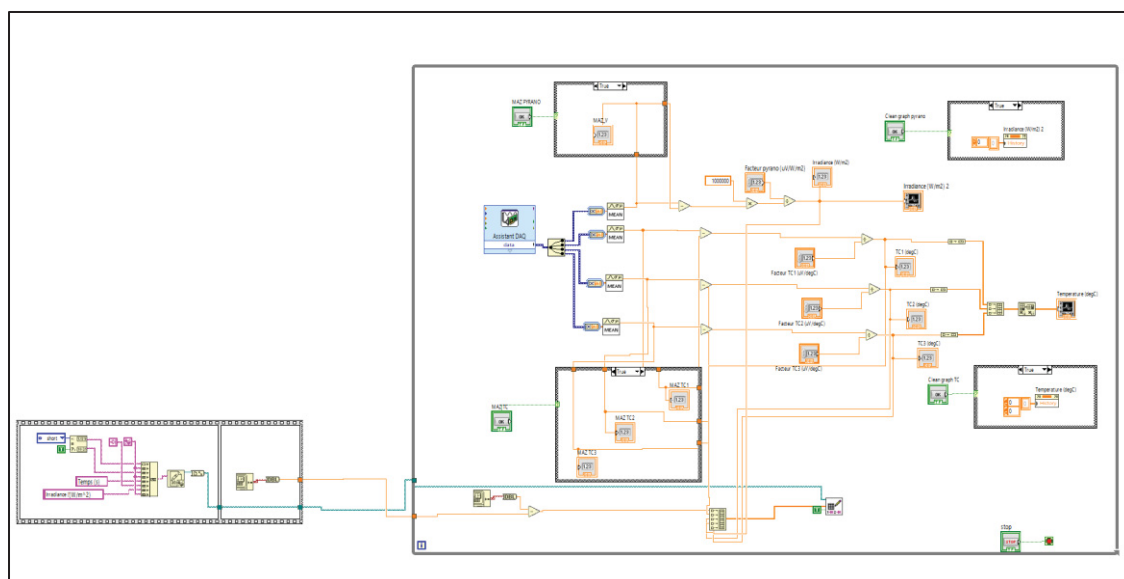


Figure-A I-10 Schéma bloc du code LabView d'acquisition

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ahmed, S., Li, Z., Javed, M. S., & Ma, T. (2021). A review on the integration of radiative cooling and solar energy harvesting. *Materials Today Energy*, 21, 100776. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2021.100776>
- Aili, A., Yin, X., & Yang, R. (2021). Global Radiative Sky Cooling Potential Adjusted for Population Density and Cooling Demand. *Atmosphere*, 12(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/atmos12111379>
- ASHRAE. (2025). *Knovel—15. Fenestration*. <https://app.knovel.com/kn/resources/kt014ERMD1/kp8QS25B55/pdf?b-toc-cid=kp8QS25B55&b-toc-title=2025%20ASHRAE%C2%AE%20Handbook%20%20Fundamentals%20%28SI%20Edition%29&b-toc-url-slug=nonresidential-cooling>
- Benis, K., Reinhart, C., & Ferrão, P. (2017, août 7). *Building-Integrated Agriculture (BIA) in Urban Contexts : Testing a Simulation-Based Decision Support Workflow*. 2017 Building Simulation Conference. <https://doi.org/10.26868/25222708.2017.479>
- Bu, K., Yu, Z., Lai, D., & Bao, H. (2024). Energy-saving effect assessment of various factors in container plant factories : A data-driven random forest approach. *Cleaner Energy Systems*, 8, 100122. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2024.100122>
- Cai, W., Li, S., Zha, L., He, J., Zhang, J., & Bao, H. (2025). Significantly enhanced energy efficiency through reflective materials integration in plant factories with artificial light. *Applied Energy*, 377, 124587. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124587>
- Choi, E. J., Kim, J., & Lee, S. M. (2023). Energy demand analysis of a lettuce growing plant factory : A case for Indonesian and Korean regions. *Horticulture Environment and Biotechnology*, 64(5), 775-783. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s13580-023-00529-8>
- Choi, E. J., Lee, D., & Lee, S. M. (2025). Comparative analysis of the performance and energy consumption of air-conditioning systems in a plant factory during a cooling season. *Energy and Buildings*, 335, 115483. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115483>
- Choi, S.-W., Jo, S., Sung, B.-K., Kim, J.-E., Lee, K.-H., Mo, G.-U., & Choi, J.-Y. (2025). Spectral Emissivity Measurement of Supersonic Nozzles for Radiative Cooling Performance Evaluation. *Aerospace*, 12(9). <http://dx.doi.org/10.3390/aerospace12090771>
- Ding, H., Li, B., Zhang, Y., Zhang, Y., Niu, S., Han, Z., & Ren, L. Q. (2026). Bioinspired Passive Radiative Cooler with Superior Transparency and Durability for Energy-Efficient Building. In *ACS Nano* (Vol. 20, Numéro 2, p. 2451-2463). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acsnano.5c20117>

- Dong, Y., Tian, B., Wang, C. H., Zhang, G., Hua, F., Meng, W., Li, C., Yan, Y., Cheng, Z., & Wang, F. (2026). Dynamic Radiative Cooling : Mechanisms, Strategies, and Applications for Smart Thermal Management. In *Nano-Micro Letters* (Vol. 18, Numéro 1). <https://doi.org/10.1007/s40820-025-01981-0>
- Duan, G., Schalch, J. S., Zhao, X., Li, A., Chen, C., Averitt, R. D., & Zhang, X. (2019). A survey of theoretical models for terahertz electromagnetic metamaterial absorbers. In *Sensors and Actuators, A: Physical* (Vol. 287, p. 21-28). <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.12.039>
- Fan, F., Wang, J., Pan, H., Li, Z., & Zhao, D. (2024). Optical-thermal modeling and geographic analysis of dusty radiative cooling surfaces. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 205, 114878. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114878>
- Fan, W., Gao, Q., Wang, Z., Xiang, J., Wei, H., & Fan, H. (2024). Construction of Reversible Cross-Linked Polyurethane Composite Coating with Recyclability and Passive Radiative Cooling Performance. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 63(30), 13208-13217.
- Fan, W., Gao, Q., Xiang, J., Yan, J., Chen, Y., & Fan, H. (2023). Synergistic effect of silica aerogel and titanium dioxide in porous polyurethane composite coating with enhanced passive radiative cooling performance. *Progress in Organic Coatings*, 183. <http://dx.doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107763>
- Fortin, R., Mandal, J., Raman, A. P., & Craig, S. (2023). Passive radiative cooling to sub-ambient temperatures inside naturally ventilated buildings. *Cell Reports Physical Science*, 4(9), 101570. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2023.101570>
- Fu, Y., Yang, J., Su, Y. S., Du, W., & Ma, Y. G. (2019). Daytime passive radiative cooler using porous alumina. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 191, 50-54. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.10.027>
- Gao, W., & Chen, Y. (2023). Emerging Materials and Strategies for Passive Daytime Radiative Cooling. In *Small* (Vol. 19, Numéro 18). <https://doi.org/10.1002/sml.202206145>
- Gholami, M., Reza, M. H., Chowdhury, M., Arefi, A., & Muyeen, S. (2025). Net energy–cost optimization of STPV–PDRC integrated greenhouses : Balancing energy production and cooling demand under crop-specific DLI constraints. *Energy Conversion and Management*, 345, 120414. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120414>
- Gong, Q., Lu, L., & Chen, J. (2024). Progress in radiative cooling materials for urban skin : Achievements in scalability, durability, color modulation, and intelligent thermal regulation. In *Renewable Energy* (Vol. 237). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121658>

Gouvernement du Québec. (2020). *Le bioalimentaire économique—Bilan de l'année 2020*.

Guo, Y., Liu, D., Wu, L., Zheng, X., Meng, C., Zhang, J., & Chen, P. (2025). The economic and carbon emission benefits of container farms under different photovoltaic storage configurations. *Energy for Sustainable Development*, 85, 101674. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2025.101674>

Hassanien, R. H. E., Zhao, B., Hadibi, T., & Pei, G. (2025). Progress of radiative cooling films and nanofluids in greenhouses for energy and water-saving. In *Applied Thermal Engineering* (Vol. 279). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.127493>

Hu, X., Shi, Z., Zhao, Y., Ji, Q., Wang, X., Zhou, K., Zhou, C., Quan, B., Wu, H., Lu, X., & Qu, J. (2025). Double-networked polypropylene-based leakage-proof phase change/radiative cooling films with high emissivity for remarkable cooling performance. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 283. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2025.113452>

Huang, J., Chen, W., Kuang, Q., Xiao, T., Jiang, L., Tan, X., & Lei, Y. (2024). An advanced passive radiative cooling emitter with ultrahigh sub-ambient cooling performance. *Journal of Materials Chemistry A*, 12(44), 30351-30361.

Huang, J., Yuan, L., Liao, J., Liu, Y., Li, D., Wang, Y., Lin, H., Ji, C., Ma, X., Huang, C., & Luo, X. (2025). A Janus Spectrally Selective Glazing Toward All-Season Energy-Efficient Windows. *Small*, 21(10), 2407204. <https://doi.org/10.1002/sml.202407204>

IEA. (2018). *The Future of Cooling*.

Jia, H., Zhang, J., Hou, Y., Pan, Y., Liu, C., Shen, C., Ma, J., & Liu, X. (2025). Bio-Mass Radiative Cooling Materials : Progress and Prospects. In *Advanced Sustainable Systems* (Vol. 9, Numéro 2). <https://doi.org/10.1002/adsu.202400773>

Jiang, S., Li, M., Hu, Z., Zhang, F., Zhang, X., Liu, W., Omer, A. A. A., & Lv, H. (2025). A Low-Cost and Large-Scale Producible Polymer Multilayer Radiative Cooling Film for Reducing Plant Heat Stress. *ACS Photonics*, 12(1), 528-536. <https://doi.org/10.1021/acsphotonics.4c02043>

Kaminski, A. G., & Babbitt, C. W. (2024). Qualitative analysis of hydroponic container farm adoption, use, and benefits in the U.S. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 4(4), 045001. <https://doi.org/10.1088/2634-4505/ad797c>

Ko, B., Badloe, T., & Rho, J. (2021). Vanadium Dioxide for Dynamically Tunable Photonics. In *ChemNanoMat* (Vol. 7, Numéro 7, p. 713-727). <https://doi.org/10.1002/cnma.202100060>

Kousis, I., & Pisello, A. L. (2023). Toward the Scaling up of Daytime Radiative Coolers : A Review. *Advanced Optical Materials*, 11(21), 2300123. <https://doi.org/10.1002/adom.202300123>

- Lai, D. J. Y., Chua, E. M., Koyande, A. K., Hong, W. T., & Khoiroh, I. (2025). Harnessing acrylic-PVDF binders in paint formulation for enhanced passive cooling performance. *Applied Energy*, 377. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124510>
- Lakshmanan, R., & Rajaram, K. (2025). Experiencing Passive Daytime Radiative Cooling in Commercial Roofs with Ultrahigh-Temperature Reduction Using Micro/Nanoparticles-Distributed Porous Polymeric Structure. *Energy Technology*, 13(5). <http://dx.doi.org/10.1002/ente.202401869>
- Lee, D., Go, M., Son, S., Kim, M., Badloe, T., Lee, H., Kim, J. K., & Rho, J. (2021). Sub-ambient daytime radiative cooling by silica-coated porous anodic aluminum oxide. *Nano Energy*, 79, 105426. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105426>
- Li, J., Wang, R., Xing, M., & Wang, R. (2025). Effect of random microstructure of the film surface on daytime radiative cooling performance. *Solar Energy*, 292. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2025.113434>
- Li, P., Zhang, T., Song, Z., Chen, D., Yang, Y., He, J., Lei, X., Tian, H., & Zhang, K. (2025). Biomass-based mineralized chitin microsheets for high-efficiency radiative cooling. In *International Journal of Biological Macromolecules* (Vol. 308). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.142360>
- Li, W., Li, Y., & Shah, K. W. (2020). A materials perspective on radiative cooling structures for buildings. *Solar Energy*, 207, 247-269. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.06.095>
- Li, W., Zhan, H., Huang, N., Ying, Y., Yu, J., Zheng, J., Qiao, L., Li, J., & Che, S. (2024). Scalable and Flexible Multi-Layer Prismatic Photonic Metamaterial Film for Efficient Daytime Radiative Cooling. *Small Methods*, 8(7). <http://dx.doi.org/10.1002/smt.202301258>
- 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>
- Liebman-Pelaez, M., Kongoletos, J., Norford, L. K., & Reinhart, C. (2021). Validation of a building energy model of a hydroponic container farm and its application in urban design. *Energy and Buildings*, 250, 111192. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111192>
- Lim, J., Jung, J., Rho, J., & Kim, J. B. (2024). Cooling Performance Prediction of Particle-Based Radiative Cooling Film Considering Particle Size Distribution. *Micromachines*, 15(3). <http://dx.doi.org/10.3390/mi15030292>
- Liu, C.-H., Ay, C., Tsai, C.-Y., & Lee, M.-T. (2019). The Application of Passive Radiative Cooling in Greenhouses. *Sustainability*, 11(23), 6703. <https://doi.org/10.3390/su11236703>

- Lv, J., Bai, R., Li, L., & Liu, G. (2025). Selective Emitter Based on MgF₂ Photonic Structure for Subambient Radiative Cooling. *ACS Applied Materials and Interfaces*, *17*(41), 57516-57522.
- Mascaretti, L., Chen, Y., Henrotte, O., Yesilyurt, O., Shalaev, V. M., Naldoni, A., & Boltasseva, A. E. (2023). Designing Metasurfaces for Efficient Solar Energy Conversion. In *ACS Photonics* (Vol. 10, Numéro 12, p. 4079-4103). <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.3c01013>
- NASA PACE. (2026). *NASA PACE - Section III: Light & the Atmosphere*. https://pace.oceansciences.org/atmos_light.cgi
- Ni, J., Jin, C., Zhang, W., Li, L., Pei, G., & Zhao, B. (2025). Two-step molding of polymer coating for efficient daytime radiative cooling. *Journal of Energy Chemistry*, *107*, 533-539.
- Nie, S., Bai, L., Lin, G., Guo, Y., Yuan, K., Zhang, Y., Lan, H., Su, S., Qi, G., & Wang, M. (2025). High-Thermal-Conductivity Radiative Cooling Films for Enhanced Passive Daytime Cooling. *ACS Applied Materials and Interfaces*, *17*(36), 51335-51347.
- Nie, Z., Liu, D., Meng, C., & Song, R. (2024). Research on Thermal Environment of Container Farms : Key Factor Identification and Priority Analysis. *Sustainability*, *16*(14), 6105. <https://doi.org/10.3390/su16146105>
- NOAA. (2023). *The Atmospheric Window | National Oceanic and Atmospheric Administration*. <https://www.noaa.gov/jetstream/satellites/absorb>
- Peng, Z., Zeng, F., Zeng, Z., Su, P., Tang, P. J., Liu, B., Zhang, Y., Wang, Y., & Zhao, H. (2025). Scalable Low-Carbon Ambient-Dried Foam-Like Aerogels for Radiative Cooling with Extreme Environmental Resistance. In *Advanced Materials* (Vol. 37, Numéro 35). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/adma.202505224>
- Poredo, P., Shan, H., Wang, C., Chen, Z., Shao, Z., Deng, F., Liu, H., Yu, J., & Wang, R. (2024). Radiative sky cooling thermal concentration with cooling power exceeding one kW per square meter. *Energy and Environmental Science*, *17*(6), 2336-2355.
- Raman, A. P., Anoma, M. A., Zhu, L., Rephaeli, E., & Fan, S. (2014). Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight. *Nature*, *515*(7528), 540-544. <https://doi.org/10.1038/nature13883>
- Ran, X., Liu, C., & Chen, B. (2026). Synergistic radiative-evaporative cooling film for high-efficiency daytime passive cooling and photovoltaic thermal management. *Journal of Materials Science and Technology*, *249*, 189-195.

- Sambor, D. J., Wilber, M., Whitney, E., & Jacobson, M. Z. (2020). Development of a tool for optimizing solar and battery storage for container farming in a remote arctic microgrid. *Energies*, 13(19). Scopus. <https://doi.org/10.3390/en13195143>
- 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, Progress in Solar Energy* 2, 85(12), 3085-3102. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.023>
- Schmidt Rivera, X., Rodgers, B., Odanye, T., Jalil-Vega, F., & Farmer, J. (2023). The role of aeroponic container farms in sustainable food systems – The environmental credentials. *Science of The Total Environment*, 860, 160420. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160420>
- Song, R., Liu, D., Pan, Y., Cheng, Y., & Meng, C. (2023). Container farms : Energy modeling considering crop growth and energy-saving potential in different climates. *Journal of Cleaner Production*, 420, 138353. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138353>
- Tian, X., Wang, H., Lu, Y., Wang, M., Wang, J., Liu, H., Zhou, W., Zhao, G., Gao, J., Sun, F., Meng, X., & Qu, Z. (2025). Auto-Deposited Microparticle Composite Coating for Low-Cost and Efficient Daytime Radiative Cooling. In *ACS Applied Materials and Interfaces* (Vol. 17, Numéro 5, p. 8274-8284). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acsami.4c18499>
- Uyanga, K. A., Fan, W., & Han, J. (2025). Advancing passive radiative cooling technology for green buildings : The potential and challenges of hydrogels. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 222). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115972>
- Wang, F., Guo, J., Zheng, Y., Ke, M., Zheng, W., Jiang, Y., & Sun, C. (2025). Effects of structural parameters on cooling performance of radiative cooling panel. *Journal of Building Engineering*, 115. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.114524>
- Wang, J., Chen, M., Cao, X. E., Liu, X., Wei, P., Xu, Q., Yao, H., Ci, E., Zhang, Q., Lv, S., Tian, Y., & Li, Y. (2026). 24-h Bidirectional Thermal Energy Harvesting : From Light to Darkness. In *Advanced Materials* (Vol. 38, Numéro 5). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/adma.202516756>
- Wu, S., Cao, Y., Li, Y., & Sun, W. (2023). Recent Advances in Material Engineering and Applications for Passive Daytime Radiative Cooling. In *Advanced Optical Materials* (Vol. 11, Numéro 4). <https://doi.org/10.1002/adom.202202163>
- Xie, W., Fan, Z., Tan, G., Yang, R., & Wei, Y. (2025). Size-dependent radiative cooling power of glass-polymer metafilms. *Materials and Design*, 254. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2025.114095>

- Xiong, T., Chen, G., Cai, W., Zha, L., Xu, G., Wang, A., Wei, Y., Lu, X., Wei, S., Lai, D., Zhang, J., & Bao, H. (2026). Design and development of a low-cost and energy-efficient container farm for leafy greens. *Cleaner Engineering and Technology*, 30, 101135. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.101135>
- Xu, J., Wan, Z., Zhou, G., Xiao, W., Wu, J., & Liu, X. (2023). Recent Development on Materials with Selective Infrared Emission Characteristics for Advanced Applications; 选择性红外辐射材料的光谱调控及应用研究进展. In *Kuei Suan Jen Hsueh Pao/Journal of the Chinese Ceramic Society* (Vol. 51, Numéro 12, p. 3227-3239). <https://doi.org/10.14062/j.issn.0454-5648.20230359>
- Yao, X., Huang, L., Chen, Y., Hu, Y., Sagoe-Crentsil, K., & Duan, W. (2024). Nanophotonic porous structures for passive daytime radiative cooling. *Materials and Design*, 245. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2024.113256>
- Yoon, S., Seo, J., Jung, J., Choi, M., Lee, B. J., & Kim, J. B. (2024). Improving radiative cooling performance via strong solar reflection by dense Al₂O₃ particles in a polymeric film. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 227. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125574>
- Yu, X., Chan, J., & Chen, C. (2021). Review of radiative cooling materials : Performance evaluation and design approaches. *Nano Energy*, 88, 106259. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106259>
- Yu, X.-Q., Li, F., Wang, J., Zhang, N., Li, G.-X., Song, Y., Li, Q., & Chen, S. (2026). Scalable-Designed Photonic Metamaterial for Color-Regulating Passive Daytime Radiative Cooling. *Nano-Micro Letters*, 18(1). <http://dx.doi.org/10.1007/s40820-025-01975-y>
- Yu, Z., Bu, K., Liu, Y., Wang, A., Yuan, W., Xue, J., Zhang, J., Bao, H., & Lai, D. (2024). Energy examination and optimization workflow for container farms : A case study in Shanghai, China. *Applied Energy*, 374, 124038. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124038>
- Zhao, B., Hu, M., Ao, X., Chen, N., & Pei, G. (2019). Radiative cooling : A review of fundamentals, materials, applications, and prospects. In *Applied Energy* (Vol. 236, p. 489-513). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.018>
- Zhou, L., Nan, F., Feng, W.-Y., Shen, S., Zhu, Y.-F., Zhang, Z.-L., & Zhou, Y. (2026). Flexible polymer film with hierarchical pseudo-eye arrays for efficient passive radiative cooling. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 296. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2025.114078>
- Zhou, N., & Liu, D. (2025). Energy efficiency modelling and optimization for container farms in various production environments. *Energy Conversion and Management*, 346, 120471. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120471>

Zou, H., Wang, C., Yu, J., Huang, D., Yang, R., & Wang, R. (2023). Eliminating greenhouse heat stress with transparent radiative cooling film. *Cell Reports Physical Science*, 4(8), 101539. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2023.101539>

