

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie mécanique

Spécialité : Énergies renouvelables en mécanique

Par : BELAID GHIZLENE

LOUKILI YOUSRA

Sujet

**Évaluation Comparative de Peintures et Revêtements à Performances
Thermiques pour la Rénovation Énergétique des Bâtiments**

Soutenu publiquement, le 22 /06/2026, devant le jury composé de :

M. KORTI. A. N	Pr	Université de Tlemcen	Président
Mme. SARI HASSOUN. H	MAA	Université de Tlemcen	Examineur
M. GUELLIL. H	MCA	Université de Tlemcen	Encadreur
M. SELADJI. H	Pr	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Année universitaire : 2025 /2026

Remerciements

Nous remercions tout d'abord Allah, le Tout-Puissant, pour la santé, la force, la patience et la réussite qu'Il nous a accordées afin de mener à bien ce travail, ainsi que pour ces cinq années d'études riches en apprentissages et en expériences.

Le présent travail a été réalisé au sein du Laboratoire d'Énergétique et de Thermique Appliquée (ETAP). Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à tous les membres de ce laboratoire pour les moyens mis à notre disposition et pour l'environnement scientifique favorable à la réalisation de ce mémoire.

Nous adressons nos plus sincères remerciements et notre profonde reconnaissance à **Monsieur Guellil et Monsieur Seladji** pour avoir assuré l'encadrement de ce mémoire. Nous lui sommes particulièrement reconnaissantes pour sa disponibilité, sa patience, ses précieux conseils, son soutien constant ainsi que la qualité de son accompagnement tout au long de ce travail.

Nous tenons également à exprimer nos sincères remerciements à Monsieur **Korti** et Madame **Sari Hassoun** pour avoir accepté d'examiner et d'évaluer ce travail en qualité de membres du jury. Nous les remercions pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail ainsi que pour le temps qu'ils ont consacré à son évaluation.

Nous exprimons également notre profonde gratitude à nos familles pour leur confiance inébranlable, leur soutien moral et matériel, leurs sacrifices, leurs encouragements permanents ainsi que pour tous les efforts qu'elles ont consentis afin de nous offrir les meilleures conditions d'études et une éducation de qualité.

Nos remerciements s'adressent également à l'ensemble des enseignants du Département de Génie Mécanique qui ont contribué à notre formation universitaire par la qualité de leur enseignement, leurs conseils et les connaissances qu'ils nous ont transmises tout au long de notre parcours académique.

Enfin, nous tenons à nous remercier mutuellement pour notre persévérance, notre courage, notre détermination et notre volonté de réussir. Malgré les difficultés rencontrées, nous avons su nous soutenir, croire en nos capacités et avancer ensemble jusqu'à l'aboutissement de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce travail

À ma merveilleuse maman, courageuse, forte, humble et pleine de sacrifices. Tu es mon plus grand soutien, la lumière qui illumine mes jours et la raison pour laquelle je donne toujours le meilleur de moi-même. Aucun mot ne pourra jamais exprimer toute ma gratitude pour ton amour inconditionnel, ta patience infinie et tous les sacrifices que tu as consentis pour moi. Je remercie Allah chaque jour de m'avoir accordé une mère aussi précieuse que toi. Je t'aime infiniment. Qu'Allah te rende heureuse dans cette vie et dans l'au-delà, au plus beau des jardins du Paradis — *Jannah*.

À mon père, mon héros de toujours, celui qui m'appelle affectueusement « Ghzala » et qui, par ce seul mot, me rappelle combien je suis chérie. Merci pour tout ce que tu as fait et continues de faire pour notre famille avec amour et dévouement. Qu'Allah te guérisse, te protège et t'accorde une longue vie heureuse parmi nous. Je t'aime profondément, et je serai toujours fière, à jamais, d'être ta fille.

À mon grand frère ILYES, mon « jumeau » malgré nos sept années de différence — maman nous appelle ainsi depuis toujours, et ce lien si particulier restera unique à jamais. Merci pour ton soutien, ta présence rassurante et tout ce que tu représentes pour moi. Je t'aime infiniment, jusqu'à la lune et retour.

À ma grande sœur IMEN, la plus intelligente et la plus belle à mes yeux, mon premier modèle et ma première source d'apprentissage. J'ai grandi en apprenant de toi, et je continue encore aujourd'hui à m'inspirer de ta force et de ta sagesse. Je suis fière de toi et infiniment reconnaissante de t'avoir dans ma vie. Je t'aime, jusqu'à la lune et retour.

À mes adorables nièces, Maithaa et Maryam, même si la distance nous sépare parfois, j'ai l'impression de vous voir grandir près de moi chaque jour. Vous apportez tant de joie, de douceur et de bonheur dans nos vies. Je vous aime très fort, mes petites chéries.

À mes deux familles, BELAID et BENAZZI, merci pour votre amour, votre bienveillance et votre soutien tout au long de ce chemin. Vous êtes ma force et mon ancre. Qu'Allah vous préserve tous et vous comble de Sa grâce.

À ma très chère amie et binôme, YOUSRA, cette aventure n'aurait pas eu la même saveur sans toi. Merci pour ta patience, ton énergie, ta bonne humeur et ta confiance. Nous avons traversé ensemble les doutes, les nuits de travail et les moments de fierté et c'est ensemble que nous arrivons au bout. Je suis reconnaissante que la vie t'ait mise sur mon chemin. Que notre amitié dure bien au-delà de ce mémoire.

À mes amies, mes sœurs de cœur, merci pour tous les moments partagés, les éclats de rire, les souvenirs gravés, le soutien dans les moments difficiles et les encouragements qui m'ont portée durant toutes ces années. Votre présence a rendu ce parcours infiniment plus beau et plus léger.

Enfin, à toutes les personnes qui ont croisé ma route et qui m'ont aidée, soutenue ou encouragée — de près ou de loin — par leurs paroles, leur temps, leurs précieux conseils ou simplement par un sourire sincère : je vous adresse ma plus profonde et sincère gratitude. Vous faites partie de cette réussite.

BELAID Ghizlene

Au nom d'Allah, le Clément, le Miséricordieux. *Louange à Dieu Le Tout-Puissant, qui m'a insufflé la force, la patience et la volonté nécessaires pour franchir chaque obstacle et mener à bien ce projet.* Du plus profond de mon cœur, je dédie ce mémoire :

À ma très chère **maman**, La source de ma tendresse, de ma force et de ma persévérance. Aucune dédicace, aucun mot ne saurait exprimer mon amour, mon respect et ma profonde gratitude pour tes sacrifices et tes prières quotidiennes qui m'ont ouvert les portes du succès. Que ce travail soit le reflet de ta patience et une source de fierté pour toi. Que Dieu te garde, te protège et t'accorde une longue et heureuse vie.

À mon cher **père**, Mon modèle de rigueur, de persévérance et de droiture. Merci pour ton soutien inconditionnel, tes précieux conseils et pour tous les sacrifices que tu as faits pour m'offrir la meilleure éducation possible. Ta fierté a toujours été ma plus grande motivation pour réussir. Que ce modeste travail soit le témoignage de ma profonde gratitude et de mon immense respect. Que Dieu te protège, te bénisse et t'accorde une longue vie et une bonne santé.

À mes **petits frères et sœur ISLEM, MALEK, RAZAN** et ma grande sœur **AYA** Qui sont ma fierté et ma motivation au quotidien. J'espère que ce diplôme sera pour vous une source d'inspiration et un exemple de persévérance. Merci pour votre amour et votre soutien indéfectible.

À mes fidèles **amis, FATIHA, RANIA, SALIHA** pour leur soutien inestimable, leur écoute et tous les moments mémorables partagés durant ce parcours universitaire.

À mes deux grandes familles, **La famille LOUKILI** et **La famille IZNASNI**, pour leur bienveillance, leur fierté partagée et leur soutien constant à chaque étape de ma vie.

À ma gérante au travail, **FATIMA ZAHRA** ma deuxième Maman Qui a cru en moi et m'a soutenue sans relâche pour que je puisse mener de front mon travail et mes études. Merci pour votre flexibilité, vos encouragements et votre immense humanité durant les périodes de rush et d'examens. Ce diplôme est aussi le fruit de l'environnement bienveillant que vous avez su créer pour moi.

À mon cher binôme et complice, **GHIZLENE** qui est devenue bien plus qu'une simple camarade de projet, une véritable amie sur qui je peux compter. Merci d'avoir partagé mes moments de panique, mes doutes et mes épuisements, et d'avoir toujours trouvé les mots pour me rebooter. Ce mémoire restera à jamais le symbole de nos fous rires, de nos confidences et de notre résilience commune face au stress. Réussir sans toi n'aurait pas eu la même saveur. Merci pour tout ce que tu es.

A tous mes enseignants depuis mes premières années d'études

Merci infiniment

LOUKILI YOUSRA

ملخص

الهدف من هذا العمل هو إجراء تقييم مقارن للأداء الحراري لمختلف الدهانات والطلاءات المطبقة على ملاط الإسمنت في إطار تحسين الكفاءة الطاقوية للمباني. ولإعادة إنتاج ظروف التعرض الشمسي بشكل مضبوط، تم تطوير جهاز تجريبي يعتمد على الإشعاع الاصطناعي داخل مخبر الطاقوية والحرارة التطبيقية بجامعة تلمسان. وقد تم قياس درجات حرارة أسطح العينات أنياً باستعمال المزدوجات الحرارية (Thermocouples) ، مع استكمال ذلك بقياسات التدفقات الإشعاعية وتحليل الصور الحرارية بواسطة كاميرا حرارية.

أظهرت النتائج التجريبية وجود تباين واضح في أداء المعالجات السطحية المختلفة. فقد حققت الطلاءات والدهانات البيضاء أفضل أداء حراري بفضل قدرتها على عكس جزء كبير من الإشعاع الساقط، مما ساهم في خفض درجة حرارة سطح الجدار بمقدار يتراوح بين 4 و 10 درجات مئوية، مع توفير كفاءة تبريد سلبي ممتازة تجاوزت 30٪ مقارنة بملاط الإسمنت غير المطلي المعتمد كمرجع. وعلى العكس من ذلك، أدى الطلاء الأسود إلى امتصاص كمية كبيرة من الحرارة، مما أثر سلباً على التوازن الحراري. وتُبرز هذه الدراسة أن استخدام الطلاءات العاكسة، ولا سيما مسحوق الرخام وطلاء الباكسالوميني (Paxaluminé)، يمثل استراتيجية سلبية بسيطة وفعالة للحد من ظاهرة ارتفاع الحرارة وتحسين الكفاءة الطاقوية لغلّاف المباني.

الكلمات المفتاحية: التجديد الطاقوي، الطلاءات العاكسة، ملاط الإسمنت، الإشعاع الاصطناعي، التصوير الحراري بالأشعة تحت الحمراء، التبريد السلبي، الكفاءة الحرارية.

Abstract

The objective of this study is to comparatively evaluate the thermal performance of various paints and coatings applied to cement mortar for building energy retrofitting applications. To reproduce controlled solar exposure conditions, an experimental setup using artificial radiation was developed in the Applied Energy and Thermal Engineering Laboratory of the University of Tlemcen. Real-time surface temperature measurements of the specimens were carried out using thermocouples, complemented by radiative heat flux measurements and thermal imaging analysis.

The experimental results reveal a clear distinction between the performances of the different surface treatments. White coatings and paints exhibited the best thermal behavior by reflecting a significant portion of the incident radiation, thereby reducing wall surface temperatures by 4 to 10 °C and providing excellent passive cooling efficiency exceeding 30% compared with uncoated cement mortar used as the reference material. In contrast, black paint absorbed a large amount of heat and negatively affected the thermal balance. The findings demonstrate that the integration of reflective coatings, particularly marble powder and Paxaluminé, represents a simple and effective passive strategy for mitigating overheating and enhancing the energy efficiency of building envelopes.

Keywords: Energy renovation, Reflective coatings, Cement mortar, Artificial radiation, Infrared thermography, Passive cooling, Thermal efficiency.

Résumé

L'objectif de ce travail consiste à évaluer de manière comparative les performances thermiques de différentes peintures et revêtements appliqués sur du mortier de ciment pour la rénovation énergétique des bâtiments. Afin de reproduire les conditions d'ensoleillement contrôlées, un dispositif expérimental sous rayonnement artificiel a été adapté en laboratoire (Énergétique et thermique appliquée) de l'Université de Tlemcen. L'acquisition en temps réel des températures de surface des échantillons a été effectuée à l'aide de thermocouples, complétée par des mesures de flux radiatifs et une analyse par caméra thermique. Les résultats expérimentaux mettent en évidence une distinction claire entre les performances des différents traitements. Les revêtements et peintures blancs dominent l'évaluation en réfléchissant une part importante du flux incident, ce qui permet de réduire considérablement la température de la paroi entre 4 et 10 °C et d'offrir une excellente efficacité de refroidissement passif supérieure à 30% par rapport au mortier nu sans revêtement pris comme référence. À l'inverse, la peinture noire absorbe la chaleur et dégrade le bilan thermique. Ce projet démontre ainsi que l'intégration de revêtements réfléchissants (poudre de marbre et paxaluminé) constitue une stratégie passive simple et efficace pour limiter la surchauffe et optimiser l'efficacité énergétique de l'enveloppe des bâtiments.

Mots clés : Rénovation énergétique, Peintures réfléchissantes, Mortier de ciment, Rayonnement artificiel, Thermographie infrarouge, Refroidissement passif, Efficacité thermique.

Table des matières

Remerciements	
الملخص	
Abstract	
Résumé	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	
Introduction générale.....	1
Chapitre I:Rechèrche bibliographique	1
I.1. Introduction.....	5
I.2. Revue de la littérature	5
Chapitre II : Modes de transfert thermique.....	21
II.1. Introduction	22
II.2. Définition	22
II.3. Les modes de transfert de chaleur	23
II.3.1. La conduction	23
II.3.1.1. Loi de Fourier	23
II.3.1.2. Conductivité thermique	24
II.3.2. Convection.....	27
II.3.2.1. Définition.....	27
II.3.2.2. Convection naturelle.....	28
II.3.2.3. Convection forcée.....	28
II.3.2.4. Types d'écoulement.....	29
II.3.2.5. Régimes d'écoulements	29
II.3.2.6. Loi de Newton	30
II.3.2.7. Coefficient d'échange convectif.....	31
II.3.2.8. Paramètres caractéristiques de la convection	31
II.3.3.Rayonnement.....	33
II.3.3.1. Rayonnement solaire	33
II.3.3.1.1. Définition.....	33
II.3.3.1.2. Lois fondamentales du rayonnement solaire	34

II.3.3.2. Rayonnement thermique	35
II.3.3.3. Albédo et réflectance des surfaces.....	35
II.3.3.3.1. Définitions	35
II.3.3.4. Fondements physiques du rayonnement infrarouge et de la thermographie	38
II.3.3.4.1. Définition.....	38
II.3.3.4.2. Imagerie thermique	38
Chapitre III : Procédure expérimentale.....	18
III.1. Introduction	40
III.2. Description de l'installation	40
III.3. Méthodes de réalisation.....	41
III.3.1. Réalisation des plaques en mortier de Ciment.....	41
Phase 1 : Fabrication du Moule Métallique.....	41
1.1 Découpage des barres métalliques.....	41
1.2 Ponçage des barres.....	42
1.3 Assemblage et soudage du moule	43
Phase 2 : Préparation et Coulage du Mortier de Ciment.....	45
2.1 Calcul des quantités et préparation du mortier	45
2.2 Coulage et mise en œuvre	46
2.3 Séchage et démoulage.....	47
III.3.2. Traitement de surface par différents revêtements.....	47
III.3.3. Adaptation du dispositif expérimental	50
III.3.4. Instrumentation et acquisition des données	51
III.3.4.1. Chaîne d'acquisition — National Instruments (NI).....	51
III.3.4.2. Capteurs de température Thermocouples type K	52
III.3.4.3. Solarimètre	52
III.3.4.4. Caméra thermique	53
III.3.4.5. Logiciel d'acquisition LabVIEW.....	54
III.3.5. Protocole de mesure et positionnement des capteurs.....	55
III.4. Flux net reçu par une surface.....	57
III.5. Réflectance solaire (SRI).....	57
III.6. Efficacité thermique	58
Chapitre IV: Résultats et discussions.....	35
IV.1. Introduction	60
IV.2. Montage expérimental.....	60

IV.3. Analyse de l'évolution des températures des faces avant et arrière	61
IV.4. Analyse de L'évolution des différences de températures des faces avant et arrière	63
IV.5. Évolution temporelle du rayonnement réfléchi par les faces avant et arrière	64
IV.6. Analyse d'évolution du taux de réflexion par les faces avant et arrière	65
IV.7. Analyse d'évolution de la puissance réfléchie par les faces avant.....	67
IV.8. Analyse d'évolution du flux net reçu par la face avant.....	68
IV.9. Évolution temporelle du flux absorbé	70
IV.10. Analyse comparative de l'indice de réflectance solaire IRS	72
IV.11. Analyse comparative de l'indice de réflectance solaire (SRI) et de la réflectance.....	73
IV.12. Analyse comparative de l'efficacité thermique.....	75
IV.13. Conclusion du chapitre.....	77
Conclusion générale	80
Référence bibliographique	81

Liste des figures

Fig I.1. Configuration de test de lampe infrarouge pour les échantillons CC, CP et P.....	6
Fig I.2 Température de surface des échantillons sous exposition à la lampe infrarouge	6
Fig I.3 La température de surface des éprouvettes de béton sous VL et NIR au fil du temps : (a) Température de surface supérieure.....	7
Fig I.4 Dispositifs expérimentaux de chauffage contrôlé (à gauche), de chauffage par circulation d'air (au centre) et de chauffage humide (à droite) pour l'échantillon de béton	8
Fig I.5. Schéma d'imagerie thermique de l'échantillon à la température de l'air la plus élevée le 15 août	9
Fig I.6 : Températures en temps réel et températures de refroidissement le 27 juin et le 14 août.	10
Fig I.7. (a) Évolution de la température du mur en parpaings avant et après l'application du revêtement sous l'effet de la source de chaleur.(b) Évolution de la température du mur en briques avant et après l'application du revêtement sous l'effet de la source de chaleur.	11
Fig I.8. Images thermiques acquises à quatre dates différentes, sous des conditions célestes variées.....	12
Fig I.9. La plage de température de surface pour chaque marque, selon la procédure de revêtement, indiquée dans la ligne	12
Fig I.10. Moyenne marginales estimées de la réflectance. Les covariables sont considérées à leurs valeurs moyennes	13
Fig I.11. Performances thermiques du revêtement polymère à 70 vol% de microbulles de verre	15
Fig I.12. Échantillons de tuiles	16
Fig I.13. Graphique représentant la valeur TRSPEAK en fonction de la réflectance solaire .	17
Fig I.14. Échantillons en triple exemplaire provenant de différents fabricants après 3 ans de vieillissement naturel à Ras al-Khaimah : (a)inclinaison de 5° et (b) inclinaison de 45°	17
Fig I.15. Indice de réflexion solaire (SRI) en fonction du vieillissement naturel sans nettoyage périodique.....	18

Fig I.16. Percentage of potential comfort ensured during the hottest month and percentage of discomfort hours for the three roofing alternatives	19
Fig I.17. Thermogramme illustrant la répartition moyenne des températures des échantillons testés P1 et P2 au cours de la journée sous l'effet du soleil.....	20
Fig II.1. Modes de transfert de la chaleur.....	23
Fig II.2. Transfert thermique entre deux surfaces respectivement à la température T1 et T2 ($T_2 > T_1$)	24
Fig II.3. Ordre de grandeur de la conductivité thermique pour divers états de la matière dans les conditions normales de température et de pression	25
Fig.II.4 : exemple de convection naturelle	28
Fig.II.5. Exemple de convection forcée	29
Fig II.7. Écoulement interne– Régime turbulent.....	30
Fig II.6. Écoulement interne –régime laminaire.....	30
Fig II.8: modélisation du transfert thermique par convection	30
FigII.9: Spectre électromagnétique et rayonnement solaire	33
Fig.III.1. Différents matériel et accessoire de l'installation.	40
Fig III.2. Étapes de la phase de découpage	42
Fig. III.3 Ponçage des barres	43
Fig III.4. Préparation des moules pour le coulage	43
Fig III.5. Assemblage et soudage de moule	44
Fig III.6. Ponçage final du moule	44
Fig III.7. Résultat final du moule.	44
Fig.III.8. Préparation du mortier	45
Fig.III.9 Application de gouttes d'eau sur la feuille de plastique	45
Fig. III.10. Remplissage des moules et étalement de la pâte.....	46
Fig. III.11. Etalage du mortier dans les moules.	46
Fig. III.12. Présentation des 9 échantillons de mortier.....	47

Fig. III.13. Peinture aérosol noire.....	47
Fig. III.14. Application de la peinture noire.....	47
Fig. III.15. Peinture laque blanche	48
Fig. III.16. Application de la peinture laque blanche.....	48
Fig III.17. Application de la peinture lavable blanche	48
Fig. III.18. Processus d'application du revêtement bicouche.....	49
Fig. III.19. Plaque en poudre de marbre.....	49
Fig III.20 Six plaques de mortier après traitement de surface.....	49
Fig. III.21. Dispositif expérimentale avant modification	50
Fig. III.22. Dispositif expérimentale après modification	50
Fig III.23 Chaîne d'acquisition National Instruments (châssis NI cDAQ-9174 avec modules NI 9211)	52
Fig III.24 Mise en place des thermocouples de type K.....	52
Fig. III.25. Solarimètre Amprobe SOLAR-100	53
Fig. III.26. Utilisation du solarimètre dans le dispositif expérimental.....	53
Fig. III.27. Caméra thermique infrarouge Testo 890	54
Fig III. 28 L'interface de LabVIEW utilisé.....	55
Fig. III.29. Exemple de positionnement des 5 thermocouples	56
Fig. III.30. Positionnement des températures à la face arrière de la plaque.....	56
Fig. IV.1. Montage expérimental utilisé pour les mesures thermiques.	61
Fig. IV.2. Évolution temporelle des températures des faces avant et arrière du mortier de ciment revêtu de différents types de peintures.	61
Fig. IV.3. Évolution temporelle des différences de températures entre la face avant et arrière du mortier de ciment revêtu de différents types de peintures.	63
Fig. IV.4. Évolution temporelle du rayonnement réfléchi par les faces avant et arrière du mortier de ciment revêtu de différents types de peintures	65

Fig. IV.5. Évolution temporelle du taux de réflexion par les faces avant et arrière du mortier de ciment revêtu de différents types de peintures.	66
Fig. IV.6. Évolution temporelle du Puissance réfléchiée par les faces avant du mortier de ciment revêtu de différents types de peintures.	67
Fig. IV.7. Évolution temporelle du flux net reçu par la face avant du mortier sans et avec différents revêtements	69
Fig. IV.8. Évolution temporelle du flux absorbé par le mortier de ciment revêtu de différents types de peintures	71
Fig.IV.9 Analyse comparative de l'indice de réflectance solaire IRS de mortier de ciment revêtu de différents types de peintures.	72
Fig. IV.10 Analyse comparative de l'indice de réflectance solaire (SRI) et de la réflectance du mortier de ciment revêtu de différents types de peintures à $t = 5400$ s.	74
Fig. IV.11. Analyse comparative de l'efficacité thermique du mortier de ciment revêtu de différents types de peintures.	76
Fig. IV.12. Graphe récapitulatif qui compare l'évolution temporelle de P_r , T_{avant} , $T_{arrière}$ et ΔT des différents mortiers de ciment	78

Liste des tableaux

Tableau II.1 : conductivité thermique des différents matériaux [18]	27
Tableau IV.1. Analyse comparatives des paramètres thermiques et de puissance à $t = 90\text{min}$ (5400s) pour chaque configuration.....	77

Nomenclature

Acronymes		
ICU	Îlot de Chaleur Urbain	
UHI	Urban Heat Island (îlot de chaleur urbain)	
IRS / SRI	Indice de Réflectance Solaire / Solar Reflectance Index	
SR	Solar Reflectance (réflectance solaire)	
TE	Thermal Emittance (émittance thermique)	
IR	Infrarouge	
NIR	Near Infrared (proche infrarouge)	
UV	Ultraviolet	
VL	Visible Light (lumière visible)	
ASTM	American Society for Testing and Materials	
NI	National Instruments	
TC	Thermocouple	
PDMS	Polydiméthylsiloxane	
IGM	Inorganic Geopolymer Mortar (mortier géopolymère inorganique)	
SRHRC	Super Reflective High Reflective Coating	
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy	
LDPE	Low-Density Polyethylene (polyéthylène basse densité)	
DC	Dense Concrete (béton dense)	
PC	Pervious Concrete (béton pervieux)	
CR	Cool Roof (peinture réfléchissante)	
CT	Ceramic Tiles (carreaux céramiques)	
C-VR	Toiture Ventilée double peau	
ETAP	Énergétique et Thermique Appliquée (laboratoire)	
EMM	Estimated Marginal Means (moyennes marginales estimées)	
Unités physiques		
W	Watt – unité de puissance	
W/m ²	Watt par mètre carré – densité de flux thermique	
W/(m·K)	Watt par mètre par kelvin – conductivité thermique	
W·m ⁻² ·K ⁻¹	Coefficient de transfert thermique	
W·m ⁻² ·K ⁻⁴	Unité de la constante de Stefan-Boltzmann	
W·m ⁻² ·μm ⁻¹	Émittance spectrale du corps noir	
J	Joule – unité d'énergie	
J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	Capacité thermique massique	
MJ/m ²	Mégajoule par mètre carré	
MWh	Mégawatt-heure	
kWh	Kilowatt-heure	
K	Kelvin – unité de température absolue	

°C	Degré Celsius – unité de température	
m	Mètre – unité de longueur	
m ²	Mètre carré – unité de surface	
m ³	Mètre cube – unité de volume	
cm	Centimètre	
µm	Micromètre (micron)	
mm	Millimètre	
m/s	Mètre par seconde – vitesse	
m ² /s	Mètre carré par seconde – viscosité cinématique	
kg	Kilogramme – masse	
kg/m ³	Kilogramme par mètre cube – masse volumique	
kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹	Viscosité dynamique (Pa·s)	
Pa	Pascal – unité de pression	
MPa	Mégapascal	
s	Seconde – unité de temps	
min	Minute	
h	Heure	
%	Pourcentage	
–	Sans dimension (grandeur adimensionnelle)	
Lettres grecques		
λ	Conductivité thermique	[W/(m·K)]
φ / Φ	Flux de chaleur	[W]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$	
ε	Émissivité thermique de la surface	[–]
ελ	Émissivité spectrale	[–]
α	Absorptance solaire = 1 – SR	[–]
ρ	Réflectance solaire (albédo)	[–]
θ	Angle d'incidence du rayonnement	[°]
λ _{max}	Longueur d'onde d'émission maximale [µm]	[µm]
μ	Viscosité dynamique du fluide	[kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹]
ν	Viscosité cinématique	[m ² /s]
β	Coefficient de dilatation thermique	[K ⁻¹]
η	Efficacité thermique	[%]
ΔT	Gradient de température = T _{avant} – T _{arrière}	[°C]
Lettres latines		
T	Température	[°C]
T ₁ , T ₂	Températures aux faces d'une paroi	[°C]
T _s	Température de surface	[°C]
T _{air}	Température de l'air ambiant	[°C]
T _{ciel}	Température du ciel (conditions ASTM E1980)	[°C]
T _b	Température du noir standard (SRI = 0)	[°C]
T _w	Température du blanc standard (SRI = 100)	[°C]

Tf	Température du fluide	[°C]
Tp	Température de la paroi	[°C]
Tavant	Température de la face avant (exposée)	[°C]
Tarrière	Température de la face arrière	[°C]
Tamb	Température ambiante	[°C]
Tm	Température moyenne	[°C]
E	Énergie rayonnante / irradiance	[W/m²]
Eg	Irradiance globale	[W/m²]
Ed	Rayonnement diffus	[W/m²]
Ebλ	Émittance spectrale du corps noir	[W·m ⁻² ·μm ⁻¹]
Esurface	Émittance de la surface	[W/m²]
Isolaire	Irradiance solaire standard = 1000	[W/m²]
I	Intensité du rayonnement	[W/m²]
Iincident	Rayonnement solaire incident	[W/m²]
Iréfléchi	Rayonnement solaire réfléchi	[W/m²]
Pr / Prin	Puissance réfléchie – face avant	[W/m²]
Prout	Puissance réfléchie – face arrière	[W/m²]
h	Coefficient de convection	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
hc	Coefficient de convection	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
hr	Coefficient radiatif linéarisé	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
S / s	Aire de la section de passage du flux	[m²]
L / Lref	Longueur caractéristique	[m]
e	Épaisseur de la paroi	[m]
x	Variable d'espace dans la direction du flux	[m]
d	Distance parcourue	[m]
U	Vitesse caractéristique de l'écoulement	[m·s ⁻¹]
v	Vitesse d'écoulement du fluide	[m·s ⁻¹]
Cp	Capacité thermique massique	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
C	Constante de Wien = 2897	[μm·K]
C ₁	1ère constante de rayonnement = 3,742 × 10 ⁸	[W·μm ⁴ ·m ⁻²]
C ₂	2ème constante de rayonnement = 1,439 × 10 ⁴	[μm·K]
F ₁₂	Facteur de forme entre deux surfaces	[–]
Nu	Nombre de Nusselt	[–]
Re	Nombre de Reynolds	[–]
Gr	Nombre de Grashof	[–]
g	Accélération gravitationnelle = 9,81	m/s²
qnet	Flux thermique net rayonné	[W]
Sa	Rugosité de surface (ISO 25178)	[μm]
R²	Coefficient de détermination [–]	[–]
Sf	Coefficient de stockage thermique [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
Vtotal	Volume total de mortier	[m³]
Indices		

max	Maximum	
min	Minimum	
in / avant	Face avant (exposée au rayonnement)	
out / arrière	Face arrière (non exposée)	
s	Surface	
air	Air ambiant	
ciel	Ciel (conditions atmosphériques)	
amb	Ambiant	
f	Fluide	
p	Paroi	
ref / Lref	Référence / longueur de référence	
λ	Spectral (dépendant de la longueur d'onde)	
b	Corps noir (black body)	
solar	Solaire	
c	Convectif	
r	Radiatif	
net	Net (bilan)	
1, 2	Surfaces ou températures numérotées	
critique	Valeur critique de transition laminaire/turbulent	
total	Total (volume, flux ou quantité globale)	
incident	Relatif au flux incident	
réfléchi	Relatif au flux réfléchi	
absorbé	Relatif au flux absorbé	
noir	Matériau de référence noire (SRI = 0)	
blanc	Matériau de référence blanche (SRI = 100)	
échantillon	Matériau testé	

Introduction générale

Introduction générale

De nos jours, le secteur du bâtiment est confronté à un double défi majeur : la crise énergétique mondiale et les impacts de plus en plus sévères du changement climatique. En zones urbaines, le phénomène d'Îlot de Chaleur Urbain (ICU) aggrave considérablement les surchauffes estivales. Ce phénomène est principalement accentué par l'enveloppe des bâtiments et les infrastructures massives traditionnelles (comme le béton ou le mortier nu). Caractérisés par un faible albédo et une forte inertie thermique, ces matériaux absorbent une quantité massive du rayonnement solaire incident, convertissant l'énergie radiative en flux de chaleur stocké, ce qui élève les températures de surface et induit une surconsommation drastique d'énergie liée à la climatisation artificielle.

Face à ces enjeux de transition énergétique et de rénovation thermique du parc immobilier, le développement et l'intégration de technologies passives sur l'enveloppe extérieure s'imposent comme des solutions incontournables. Parmi ces stratégies, l'application de peintures et de revêtements à hautes performances thermiques (couramment qualifiés de revêtements frais ou cool coatings) suscite un intérêt scientifique grandissant.

Bien que de nombreuses investigations de terrain et simulations numériques mettent en évidence l'apport théorique de ces revêtements, il s'avère indispensable d'évaluer de manière rigoureuse et comparative leurs comportements thermo-optiques fondamentaux sous des conditions contrôlées en laboratoire.

C'est dans ce contexte global que s'inscrit notre projet de fin d'étude, intitulé « **Évaluation Comparative de Peintures et Revêtements à Performances Thermiques pour la Rénovation Énergétique des Bâtiments exposés à un rayonnement artificiel** ». L'objectif principal de ce travail consiste à concevoir et adapter un dispositif expérimental au laboratoire afin d'analyser l'évolution temporelle des températures de surface, la dynamique des flux de chaleur (transmis par conduction ou dissipés par convection) ainsi que l'indice de réflectance solaire (IRS) de différentes configurations de revêtements appliqués sur des plaques de mortier de ciment. Les performances thermiques globales de chaque échantillon traité (peinture noire brillante, laque blanche, peinture lavable blanche, revêtement en paxaluminé et poudre de marbre) sont systématiquement confrontées comme échantillons via le mortier nu utilisé comme référence.

Pour bien mener notre démarche et exposer clairement l'ensemble de nos investigations, ce mémoire est subdivisé en quatre chapitres principaux:

- Le premier chapitre est dédié à une recherche bibliographique approfondie. Il passe en revue l'état de l'art concernant les problématiques de transfert thermique à l'échelle urbaine et synthétise les principaux travaux expérimentaux, numériques et de terrain menés à l'échelle nationale et internationale sur les revêtements solaro-réfléchissants.
- Le deuxième chapitre définit les fondements théoriques et les concepts physiques de notre étude. Il détaille les différents modes de transfert thermique (conduction, convection et rayonnement), les propriétés thermo-optiques des surfaces (albédo, émissivité et indice de réflectance solaire), ainsi que les lois physiques régissant le rayonnement infrarouge et la thermographie.
- Le troisième chapitre est consacré à la procédure expérimentale et à la description de l'installation. Il décrit minutieusement la fabrication des moules, la formulation et le coulage des plaques de mortier de ciment, la méthode d'application des cinq revêtements testés, ainsi que l'adaptation structurelle du tunnel d'essai en laboratoire. Ce chapitre expose également l'instrumentation mise en œuvre, incluant les thermocouples de type K connectés à la chaîne d'acquisition National Instruments sous l'environnement LabVIEW, le solarimètre de mesure de flux incident/réfléchi, et la caméra thermique infrarouge.
- Le quatrième chapitre expose et analyse les résultats expérimentaux issus de nos essais en laboratoire. À travers l'exploitation graphique sous OriginPro et le post-traitement thermographique via IRTSoft, ce chapitre présente une analyse comparative de la dynamique thermique des revêtements, mettant en lumière la hiérarchie de leur efficacité thermique globale et leur aptitude concrète à freiner la pénétration de la chaleur dans la paroi.

Enfin, ce travail de recherche s'achève par une Conclusion Générale qui rayonne les résultats les plus marquants de notre étude comparative, valide la faisabilité technique de ces revêtements pour la rénovation passive des enveloppes de bâtiment et ouvre de nouvelles perspectives pour des investigations futures.

Chapitre I

Recherche bibliographique

I.1 Introduction

De nombreux problèmes environnementaux et énergétiques dans les zones urbaines résultent du transfert important de chaleur à travers les enveloppes des bâtiments sous l'effet du rayonnement solaire. Les matériaux classiques comme le béton, caractérisés par un albédo faible et une forte inertie thermique, absorbent une grande partie du rayonnement incident et contribuent significativement à l'élévation des températures urbaines, aggravant le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU).

Face à ces défis, les peintures réfléchissantes font l'objet de nombreux travaux de recherche. Les études dans ce domaine peuvent être classées en trois axes principaux : expérimentations en laboratoire, investigations de terrain et approches numériques. La littérature montre que la majorité des travaux expérimentaux récents portent sur la comparaison des performances thermiques et optiques de peintures noires, blanches classiques et réfléchissantes appliquées sur béton, en s'intéressant particulièrement à la réduction de température de surface, au flux thermique et à l'influence de paramètres tels que la rugosité et la texture de surface.

I.2 Revue de la littérature

Barišić et al [1] ont comparé le comportement thermique de trois matériaux de pavage en béton : le béton dense (DC), les pavés en béton (P) et le béton pervieux (PC). Ils ont utilisé une lampe infrarouge de 150 W en laboratoire et des mesures de terrain par thermographie infrarouge. Comme le montre la Figure I.1, la lampe infrarouge était placée à 30 cm au-dessus des échantillons, avec des thermocouples fixés sur les faces supérieure et inférieure pour enregistrer les températures chaque minute.

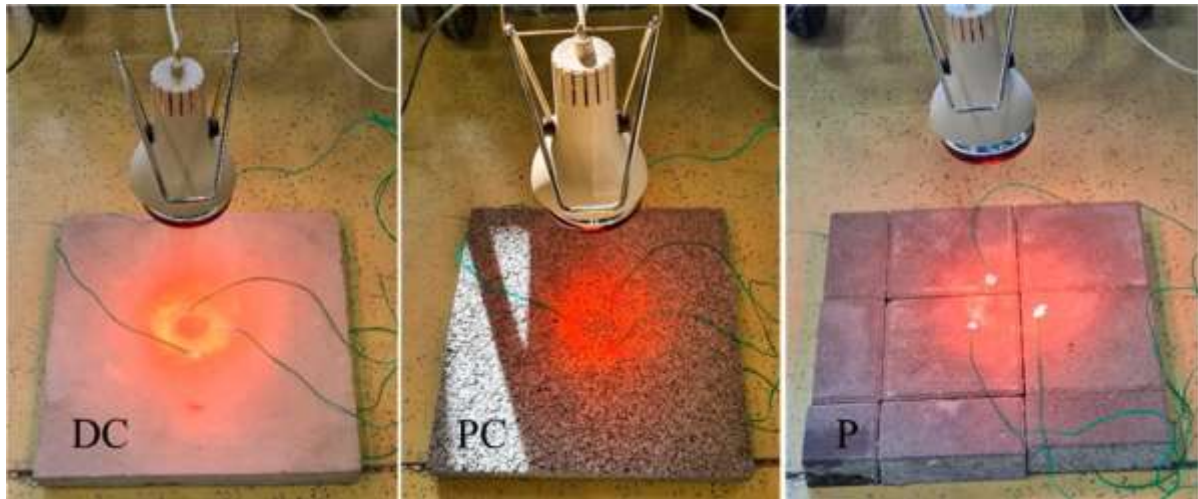


Fig I.1. Configuration de test de lampe infrarouge pour les échantillons CC, CP et P[1].

Ils ont mesuré la conductivité thermique de chaque matériau, trouvant que le DC avait la valeur la plus élevée (1,95 W/mK), suivi de P (1,57 W/mK) et de PC (1,13 W/mK). Comme illustré dans la Figure I.2, le DC, malgré sa conductivité thermique la plus élevée, présente la plus grande inertie thermique : il atteint son pic de température plus tardivement et refroidit très lentement, car sa masse dense accumule et stocke la chaleur en profondeur. À l'inverse, le PC, avec sa structure poreuse, chauffe rapidement en surface mais dissipe aussi la chaleur plus vite, limitant ainsi le stockage thermique. Les pavés P montrent un comportement intermédiaire avec un refroidissement rapide favorisé par les joints entre éléments.

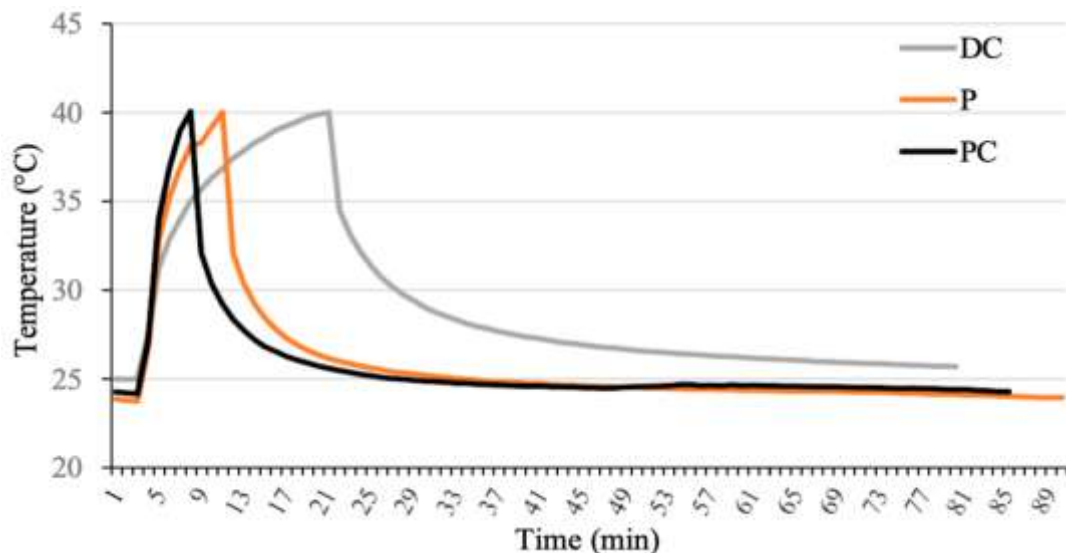


Fig I.2 Température de surface des échantillons sous exposition à la lampe infrarouge[1]

Sur le terrain, la température maximale de surface pour le béton dense était de 52 °C sur base béton contre 43,9 °C sur base herbe, montrant que le sol environnant influence fortement le comportement thermique. Le béton pervieux s'est révélé comparable aux pavés classiques

thermiquement, avec l'avantage supplémentaire d'un meilleur drainage, en faisant un matériau recommandé pour les zones piétonnes et cyclables.

Dans une approche complémentaire, Li et al.[2] ont tenté une autre approche pour contrer l'UHI : au lieu de changer le matériau de construction, ils ont testé des peintures inorganiques géopolymères (IGM) colorées sur des dalles en béton. Ils ont essayé cinq teintes: blanc, rouge, vert, bleu et jaune sur des dalles de $50 \times 50 \times 12$ cm, en mesurant la réflectance lumineuse, le flux thermique et la température de surface à la fois en laboratoire et en extérieur. Pour simuler le soleil, ils ont utilisé trois lampes halogènes de 500 W et une lampe infrarouge de 600 W, le tout pendant 20 heures. Les résultats ont révélé que la peinture IGM blanche se distinguait nettement de toutes les autres, avec une réflectance lumineuse de 87,5 % contre seulement 36,4 % pour le béton brut.

Comme le montre la Figure I.3, le béton non peint atteignait jusqu'à environ 85°C , tandis que la surface peinte en blanc IGM n'a pas dépassé 73°C . Le coefficient de stockage thermique (S_f) du blanc IGM était de $0,53 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, soit près de 46 fois moins que celui du béton brut ($24,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$). Bref, ces peintures ont un vrai potentiel pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments en ville.

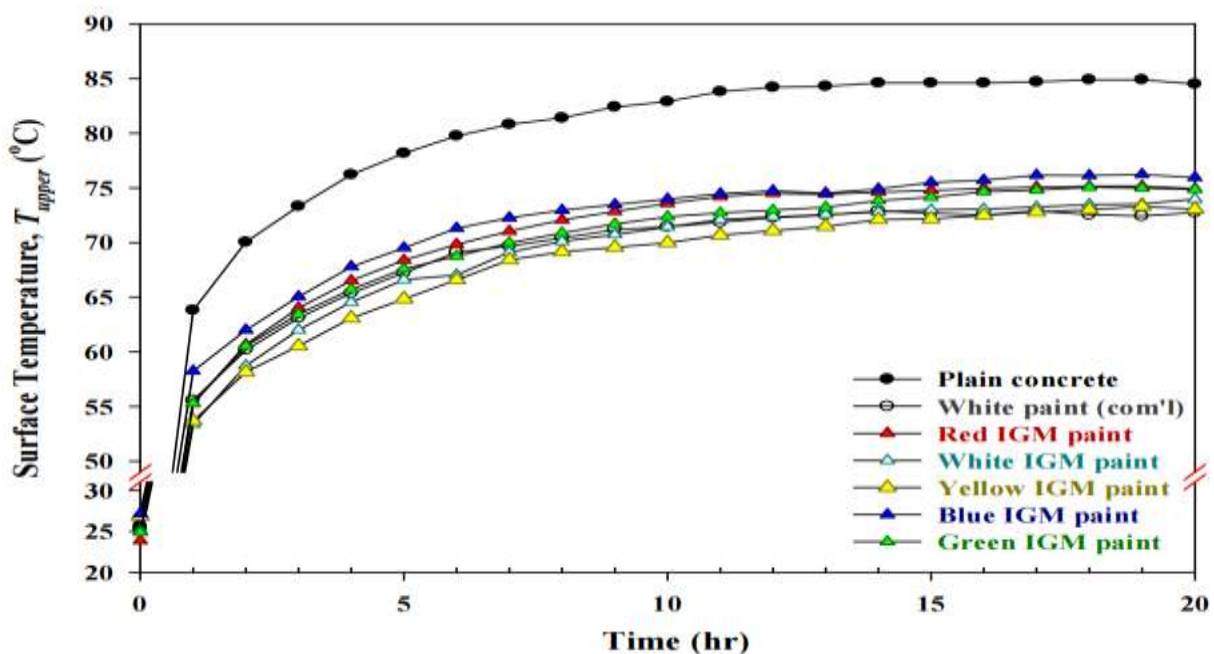


Fig I.3 La température de surface des éprouvettes de béton sous VL et NIR au fil du temps : (a) Température de surface supérieure [2]

Lu et al. [3] ont évalué en laboratoire un revêtement réfléchissant thermique sur du béton et de l'asphalte, en simulant trois conditions météorologiques : normale, venteuse et

humide. Ils ont utilisé une lampe halogène de 500 W et une caméra thermique infrarouge FLIR T430SC pour suivre les températures en surface et en sous-surface.

Le dispositif expérimental, présenté dans la Figure I.4, proposait trois configurations distinctes de chauffage contrôlé, avec ventilateur et avec humidificateur, pour reproduire des conditions climatiques urbaines réalistes dans une enceinte fermée. Les résultats ont montré que le revêtement réfléchissant réduisait la température de surface d'environ 1 °C pour le béton et de 5 °C pour l'asphalte en conditions normales, confirmant que l'asphalte, avec sa réflectivité initiale très faible (autour de 10 %), en profite davantage. En conditions venteuses, l'efficacité du revêtement diminuait nettement pour les deux matériaux, tandis qu'en conditions humides, les résultats restaient similaires aux conditions normales. L'étude a conclu que ces revêtements réfléchissants constituent une solution prometteuse pour atténuer l'îlot de la chaleur urbain, surtout sur l'asphalte et dans les villes bien ensoleillées.



Fig I.4 Dispositifs expérimentaux de chauffage contrôlé (à gauche), de chauffage par circulation d'air (au centre) et de chauffage humide (à droite) pour l'échantillon de béton [3].

Yi et al. [4] ont développé un revêtement routier super réfléchissant thermique (SRHRC) à base de résine époxy modifiée au polyuréthane. L'idée, c'était d'optimiser à la fois le refroidissement, l'adhérence et la résistance à l'abrasion, contrairement aux revêtements classiques qui ne se concentrent que sur le refroidissement. Le processus de développement comprenait des tests en laboratoire avec une boîte de simulation lumineuse à lampes iode-tungstène, et en extérieur avec un pistolet infrarouge et une caméra thermique infrarouge, sur des échantillons de six couleurs différentes (blanc, jaune, rouge, vert, orange et bleu) appliqués sur des planches d'enrobé bitumineux de 30 × 30 × 5 cm. Les résultats ont montré

que l'effet refroidissant variait selon la couleur dans l'ordre suivant : blanc > jaune > rouge > vert > orange > bleu. La réduction maximale était de 11,7 °C pour le blanc et de 10,2 °C pour le rouge. La Figure I.5 le montre bien : l'imagerie thermique infrarouge prise au moment le plus chaud le 15 août illustre visuellement cette hiérarchie de performance, le revêtement blanc apparaissant nettement plus froid que l'asphalte non revêtu.

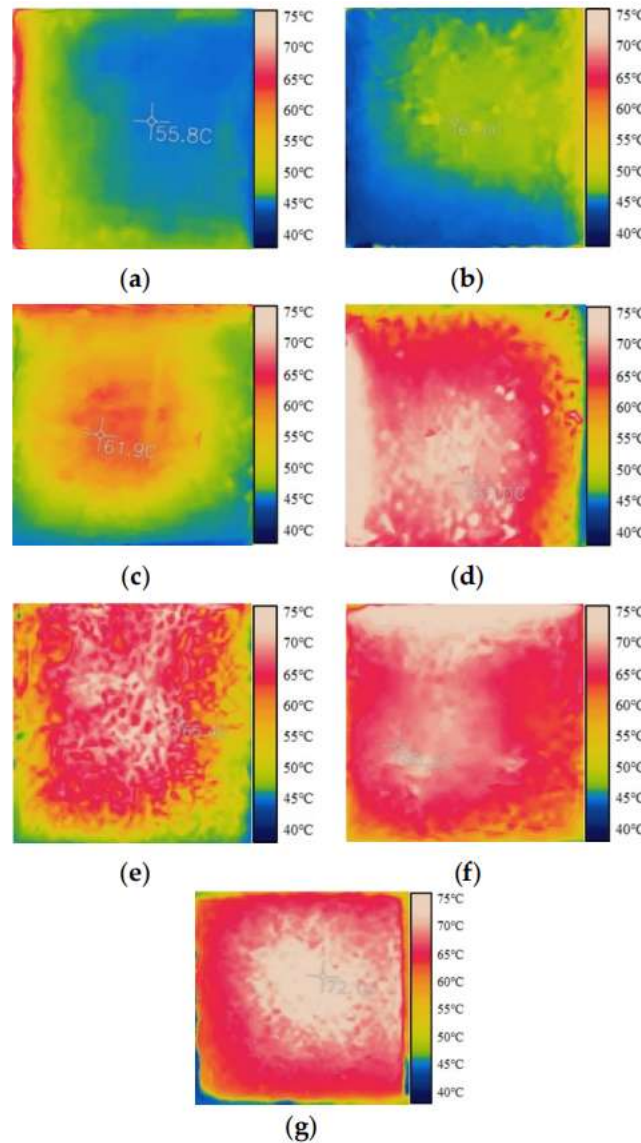


Fig I.5. Schéma d'imagerie thermique de l'échantillon à la température de l'air la plus élevée le 15 août : (a) Blanc ; (b) Jaune ; (c) Rouge ; (d) Vert ; (e) Orange ; (f) Bleu ; (g) sans revêtement [4]

Le SRHRC présentait une résistance à l'adhérence de 1,20 MPa à 25 °C, soit 20 % supérieure au revêtement ordinaire. Et sur la section d'essai réelle à Jinhua (Chine), le revêtement rouge a réduit la température de la chaussée de 7,0 °C quand elle atteignait 65,7 °C, tout en conservant des performances antidérapantes acceptables après 4 mois de circulation.

He et al. [5] ont évalué sept revêtements de refroidissement radiatif commerciaux via des tests de vieillissement en laboratoire et des mesures de terrain à Chongqing sur deux mois. Seul le revêtement F résistait stablement au vieillissement UV, tandis que B et C présentaient des fissures et D, E et G ont jauni avec une baisse nette de réflectivité. La Figure I.6 illustre l'impact du vieillissement naturel : après 50 jours, les revêtements B et C sont passés de $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ de refroidissement, tandis que G passait en réchauffement net ($+1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$). Les simulations WUFI-Plus dans cinq villes chinoises ont confirmé l'avantage des revêtements à haute réflectivité en zones chaudes, mais un effet inverse en hiver dans les zones froides. Les auteurs concluent qu'aucun revêtement n'est universellement optimal et que la résistance au vieillissement doit être un critère de sélection prioritaire .

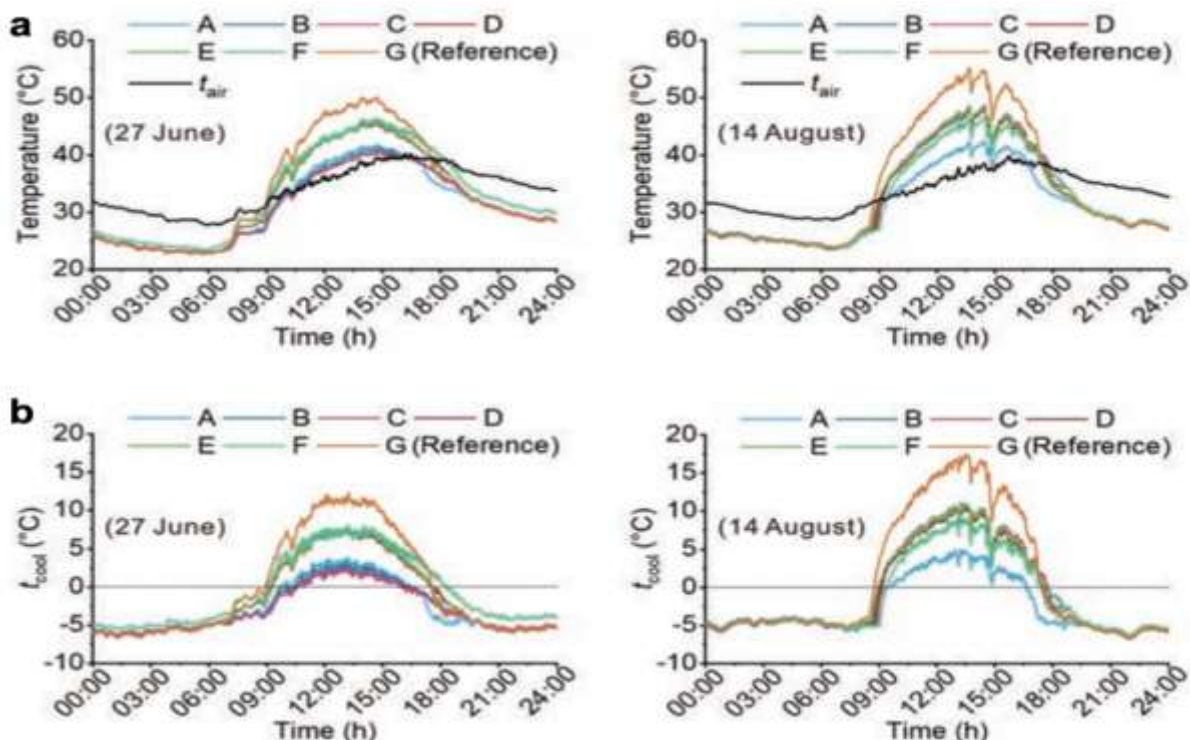


Fig I.6 : Températures en temps réel et températures de refroidissement le 27 juin et le 14 août.
(a) Températures des revêtements et de l'air ambiant le 27 juin (à gauche) et le 14 août (à droite) ; (b) Températures de refroidissement des revêtements le 27 juin (à gauche) et le 14 août (à droite)[5].

Shang et al. [6] ont mené une étude expérimentale sur les performances de réflexion thermique d'un revêtement inorganique composite appliqué sur différents types de murs : blocs de béton, briques d'argile et murs en terre. Ils ont exposé les parois à un rayonnement infrarouge en variant l'angle d'incidence, et mesuré l'évolution de la température sur les deux faces des échantillons.

Les résultats, illustrés par la Figure I.7, montrent une réduction significative de la température sur la face intérieure des murs traités par rapport aux échantillons non revêtus. Selon les configurations testées, le revêtement permet de diminuer la température intérieure de 0,7 °C à 6,6 °C. Cette performance s'accompagne d'une augmentation notable du flux de chaleur réfléchi, particulièrement efficace aux faibles angles d'incidence.

En conclusion, les auteurs estiment que ce revêtement composite inorganique constitue une solution performante et viable pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments en réduisant l'absorption solaire et en limitant les transferts thermiques à travers l'enveloppe.

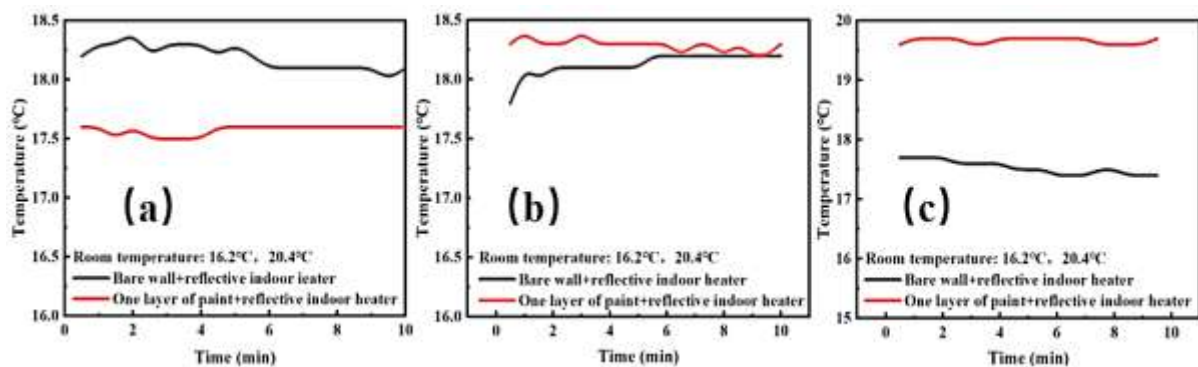


Fig I.7. (a) Évolution de la température du mur en parpaings avant et après l'application du revêtement sous l'effet de la source de chaleur.(b) Évolution de la température du mur en briques avant et après l'application du revêtement sous l'effet de la source de chaleur. (c) Évolution de la température du mur en terre avant et après l'application du revêtement sous l'effet de la source de chaleur ($\theta = 10^\circ$)[6].

Wai, Chau, et al.[7] ont mené une étude expérimentale à Melbourne pour évaluer l'efficacité thermique de six marques de revêtements de « toiture froide » appliqués sur des tuiles en béton. Ils ont utilisé une surveillance par thermographie infrarouge, et les captures visuelles présentées en Figure I.8 montrent un contraste thermique frappant entre les surfaces traitées et les témoins non revêtus sous diverses conditions météorologiques. La couleur bleu représente des températures de surface plus basses, tandis que le rouge vif ou l'orange indiquent des températures de surface plus élevées; le triangle rouge marque la zone présentant la température de surface la plus élevée et le triangle bleu celle la plus basse.

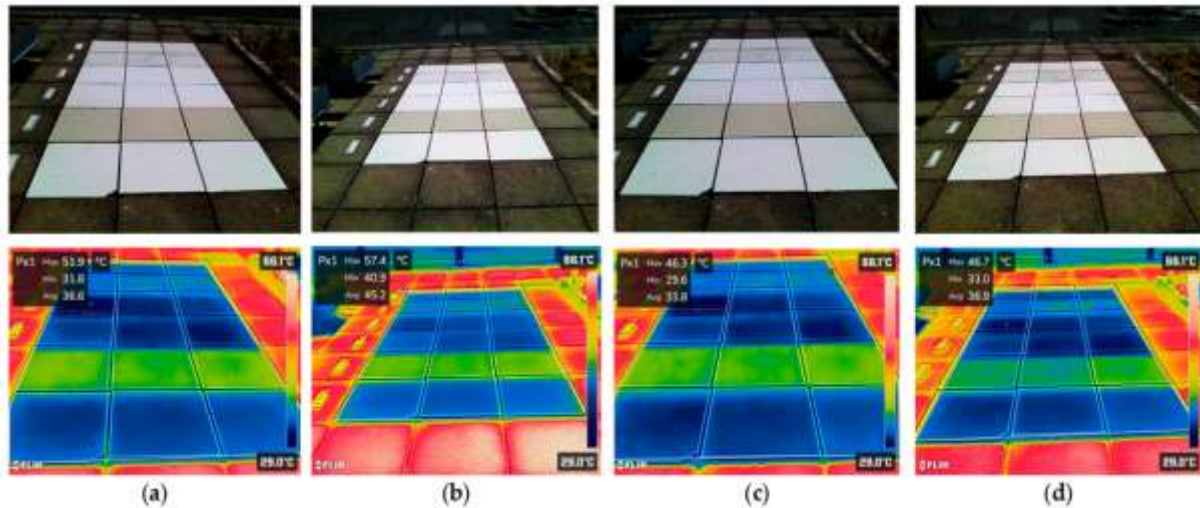


Fig I.8. Images thermiques acquises à quatre dates différentes, sous des conditions célestes variées : (a) ciel partiellement nuageux le 1er février 2024 ; (b) jour clair le 4 février 2024 ; (c) ciel couvert le 17 février 2024 ; et (d) ciel partiellement nuageux le 22 octobre 2024 [7].

Parallèlement, l'analyse quantitative détaillée dans la Figure I.9 démontre que l'application de ces peintures permet une réduction systématique de la température de surface, avec des performances variant entre 25,1 % et 45,5 % selon la marque utilisée.

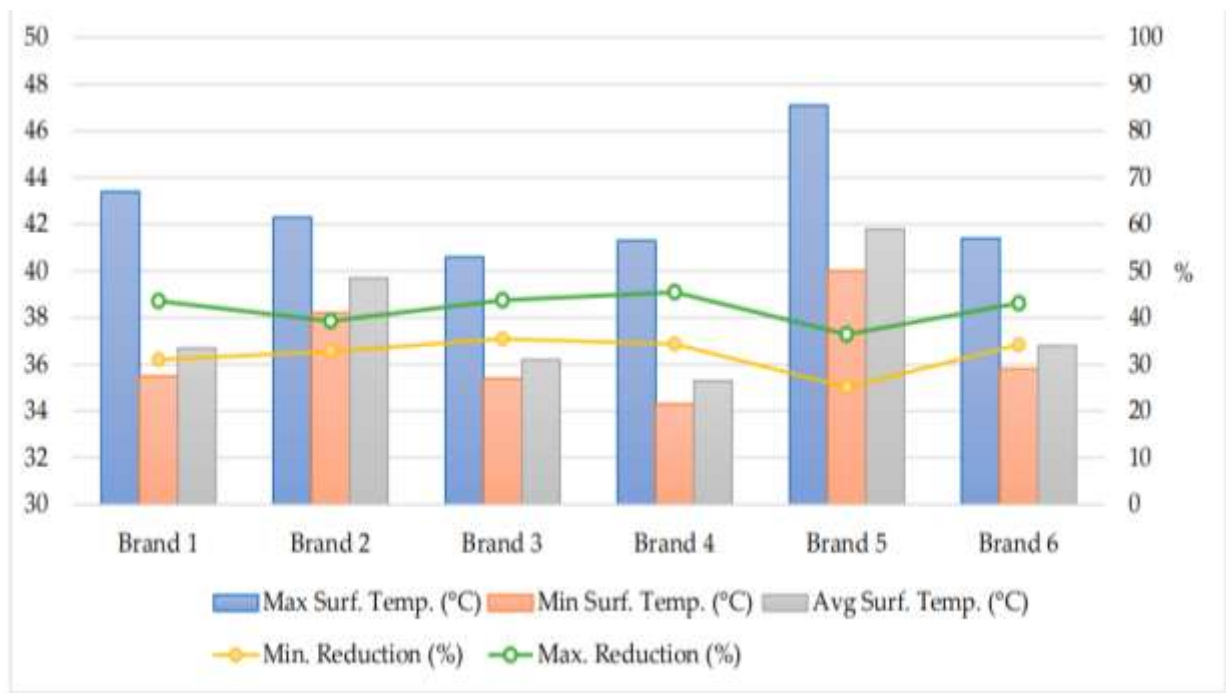


Fig I.9. La plage de température de surface pour chaque marque, selon la procédure de revêtement, indiquée dans la ligne 1 : les carreaux en béton peints sans aucune base préparatoire avant l'application des peintures pour toiture froide [7].

Les résultats soulignent que la marque 4 offre l'atténuation la plus élevée, atteignant une baisse de température maximale de 34,2 °C par rapport aux tuiles standards. En conclusion, les auteurs valident l'usage de ces revêtements comme une stratégie d'ingénierie efficace pour lutter contre les îlots de chaleur urbains et optimiser la performance énergétique des enveloppes de bâtiment.

Marchini et al. [8] ont sélectionné 18 carreaux en grès cérame extérieur de textures variées, peints en blanc, gris et noir afin d'isoler l'effet de la rugosité sur les propriétés optiques indépendamment de la couleur. La rugosité de surface a été mesurée par profilométrie optique (ISO 25178) et les coefficients de réflectance ont été obtenus par spectrophotométrie UV/Vis/NIR (300–2500 nm) selon la norme ASTM E903. Une analyse statistique RM ANCOVA était appliquée pour quantifier l'influence de la rugosité moyenne (Sa) sur la réflectance dans les trois régions du spectre solaire, en contrôlant les autres paramètres topographiques. Comme le montre la figure I.10, des moyennes marginales estimées (EMM), la réflectance chute de manière progressive d'environ 37 % pour les surfaces très lisses (classe Sa 1) jusqu'à environ 11 % pour les surfaces très rugueuses (classe Sa 5), avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,8$. Ce qui traduit une corrélation forte entre rugosité croissante et perte de réflectance, particulièrement marquée dans le domaine infrarouge proche.

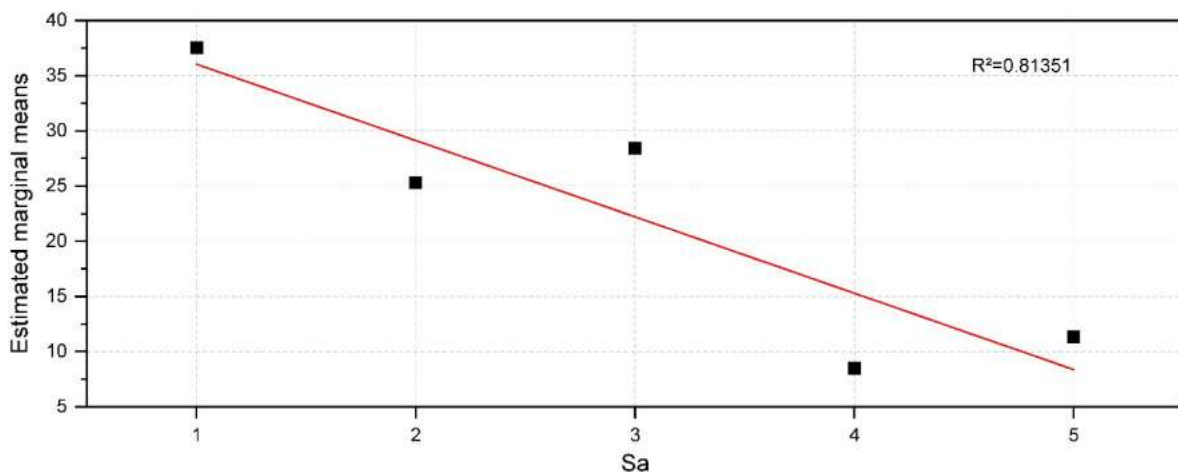


Fig I.10. Moyenne marginales estimées de la réflectance. Les covariables sont considérées à leurs valeurs moyennes [8]

Nie et al. [9] ont développé des revêtements polymères à base de polydiméthylsiloxane (PDMS) incorporant des microbulles de verre à des concentrations volumiques contrôlées de 0 à 70 %, caractérisés optiquement par spectrophotométrie UV-

VIS-NIR et FTIR avec une sphère intégrante. Ils les ont évalué thermiquement sur des petits blocs de béton de dimensions $2 \times 2 \times 0,5$ pouces sous forme d'enduit de 2 mm de couche de revêtement. Les mesures spectroscopiques ont révélé qu'une concentration de 70 % en volume de microbulles a conduit à une réflectivité solaire de 0,92 et une émissivité infrarouge maintenue au-dessus de 0,85. Ces performances sont attribuées à la large distribution des diamètres des microbulles (1 à 40 μm) favorisant une rétrodiffusion large bande conforme à la théorie de Mie. Comme l'illustre la Figure I.11, regroupant le schéma d'analyse thermique, les images infrarouge et les courbes temporelles de température, le bloc de béton recouvert du revêtement à 70 vol% présentent un refroidissement sous-ambient de 9,6 °C au pic sous une irradiance solaire de 780 W/m² en conditions de convection limitée, ainsi qu'une réduction de température d'environ 20 °C par rapport au bloc témoin sans microbulles, clairement visible sur l'image infrarouge acquise à 13h. Sans film protecteur LDPE, simulant une surface de bâtiment réellement exposée, la surface enduite maintient une température comparable à celle de l'air ambiant, démontrant l'efficacité du refroidissement radiatif dans des conditions réalistes. L'analyse énergétique conduite sur sept modèles de bâtiments commerciaux et résidentiels à Los Angeles a établi que l'application de ce revêtement sur les surfaces extérieures génère des économies annuelles de refroidissement comprises entre 2 et 12 MJ/m² sur les structures de faible hauteur bénéficiant davantage en raison de leur ratio surface extérieure/volume plus élevé.

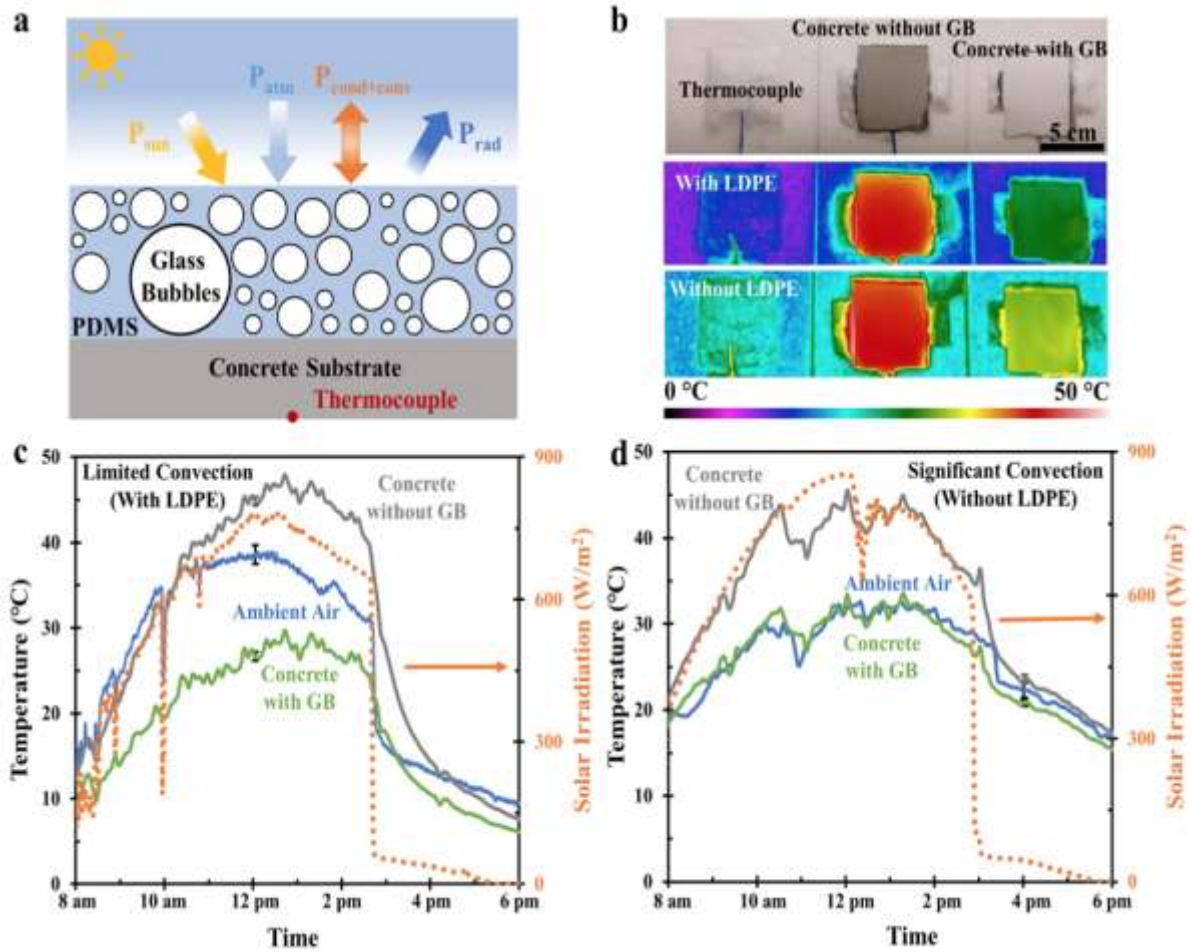


Fig I.11. Performances thermiques du revêtement polymère à 70 vol% de microbulles de verre :
(a) schéma du bilan thermique en conditions ambiantes ; (b) image optique du dispositif de mesure en toiture avec et sans film pare-vent LDPE ; (c) températures de surface mesurées de 8h à 18h en conditions de convection limitée (avec film LDPE) ; (d) températures de surface mesurées de 8h à 18h en conditions de convection naturelle (sans film LDPE) [9]

Farhan et al. [10] ont publié une étude en 2021 où ils ont combiné expériences et simulations pour voir comment la couleur des tuiles en béton influence la chaleur qui passe par conduction, la température du toit et la charge de refroidissement dans des maisons en Malaisie, sous un climat tropical. Ils ont testé sept couleurs de tuiles (noir, gris, brun, or, rouge, orange et blanc) et ont mesuré en laboratoire leurs propriétés optiques de surface, comme la réflectance solaire et l'émissivité infrarouge, à l'aide d'un réflectomètre solaire et d'un émissomètre. La Figure I.12 montre ces échantillons. Ensuite, ils ont modélisé un bâtiment dans le logiciel IES<VE>, qu'ils ont validé avec des mesures réelles sur deux petites cellules test à Shah Alam, pour simuler comment la chaleur et la température de surface évoluent jour et nuit pour chaque couleur. La Figure I.13 représente la température de surface de pointe (T_{RSPEAK}) en fonction de la réflectance solaire. Elle révèle une relation linéaire

décroissante très robuste ($R^2 = 0,99$) selon l'équation $T_RSPEAK = -28,09 \times \text{réflectance} + 56,45$. Ça confirme de façon claire que plus la réflectance solaire augmente, plus la température de surface baisse de manière prévisible. Le passage de tuiles rouges (réflectance = 0,20) à des tuiles blanches (réflectance = 0,73) a permis une réduction de la température de surface de pointe de 16 °C, faisant passer la charge de refroidissement annuelle de 2,667 MWh à 2,317 MWh, soit une économie d'énergie de 13,14 %. Les auteurs ont conclu que l'adoption de tuiles blanches constitue une solution rentable pour réduire la chaleur à l'intérieur des maisons, tout en soulignant la nécessité de développer des revêtements solaro-réfléchissants pour des couleurs autres que le blanc afin de surmonter les réticences esthétiques des acquéreurs.

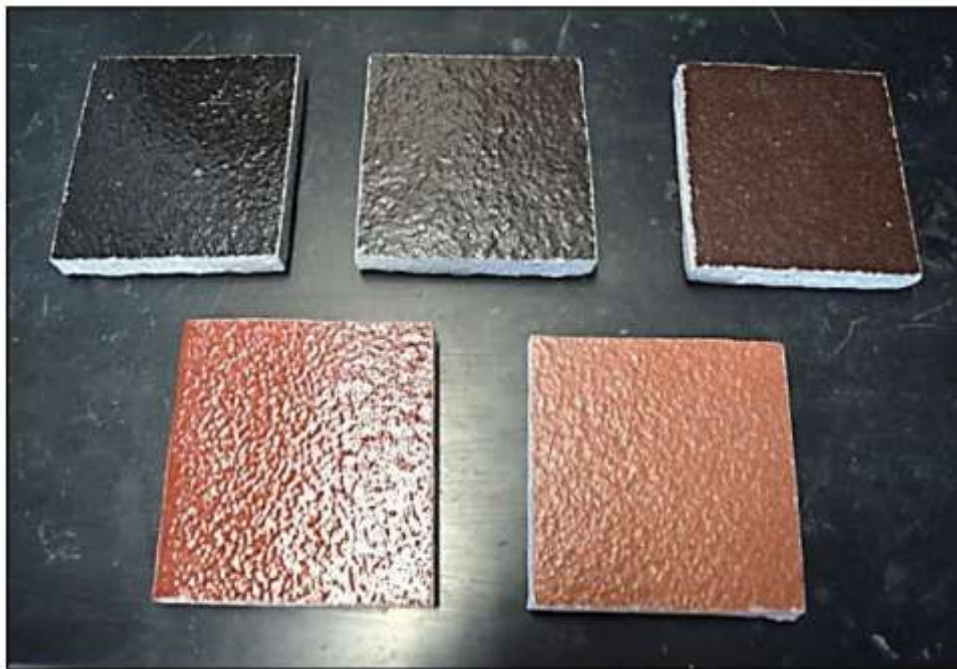


Fig I.12. Échantillons de tuiles [10].

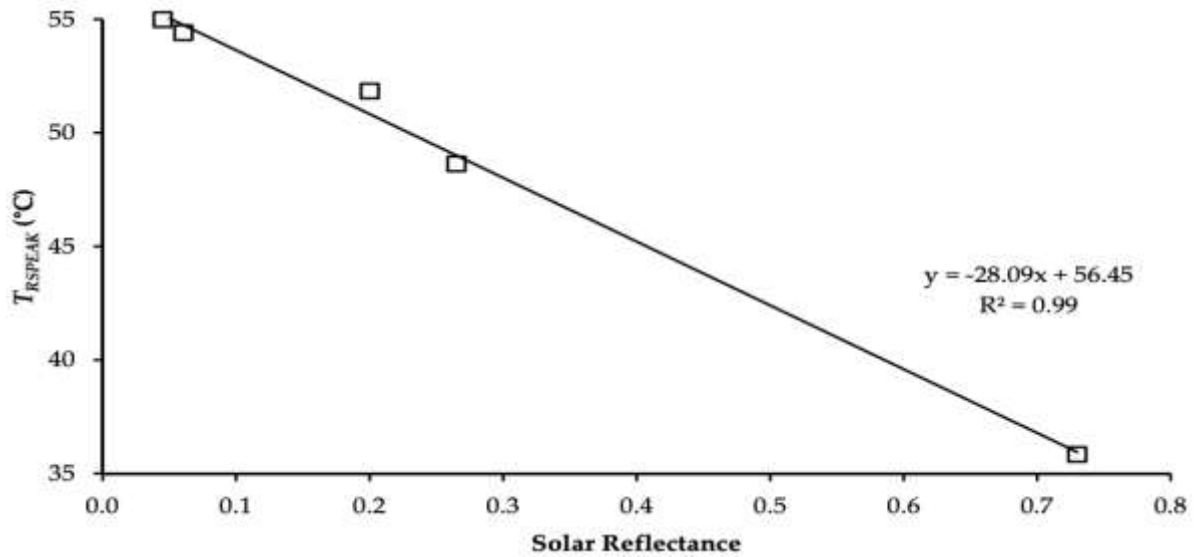


Fig I.13. Graphique représentant la valeur TRSPEAK en fonction de la réflectance solaire [10].

Nutakki et Kazim [11] ont étudié sur trois ans, le vieillissement naturel de panneaux enduits de peintures blanches à SRI élevé, exposés dans des conditions climatiques arides et extrêmes à Ras Al Khaimah (EAU). Ils ont mesuré périodiquement la réflectance solaire, l'émittance thermique, le SRI et la différence de couleur sur des panneaux inclinés à 5° et 45°. La Figure I.14, présente les échantillons des trois fabricants après trois ans d'exposition. Elle met en évidence une accumulation visuelle de poussière et une décoloration nettement plus prononcées sur les panneaux inclinés à 5° qu'à 45°, en raison d'un petit ruissellement sur les surfaces faiblement inclinées.



Fig I.14. Échantillons en triple exemplaire provenant de différents fabricants après 3 ans de vieillissement naturel à Ras al-Khaimah : (a) inclinaison de 5° et (b) inclinaison de 45° [11].

La Figure I.15, qui met en relation l'évolution du SRI avec les concentrations de PM10 et les précipitations, montre que les valeurs initiales du SRI, comprises entre 95 et 110, diminuent significativement lors des pics de forte charge en poussières. Cette dégradation est partiellement compensée par les événements pluvieux, qui contribuent à restaurer une partie des performances réfléchissantes des surfaces. Toutefois, la diminution finale du SRI demeure notable, avec des pertes comprises entre 11 % et 37 % selon le fabricant. Par ailleurs, l'émittance thermique demeurerait quasi constante tout au long de la période d'exposition (valeur moyenne d'environ 0,872), ce qui confirme que la réflectance solaire constitue le principal paramètre gouvernant l'évolution à long terme des performances thermo-optiques. Les auteurs concluent qu'un nettoyage annuel, réalisé de préférence à l'automne, permet de restaurer entre 80 % et 90 % des valeurs initiales du SRI. Ils soulignent également la nécessité de développer des protocoles d'essais régionaux spécifiquement adaptés aux conditions climatiques et environnementales du Golfe.

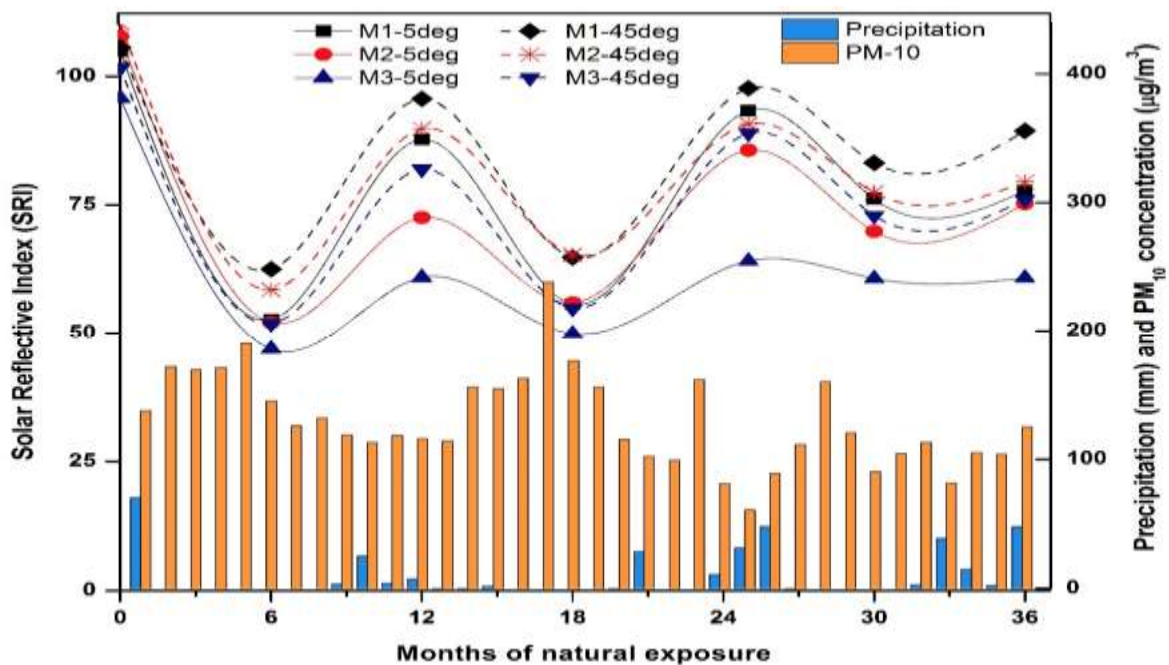


Fig I.15. Indice de réflexion solaire (SRI) en fonction du vieillissement naturel sans nettoyage périodique [11].

Athmani et al. [12] ont mené une étude comparative expérimentale et par simulation dynamique (TRNSYS V17) pour évaluer trois techniques passives de toiture : peinture réfléchissante (CR), carreaux céramiques blancs (CT) et toiture ventilée double peau (C-VR), sur le confort thermique et la consommation énergétique des bâtiments résidentiels sous le climat chaud et aride de Biskra, Algérie. Les mesures expérimentales étalées sur cinq jours en

mois de juillet 2021 ont démontré que le C-VR est la solution la plus performante. Elle réduit la température intérieure moyenne de 4,95 °C et la température de surface externe du toit de 20,52 °C. La Figure I.16, représente la consommation énergétique mensuelle de refroidissement pour chaque système. Elle montre que la demande de base de 1121,91 kWh est réduite de 66,06 % et de 45,33 % respectivement pour le C-VR et pour le CR, avec des réductions équivalentes des émissions de CO₂. Les simulations ont également confirmé que le C-VR réduit les heures d'inconfort thermique de 95 % à seulement 45 %, soulignant l'impact décisif de la combinaison ventilation naturelle et revêtement réfléchissant. Les auteurs ont conclu aussi que ces toitures passives, représentent une solution rentable et facile à mettre en œuvre pour les bâtiments résidentiels en climat aride algérien.

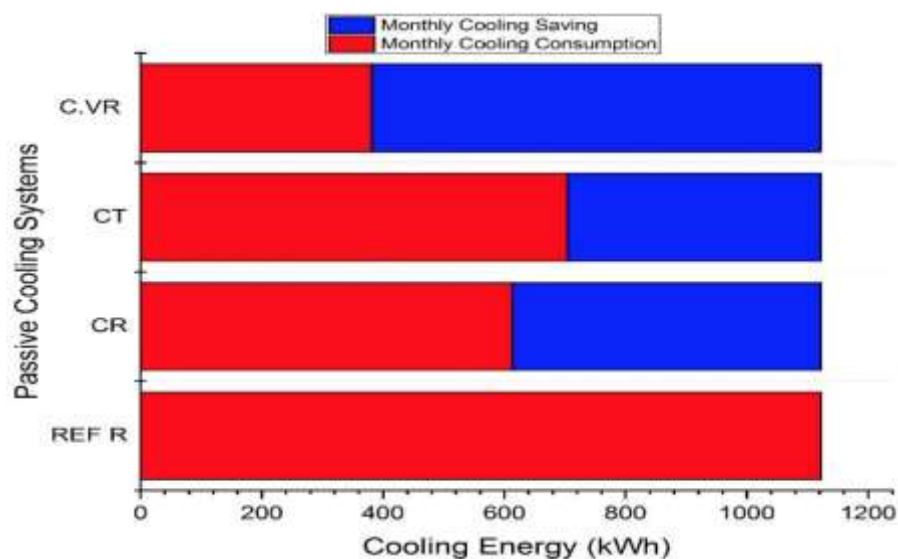


Fig I.16. Percentage of potential comfort ensured during the hottest month and percentage of discomfort hours for the three roofing alternatives [12].

Gawelek et al. [13] ont évalué l'impact des peintures thermo-isolantes à base de microsphères sur l'isolation thermique des parois extérieures. Ils ont combiné des tests en laboratoire sur boîtes chauffantes et mesures in situ sur une façade réelle en Haute-Silésie (Pologne). Les mesures du coefficient de transfert thermique ont révélé une réduction marginale de 1 à 7 % par rapport à la paroi de référence, contre une amélioration de près de huit fois avec un polystyrène graphite de 8 cm. Ce qui démontre la nette supériorité des isolants traditionnels. La Figure I.17, montre une thermogramme de la façade sous rayonnement solaire diurne. Elle illustre que les revêtements P1 et P2 affichent des températures de surface supérieures de 2,5 °C à celle du polystyrène blanc non enduit, confirmant leur absorption solaire sur paroi verticale. Les mesures nocturnes in situ ont

confirmé l'absence d'amélioration significative, avec des écarts de température inférieurs à 0,6 °C. Les auteurs concluent que ces peintures n'améliorent pas significativement la protection thermique des parois extérieures en climat tempéré. Leur efficacité restant limitée aux applications sous forte irradiation.

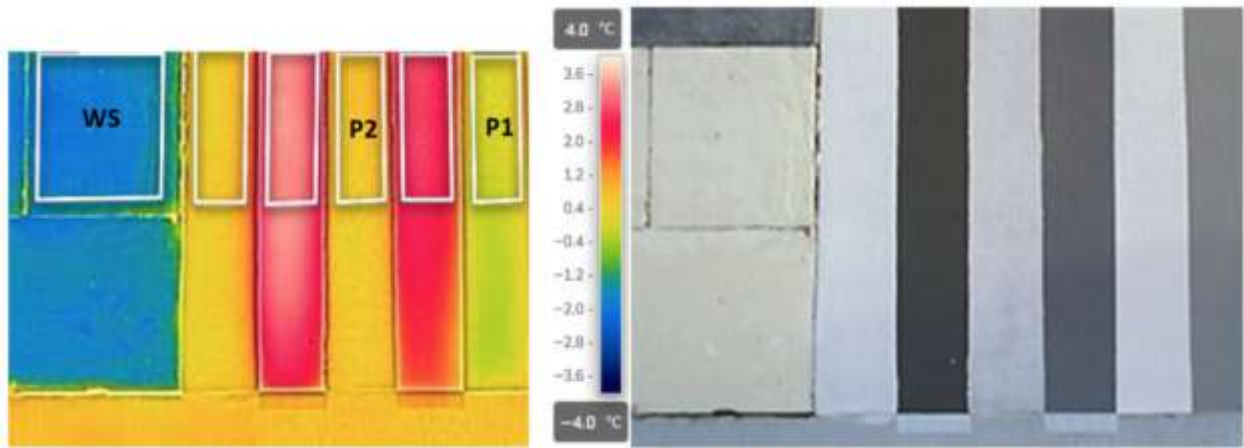


Fig I.17. Thermogramme illustrant la répartition moyenne des températures des échantillons testés P1 et P2 au cours de la journée sous l'effet du soleil [13].

Chapitre II

Modes de transfert thermique

II.1 Introduction

Depuis toujours, les enjeux liés à la transmission d'énergie, notamment de la chaleur, sont cruciaux pour l'analyse et l'utilisation de dispositifs tels que les chaudières, les fours, les échangeurs, les évaporateurs, les condenseurs,...etc. Elles sont aussi liées sur divers processus de transformations chimiques, pour le passage de chaleur à travers les murs des édifices ainsi que leurs structures (conduction, isolation thermique, pertes par enveloppes et optimisation des échanges afin de réduire au minimum les pertes énergétiques. En effet, dans certaines configurations réactionnelles, c'est la rapidité des transferts thermiques et non celle des réactions chimiques qui fixe le prix de l'opération (dans les situations de réactions fortement endo- ou exothermiques). De nos jours, en raison de l'augmentation proportionnelle du coût de l'énergie, on cherche systématiquement à maximiser l'efficacité d'un système tout en minimisant sa consommation d'énergie [14].

II.2 Définition

Le deuxième principe de la thermodynamique admet que la chaleur (ou énergie thermique) peut uniquement se transférer d'un objet à haute température vers un objet à basse température, autrement dit d'un objet à une certaine température vers un autre de température inférieure. On peut définir le transfert de chaleur, aussi appelé transfert thermique, comme une transition d'énergie sous forme de mouvement désordonné à l'échelle microscopique. On dit que deux corps sont en « équilibre thermique » lorsqu'ils ont la même température. Si leur température est différente, le corps le plus chaud cède son énergie au corps le plus froid. Il s'agit d'un transfert thermique par conduction de chaleur. L'examen des transferts de chaleur s'ajoute à l'étude de la thermodynamique en expliquant comment se produit le transfert d'énergie. Contrairement à la thermodynamique, la thermocinétique offre des renseignements sur la manière de transfert en état de non-équilibre et sur les quantités de flux thermique. La thermodynamique définit les conditions de ce transfert de chaleur et en précise les effets, cependant, elle ne s'intéresse pas à la rapidité de ce processus. Dans le cadre de la thermodynamique classique, les transformations réversibles présupposent essentiellement une proximité avec l'équilibre. De ce fait, ces échanges ne peuvent se réaliser qu'entre des corps dont les températures sont très proches [14].

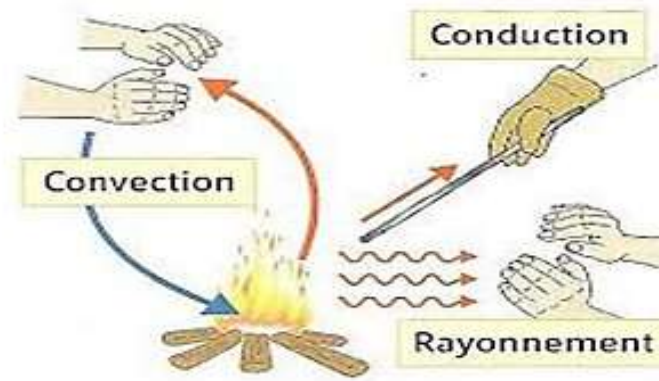


Fig II.1. Modes de transfert de la chaleur [15]

Dans l'étude du transfert de chaleur, on distingue trois méthodes de transmission thermique : la conduction, la convection et le rayonnement. La conduction se produit dans les solides. On observe particulièrement la convection dans les fluides. Le transfert de chaleur par rayonnement peut se produire dans tous les matériaux par ondes électromagnétiques. En fait, la répartition de la température dans un environnement est le résultat des influences de ces trois formes de transfert thermique [15].

II.3 Les modes de transfert de chaleur

II.3.1 La conduction

Lorsqu'un gradient de température est présent, la conduction thermique se réalise par contact direct, d'une particule à une autre (d'atome en atome), entraînant une hausse de la température jusqu'à ce qu'elle devienne uniforme dans le système, sans aucun déplacement de matière. Elle se produit surtout dans les solides, mais on la retrouve aussi dans les fluides à une échelle moins importante. Cette forme de transfert prédomine largement au sein des matériaux solides [16].

II.3.1.1 Loi de Fourier

Joseph Fourier a développé une théorie analytique pour décrire la conduction de la chaleur dans les matériaux. On retient surtout la loi de Fourier

$$\varphi = -\lambda S \text{ grad}(T) \quad (\text{II.1})$$

Où T désigne la température locale et λ représente la conductivité thermique du matériau. Elle signifie que le transfert de chaleur à travers une surface S est proportionnel au gradient de

température ($T_2 > T_1$) sur l'épaisseur e , prenant en compte la surface et le temps, et que cette transmission de chaleur se réalise de la région chaude vers la région froide [16].

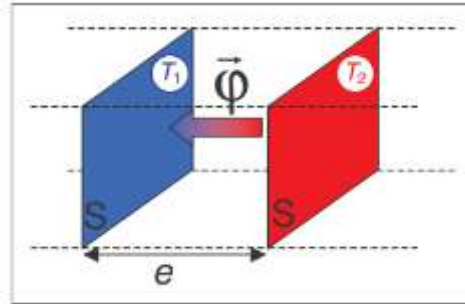


Fig II.2. Transfert thermique entre deux surfaces respectivement à la température T_1 et T_2 ($T_2 > T_1$) [16]

Ou sous sa forme algébrique :

$$\phi = -\lambda S \frac{dT}{dx} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

- ϕ : Flux de chaleur transmis par conduction [W]
- λ : Conductivité thermique du milieu [$\text{W} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$] ou [$\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$]
- S : Aire de la section de passage du flux [m^2]
- x : Variable d'espace dans la direction du flux [m]

Le signe moins (-) provient d'une convention qui rend positif un flux de chaleur s'écoulant du chaud vers le froid dans le sens d'un gradient négatif [15].

II.3.1.2 Conductivité thermique

La conductivité thermique également appelée coefficient de conduction thermique est une caractéristique associée à la structure physico-chimique des substances (qu'elles soient solides, liquides ou gazeuses). Elle caractérise une propriété thermo-physique essentielle spécifique à chaque matière, qui a un impact crucial sur le transfert de chaleur.

La conductivité thermique caractérise la nature d'un matériau en tant que conducteur ou isolant. En effet, un matériau qui présente une valeur élevée de conductivité thermique sera plus efficace pour conduire la chaleur. En général, les solides conduisent mieux la chaleur que les liquides. Les gaz ont généralement une conductivité thermique très faible. La nature du matériau et la température sont les principaux facteurs qui déterminent la conductivité

thermique. Dans de multiples situations pratiques, lorsque les différences de température ne sont pas élevées pour un milieu donné, on peut considérer λ comme une constante avec une précision suffisante. Le signe négatif dans la relation de Fourier indique que la chaleur est transférée du corps à haute température vers le corps à basse température. On peut déduire la conductivité thermique à partir de la loi de Fourier, grâce à une relation qui aide à comprendre sa signification physique [15].

$$\lambda = \frac{\phi}{s \cdot \text{grad} T} [\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})] \quad (\text{II.3})$$

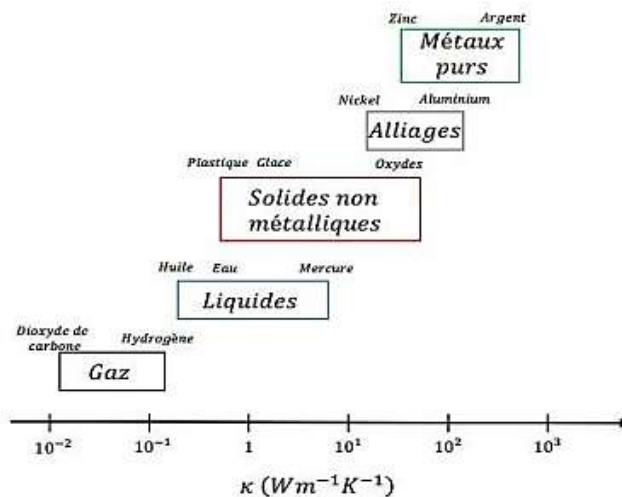


Fig II.3. Ordre de grandeur de la conductivité thermique pour divers états de la matière dans les conditions normales de température et de pression [15]

La conductivité thermique est influencée par divers facteurs, ce qui la rend variable d'un matériau à un autre:

- **La nature du matériau**

Des éléments comme le cuivre et l'aluminium sont de très bons conducteurs de chaleur grâce aux électrons libres qui favorisent la transmission de l'énergie thermique. Cependant, des matériaux tels que le bois ou les plastiques, qui manquent de ces électrons libres, sont de mauvais conducteurs.

- **La température**

La capacité d'un matériau à conduire la chaleur peut varier en fonction de la température. Habituellement, pour les métaux, la conductivité thermique décroît à mesure que la température s'élève, tandis que pour la majorité des isolants, elle se renforce avec l'augmentation de la température.

- **La structure cristalline**

Les matériaux cristallins ont généralement une conductivité thermique supérieure à celle des matériaux amorphes. La structure cristalline régulière facilite un transfert thermique plus efficace à travers le matériau.

- **La pureté du matériau**

Les impuretés ont la capacité de réduire la conductivité thermique d'un matériau en entravant le mouvement des électrons ou des phonons (unités de vibration thermique). Par exemple, le cuivre pur a une meilleure conductivité thermique que le cuivre contenant des impuretés.

- **La densité**

Les substances plus compactes tendent à avoir une conductivité thermique supérieure, car les particules y sont plus rapprochées, facilitant de ce fait le passage de l'énergie thermique. Par exemple, les gaz ont une conductivité thermique nettement inférieure à celle des solides et des liquides, ceci étant dû à leur densité réduite.

- **L'humidité**

L'humidité peut influencer la conductivité thermique, particulièrement dans le cas des matériaux poreux. L'eau possède une conductivité thermique supérieure à celle de l'air, ainsi, les matériaux humides transfèrent mieux la chaleur que lorsqu'ils sont secs.

En somme, la conductivité thermique d'un matériau est influencée par plusieurs éléments, notamment sa composition, sa structure, son niveau de pureté et les conditions environnementales. Il est essentiel de comprendre ces éléments pour une utilisation efficace des matériaux dans des domaines comme l'isolation thermique et la conception de systèmes de transfert de chaleur [17].

Tableau II.1:conductivité thermique des différents matériaux [18]

Matériau	Conductivité thermique (W/m·K)
Métaux (exemple : plomb)	35
Métaux (exemple : cuivre)	380
Pierres	1,4 – 3,5
Briques	0,22 – 1,61
Bois (résineux sec)	0,13
Bois (plus humide)	0,20
Polyuréthane (isolant)	0,035
Ouate de cellulose (isolant)	0,035
Laine de roche (isolant)	0,025

II.3.2 Convection

II.3.2.1 Définition

La convection représente un mécanisme de transfert thermique qui implique non seulement la conduction, mais également le mouvement macroscopique de la matière. Ce phénomène a lieu dans les environnements fluides (liquides ou gaz) qui sont en écoulement,

ou entre une surface solide et un fluide qui s'écoule. Ainsi, le fluide assurera non seulement le transfert de chaleur, mais aussi le transport de quantité de mouvement [19].

En fonction du type de mécanisme à l'origine du mouvement du fluide, on distingue :

- La convection naturelle ou libre
- Le transfert de chaleur par convection forcée

L'analyse du transfert thermique par convection facilite l'identification des échanges de chaleur qui ont lieu entre un fluide et une surface [20].

II.3.2.2 Convection naturelle

La convection naturelle se produit de manière spontanée. Elle a lieu dans un fluide où un gradient de température est présent. C'est le cas d'une pièce où l'air chaud généré au niveau du sol par un radiateur ou un convecteur va s'élever vers le plafond, tandis que l'air froid va diminuer. Le déplacement se produit parce que l'air chaud est moins dense que l'air froid, et par conséquent, il monte sous l'influence d'une force appelée poussée d'Archimède [21].

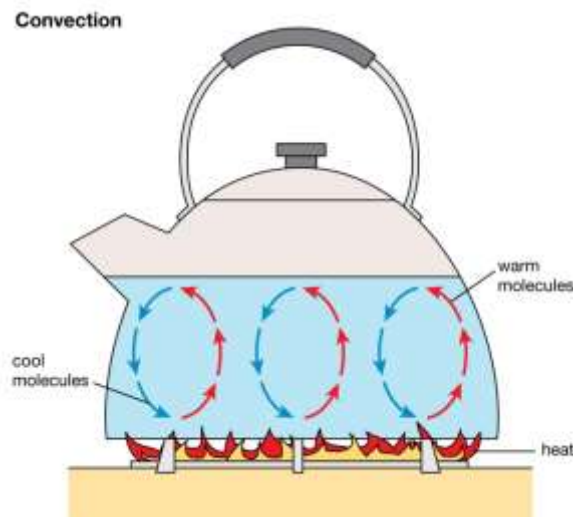


Fig.II.4 : Exemple de convection naturelle [22]

II.3.2.3 Convection forcée

Ce type de convection survient lorsque le mouvement du fluide est dicté par une action extérieure, sans lien avec la différence de température. Par exemple : un ventilateur, une pompe, un agitateur ou même le vent.

Dans le cadre de la convection forcée, la force d'Archimède est insignifiante par rapport aux forces utilisées pour engendrer le mouvement du fluide. C'est le cas, par exemple, du

refroidissement des moteurs à combustion interne : la pompe à eau propulse le liquide de refroidissement à travers le moteur puis vers l'échangeur [21].

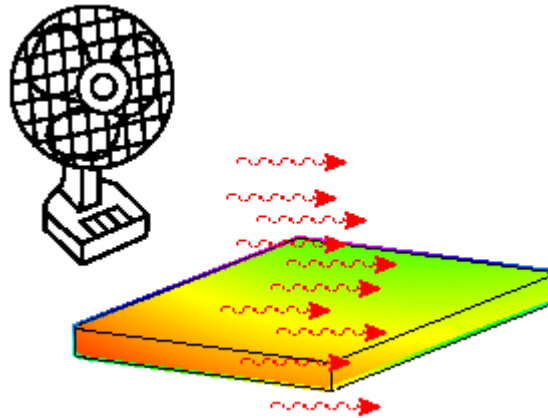


Fig.II.5. Exemple de convection forcée [23]

Il existe un 3ème type de convection : La convection mixte. Elle se produit s'il y a une cause externe au mouvement du fluide mais insuffisante pour que la poussée d'Archimède puisse être négligée [21].

II.3.2.4 Types d'écoulement

L'analyse du transfert thermique par convection aide à comprendre les transferts de chaleur qui ont lieu entre une surface et le fluide qui y circule. On identifie généralement deux principales formes de configurations qui définissent la géométrie du système :

- **Écoulements extérieurs** : généralement, les écoulements qui se produisent autour d'obstacles (aéronautique, échangeurs, etc.)
- **Écoulements intérieurs** : se réfèrent aux flux à l'intérieur des conduits (échangeurs) ou à l'intérieur des espaces (thermique du bâtiment) [19].

II.3.2.5 Régimes d'écoulements

L'importance du transfert de chaleur par convection dépendra du type d'écoulement sous lequel ces échanges se produisent : **écoulement laminaire ou turbulent**.

-Un écoulement laminaire est un type de flux où les lignes de courant sont clairement définies et parallèles aux parois.

-L'écoulement turbulent se distingue par des formations de tourbillons qui facilitent le mélange du fluide et par conséquent les transferts de chaleur. Dans certaines mises en place, tel que l'écoulement le long d'une plaque plane, il est possible que ce dernier passe d'un état laminaire à un état turbulent, en traversant

une étape de transition [19].

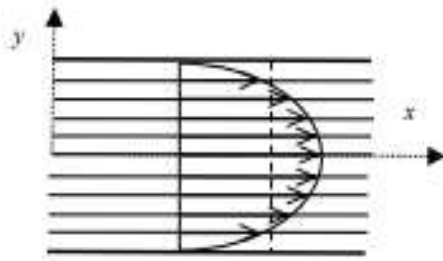


Fig II.6. Écoulement interne –régime laminaire

Le transfert de chaleur a lieu : par conduction (dispersion) dans la direction y, par conduction (généralement négligeable) et convection dans la direction [19].

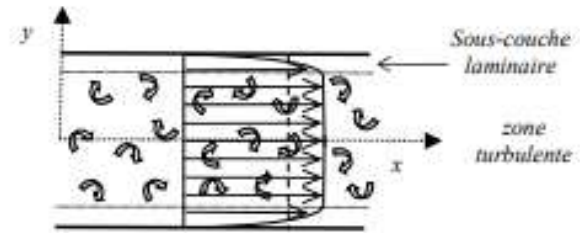


Fig II.7. Écoulement interne– Régime turbulent

Le transfert de chaleur se produit : par convection dans toutes les directions dans la zone turbulente sauf dans la sous-couche laminaire près des parois [19].

II.3.2.6 Loi de Newton

Peu importe le style de convection (libre ou forcée) et peu importe la nature du flux du fluide (laminaire ou turbulent), le transfert thermique ϕ retiré par le fluide à température T_f Pour une paroi de surface S et de température T_p où T_p est supérieure à T_f , cela est décrit par la loi de Newton[21].

$$\Phi = h S (T_p - T_f) \quad (\text{II.4})$$

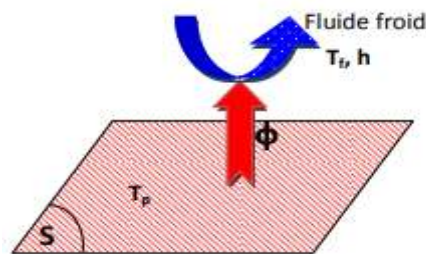


Fig II.8: modélisation du transfert thermique par convection [21].

II.3.2.7 Coefficient d'échange convectif

Dans certaines situations, on peut obtenir la valeur de h analytiquement, mais souvent, l'analyse se révèle extrêmement complexe, voire impraticable. On fait alors appel à des relations empiriques, c'est-à-dire basées sur des expériences.

Le coefficient h est influencé par plusieurs facteurs et plus actif (h plus grand) et l'échange de chaleur devient important lorsque :

- La vitesse v d'écoulement du fluide est plus grande [$m\ s^{-1}$].
- Sa masse volumique ρ est plus grande [$kg.m^{-3}$].
- Sa chaleur spécifique C_p est plus grande [$J.kg^{-1}.K^{-1}$].
- Sa conductivité thermique est forte [$W.m^{-1}.K^{-1}$].
- Sa viscosité cinématique est plus faible [$m^2.s^{-1}$]. Avec $\nu = \mu / \rho$ et μ est la viscosité dynamique [$kg.m^{-1}.s^{-1}$] ou en Po (Poise).

Le coefficient h est également lié aux dimensions de la paroi, à sa composition et à sa forme [21].

II.3.2.8 Paramètres caractéristiques de la convection

Le transfert de chaleur par convection a lieu à l'intérieur d'un fluide en mouvement. Nous avons observé que le coefficient de transfert, qui joue un rôle dans l'évaluation du flux thermique, dépendait de plusieurs facteurs, y compris le type d'écoulement (laminaire ou turbulent), les caractéristiques du fluide et à la configuration du système.

On a tendance à utiliser plutôt des grandeurs sans dimensions dans la pratique.

Le coefficient d'échange convectif h , qui représente le flux de chaleur transféré par convection, sera déterminé en le mettant en contraste avec un flux de chaleur de référence échangé par conduction. On établit donc un nombre sans dimensions, que l'on désigne sous le nom du nombre de Nusselt [19]:

$$Nu_{ref} = \frac{\text{flux convectif}}{\text{flux de conduction de référence}} = \frac{\text{loi de Newton}}{\text{loi de Fourier}} = \frac{h.S.\Delta T}{\lambda.S.\frac{\Delta T}{L_{ref}}} \quad (II.5)$$

$$Nu_{ref} = \frac{h.L_{ref}}{\lambda} \quad (II.6)$$

- Un haut nombre de Nusselt indiquera que les transferts de chaleur par convection surpassent ceux par conduction.

Il est évident que le nombre de Nusselt met en évidence le coefficient de transfert

convectif.

On peut ainsi définir un nombre de Nusselt local basé sur le coefficient d'échange local lié au transfert de chaleur échangé localement entre une surface et le fluide, ou encore un nombre de Nusselt moyen déterminé à partir du coefficient d'échange moyen lié au transfert de chaleur total sur l'ensemble de la surface.

- L'écoulement en convection forcée est caractérisé par un nombre sans dimensions. Le nombre de Reynolds évalue l'importance des forces d'inertie (moteur de l'écoulement) par rapport aux forces visqueuses (dissipation, résistance à l'écoulement). On l'écrit comme suit [19] :

$$Re_{L_{ref}} = \frac{\text{forces d'inertie}}{\text{forces visqueuses}} = \frac{\text{moteur}}{\text{frien}} = \frac{\rho \frac{U^2}{L_{ref}}}{\frac{\mu U}{L_{ref}^2}} = \frac{U \cdot L_{ref}}{\nu} \quad (\text{II.7})$$

où :

- U est la vitesse caractéristique de l'écoulement ($m.s^{-1}$).
- L_{ref} est une longueur caractéristique du système étudié (m).
- ν est la viscosité cinématique du fluide (ou diffusivité de quantité de mouvement), définie par :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{II.8})$$

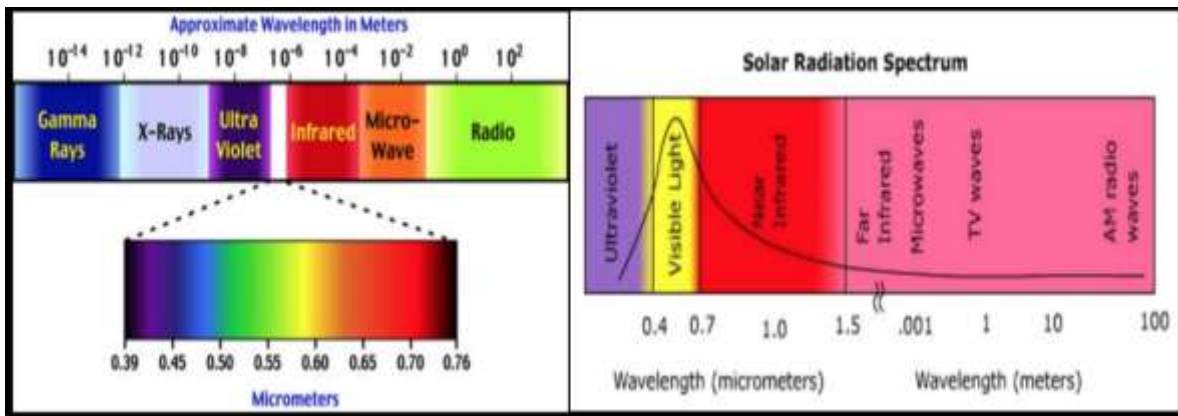
- où μ est la viscosité dynamique du fluide ($kg.m^{-1}.s^{-1}$)
 - ρ est la masse volumique du fluide ($kg.m^{-3}$)
 - ν est ainsi une propriété physique du fluide, qui quantifie la capacité de ce fluide à diffuser la quantité de mouvement (à atténuer les gradients de vitesse). Elle s'exprime en m^2/s . Dans le cas d'un écoulement le long d'une plaque plane de longueur L , l'écoulement sera considéré comme turbulent si $Re \geq Re \approx 5 \times 10 L_{critique}$. Dans le cas d'un écoulement dans un tube cylindrique de rayon D , l'écoulement sera considéré comme turbulent si $Re \geq Re \approx 2100 D_{critique}$.
- Le régime d'écoulement en convection naturelle est caractérisé à l'aide d'un nombre sans dimensions qui est le nombre de Grashof. Ce dernier permet de quantifier l'importance des forces d'Archimède (qui stimulent l'écoulement) par rapport aux forces visqueuses (qui entraînent la dissipation et freinent l'écoulement). Il s'écrit comme suit [19] :

$$Gr_{L_{ref}} = \frac{g \beta \Delta T L_{ref}^3}{\nu^2} \quad (II.9)$$

II.3.3 Rayonnement

Le rayonnement est un transfert d'énergie par le biais d'ondes électromagnétiques se propageant à la vitesse de la lumière. La vitesse de la lumière dans le vide est d'environ $3 \times 10^8 m/s$. Le temps nécessaire à la lumière du soleil pour atteindre la terre est de 8 minutes 20 secondes. Le transfert de chaleur par rayonnement électromagnétique peut se produire dans l'espace vide. Tout corps dont la température est supérieure au zéro absolu ($-273,15 \text{ }^\circ\text{C}$) rayonne de l'énergie vers son environnement.

Le rayonnement est défini aussi par la longueur d'onde, il peut varier considérablement [24].



FigII.9: Spectre électromagnétique et rayonnement solaire [24]

II.3.3.1 Rayonnement solaire

II.3.3.1.1 Définition

Le rayonnement solaire est l'énergie rayonnante provenant du soleil qui se propage sous forme d'ondes électromagnétiques courtes dans toutes les directions. Il convient toutefois de noter qu'une partie de ce rayonnement peut être absorbée, diffusée ou réfléchie lorsqu'elle traverse l'atmosphère terrestre. Ainsi, seule une partie du rayonnement solaire total atteint la surface de la terre sous la forme de deux composantes : le rayonnement direct (la partie qui a traversé librement l'atmosphère) et le rayonnement diffus (la partie qui a été diffusée par l'atmosphère).

$$E_{g\downarrow} = E \times \cos(\theta) + E_d \quad (II.10)$$

où E est le rayonnement direct, E_d est le rayonnement diffus, θ est l'angle entre la normale à la surface et la position du soleil dans le ciel. Le calcul fournit la quantité totale d'énergie solaire disponible à la surface de la terre, notée par l'irradiance globale E_g [25].

La lumière visible a une longueur d'onde comprise entre 0,40 et 0,71 micromètre (μm). Le soleil n'émet qu'une partie (44 %) de son rayonnement dans cette gamme. Le rayonnement solaire couvre un spectre allant d'environ 0,1 à 4,0 micromètres. Environ 7 % de l'émission solaire se situe dans la bande de longueurs d'onde de 0,1 à 0,4 micromètre (UV). Environ 48 % du rayonnement solaire se situe dans la région comprise entre 0,71 et 4,0 micromètres (infrarouge proche : 0,71 à 1,5 micromètre ; infrarouge lointain : 1,5 à 4,0 micromètres) [24].

II.3.3.1.2 Lois fondamentales du rayonnement solaire

- Loi de Wien (distribution spectrale)

La longueur d'onde d'émission maximale d'un corps est inversement proportionnelle à sa température absolue. Ainsi, plus la température est élevée, plus la longueur d'onde d'émission maximale est courte. Ce phénomène est souvent appelé loi de Wien :

$$\lambda_{max} = C T \quad (\text{II.11})$$

où $C = 2897 \mu m \cdot K$ et T est exprimée en kelvins. D'après l'équation ci-dessus, la longueur d'onde d'émission maximale du soleil (5 800 K) est d'environ 0,5 μm , tandis que celle de la terre (288 K) est d'environ 10,0 μm [24].

- Loi de l'inverse du carré (variation de l'intensité avec la distance)

La quantité de rayonnement traversant une zone donnée est inversement proportionnelle au carré de la distance qui sépare cette zone de la source d'énergie. Ce phénomène est appelé « loi de l'inverse des carrés ». En utilisant cette loi, on peut modéliser l'effet de la distance parcourue sur l'intensité du rayonnement émis par un corps tel que le soleil.

$$Intensité = \frac{I}{d^2} \quad (\text{II.12})$$

Où I représente l'intensité du rayonnement à une distance d , et d la distance parcourue [24].

II.3.3.2. Rayonnement thermique

Le rayonnement thermique est le rayonnement émis par toute source dont la température est supérieure au zéro absolu et obéit à la loi de Planck. Le rayonnement non

thermique est le rayonnement émis par tous les phénomènes non thermiques : lasers, électroluminescence, photoluminescence, rayonnement cyclotronique/synchrotronique,... etc. La quasi-totalité du rayonnement optique rencontré dans les conditions terrestres est le rayonnement thermique. Il convient de noter que la lumière solaire (y compris dans le spectre visible) est en réalité un rayonnement thermique émis par un émetteur à très haute température, à savoir le soleil. Il en va de même pour la lumière de la lune, qui est en réalité le rayonnement thermique du soleil réfléchi par la lune [26].

La quantité de rayonnement électromagnétique émise par un corps est directement liée à sa température. Si le corps est un émetteur parfait (corps noir), la quantité de rayonnement émise est proportionnelle à la quatrième puissance de sa température, exprimée en degrés Kelvin[24]. Ce phénomène naturel est décrit par la loi de Stefan-Boltzmann:

$$E = \sigma \times T^4 \quad (\text{II.13})$$

où $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ et T est exprimée en K .

II.3.3.3 Albédo et réflectance des surfaces

II.3.3.3.1 Définitions

- **Albédo (réflectance solaire, SR)**

L'albédo, appelée aussi réflectance solaire, désigne la fraction de l'énergie solaire qui est réfléchi par une surface. Il s'agit d'une grandeur sans dimension dont la valeur varie entre 0 et 1. Une valeur de 0 indique l'absence de réflexion (absorption totale de l'énergie solaire) et une valeur de 1 indique une réflexion totale. Les matériaux présentant une réflectance solaire élevée absorbent moins d'énergie solaire, ce qui contribue à réduire la charge thermique des bâtiments [27].

$$SR = \rho = \frac{I_{\text{réfléchi}}}{I_{\text{incident}}} \quad \text{avec } 0 < \rho < 1 \quad (\text{II.14})$$

Où : $I_{\text{réfléchi}}$ = rayonnement solaire réfléchi (W/m^2)

I_{incident} = rayonnement solaire incident (W/m^2) [28]

- **Émissivité thermique (TE) :**

L'émissivité thermique désigne la capacité d'un matériau à réémettre la chaleur absorbée sous forme de rayonnement infrarouge. Il s'agit également d'une valeur sans dimension comprise entre 0 et 1, où 1 correspond à une émission parfaite de la chaleur absorbée. Les matériaux à haute émissivité libèrent rapidement la chaleur, ce qui contribue à réduire la température de surface [27].

$$\varepsilon = \frac{E_{surface}}{E_{corps\ noir}} = \frac{E_{surface}}{\sigma T^4} \quad (II.15)$$

Émittance spectrale du corps noir (loi de Planck) [27]:

$$E_{b\lambda}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(\frac{C_2}{\lambda T}) - 1]} \quad (II.16)$$

Où :

- $\varepsilon_\lambda(\lambda, T)$ = émissivité spectrale de la surface (sans dimension)
- $E_{b\lambda}(\lambda, T)$ = émittance spectrale du corps noir ($W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$)
- $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ (constante de Stefan-Boltzmann)
- T = température absolue de la surface (K)
- $C_1 = 3,742 \times 10^8 W \cdot \mu m^4 \cdot m^{-2}$ (1^{ère} constante de rayonnement)
- $C_2 = 1,439 \times 10^4 \mu m \cdot K$ (2^{ème} constante de rayonnement)

- **Indice de réflectance solaire (SRI) :**

L'indice de réflectance solaire (SRI) est un paramètre essentiel pour évaluer les performances thermiques des matériaux de construction, notamment en ce qui concerne l'atténuation de l'impact thermique du rayonnement solaire. Défini comme un indicateur composite. Le SRI intègre la réflectance solaire, la fraction de l'énergie solaire incidente réfléchi par une surface, l'émissivité thermique et l'efficacité d'un matériau à émettre la chaleur absorbée sous forme de rayonnement infrarouge. Cette combinaison détermine la capacité d'un matériau à rester frais lorsqu'il est exposé au soleil, ce qui influence directement le confort intérieur et réduit l'énergie nécessaire à la climatisation. Les matériaux à SRI élevé, souvent appelés « matériaux frais », ont fait l'objet de nombreuses études pour leur capacité à réduire les températures de surface de 20 à 30 °C par rapport aux matériaux conventionnels, contribuant ainsi à la conservation de l'énergie et au confort thermique [27].

Étape 1 — Température de surface stationnaire T_s [28]:

$$\alpha \times I_{\text{solaire}} = \varepsilon \times \sigma \times (T_s^4 - T_{\text{ciel}}^4) + h_c \times (T_s - T_{\text{air}}) \quad (\text{II.17})$$

Sous la forme linéarisée utilisée par ASTM E1980 :

$$T_s = T_{\text{air}} + \frac{\alpha I_{\text{solaire}} - \varepsilon h_r (T_{\text{air}} - T_{\text{ciel}})}{(h_c + \varepsilon h_r)} \quad (\text{II.18})$$

Où :

- $A = 1 - SR$ = absorptance solaire
- $I_{\text{solaire}} = 1000 \text{ W/m}^2$ (irradiance standard ASTM E1980)
- h_c = coefficient de convection ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)
- $h_r = 4 \varepsilon \sigma T_m^3$ = coefficient radiatif linéarisé ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)
- $T_{\text{air}} = 310 \text{ K}$, ; $T_{\text{ciel}} = 300 \text{ K}$ (conditions standard ASTM E1980)

Étape 2 — Calcul du SRI [28]:

$$\text{SRI} = 100 \times \frac{T_b - T_s}{T_b - T_w} \quad (\text{II.19})$$

Où :

- T_s = température de surface du matériau calculée à l'étape 1
- T_b = température du noir standard (SR = 0,05 ; TE = 0,90) = 71,2°C
- T_w = température du blanc standard (SR = 0,80 ; TE = 0,90) = 23,0°C

II.3.3.4 Fondements physiques du rayonnement infrarouge et de la thermographie

Le spectre électromagnétique englobe un large éventail de rayonnements, allant des ondes à basse fréquence, telles que les ondes radio, aux ondes à haute fréquence, comme les rayons gamma. Au milieu de ce spectre, on trouve les ondes de lumière visible, que nos yeux peuvent percevoir. Cependant, au-delà du spectre visible, il existe d'autres formes de rayonnement qui nous sont invisibles, comme le rayonnement infrarouge [29].

II.3.3.4.1 Définition

Le rayonnement infrarouge, également appelé IR, est une partie du spectre électromagnétique située juste au-delà de la lumière visible. Ce type de rayonnement se caractérise par sa capacité à transporter de l'énergie thermique et par son interaction unique avec la matière. Lorsqu'un objet atteint une température supérieure au zéro absolu (-273,15 °C), il émet un rayonnement infrarouge proportionnel à sa température. Plus l'objet est chaud, plus le rayonnement infrarouge émis est intense [29].

II.3.3.4.2 Imagerie thermique

Les instruments conçus pour la thermographie infrarouge, appelés caméras thermiques, ne peuvent «détecter» que le rayonnement infrarouge ; ils ne mesurent pas les températures, mais l'énergie thermique rayonnée, qu'il le convertit ensuite en valeurs de température [30]. C'est des systèmes d'imagerie électro-optiques qui génèrent des images des cibles observées à des températures terrestres typiques en utilisant principalement le rayonnement thermique émis par ces cibles. Ils ont trouvé de nombreuses applications tant dans le secteur de la défense et de la sécurité (armée, gardes-frontières, police, etc.) que dans le secteur civil (mesure industrielle de température sans contact, industrie automobile, essais thermiques non destructifs, tests des lignes électriques, industrie du bâtiment, applications médicales, lutte contre les incendies, etc...) [29].

Chapitre III

Procédure expérimentale

III.1. Introduction

Ce chapitre présente l'ensemble du travail expérimental mené pour étudier les performances thermiques de différentes peintures et revêtements destinés à la rénovation énergétique des bâtiments. Nous y décrivons le dispositif expérimental ainsi que les instruments de mesure employés pour évaluer le comportement thermique des échantillons soumis à un rayonnement artificiel. Les expériences ont été conduites au cours des mois de mai et juin 2026, au sein du laboratoire de recherche ETAP de la Faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen.

III.2 Description de l'installation

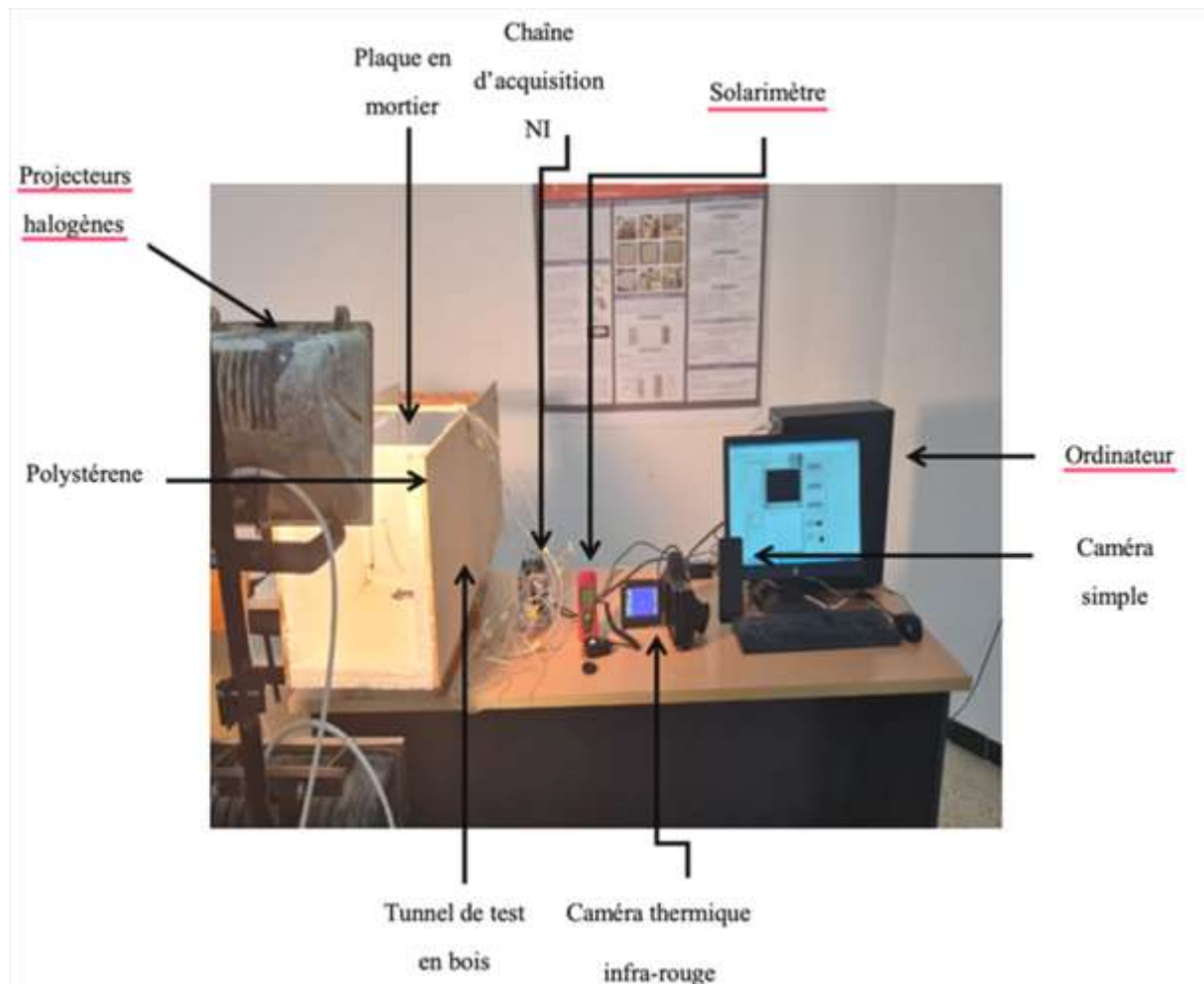


Fig.III.1. Différents matériel et accessoire de l'installation.

Les échantillons soumis à l'investigation expérimentale sont des mortiers en ciment sous forme de plaques carrées de dimensions 25×25 cm et d'une épaisseur de 2 cm, sur lesquelles ont été appliqués différents types de peintures et de revêtements à performances

thermiques. Ces plaques de mortier sont positionnées au centre d'une enceinte en bois, conçue et réalisée au sein du laboratoire. Les parois intérieures sont garnies de polystyrène expansé à titre d'isolant thermique, dans le but de limiter les déperditions de chaleur et de confiner le flux énergétique au niveau de l'échantillon. Un isolement latéral complémentaire, assuré par de la laine de roche, permet de garantir des conditions aux limites thermiques maîtrisées et reproductibles (Fig. III. 1). Les faces avant et arrière de l'enceinte sont délibérément laissées ouvertes, afin de permettre l'accès optique et la visualisation thermographique simultanée des deux faces de la plaque. Le rayonnement incident est produit par un projecteur d'une puissance de (X) Watt, disposé à une distance fixe de la surface de l'échantillon, assurant ainsi une irradiation artificielle uniforme et contrôlée. L'instrumentation en température repose sur des thermocouples de type K, implantés sur les deux faces de chaque plaque. Ils sont connectés à une chaîne d'acquisition de marque National Instruments (NI), elle-même reliée à un poste informatique par liaison USB. Une interface d'acquisition numérique, développée sous l'environnement LabVIEW, assure l'enregistrement, l'affichage et le traitement en temps réel des données thermiques collectées au cours des essais. En complément, une caméra thermique de type Testo 890 est mise en œuvre pour la visualisation et la cartographie des champs de température en surface des échantillons, tirant parti de l'ouverture des deux faces de l'enceinte pour permettre une observation thermographique complète et non intrusive du comportement thermique des différents revêtements étudiés.

III.3 Méthodes de réalisation

III.3.1 Réalisation des plaques en mortier de Ciment

Phase 1 : Fabrication du Moule Métallique

1.1 Découpage des barres métalliques.

La première étape de la fabrication du moule a consisté en le découpage de tiges en acier afin d'obtenir l'ensemble des éléments constitutifs nécessaires à l'assemblage des neuf moules d'essai. Cette opération a été réalisée à l'aide d'une tronçonneuse métallique de type CROWN, modèle CT15205N. Elle permet une coupe précise des tôles métalliques en garantissant des arêtes rectilignes et des côtés de même longueur constante.

Ainsi, neuf petites tiges de fer plat de dimensions identiques ont été découpées et ajustées à une longueur uniforme de 25 cm, auxquelles s'ajoutent deux grands tubes carrés longitudinaux destinés à constituer l'ossature principale des moules (Fig. III. 2.a-f). La précision dimensionnelle de cette opération revêt une importance capitale, dans la mesure où

elle conditionne directement l'étanchéité géométrique des moules ainsi que l'uniformité dimensionnelle des échantillons coulés. À cet effet, chaque pièce découpée a été soigneusement contrôlée au moyen d'un pied à coulisse avant de procéder à l'étape suivante de la fabrication.

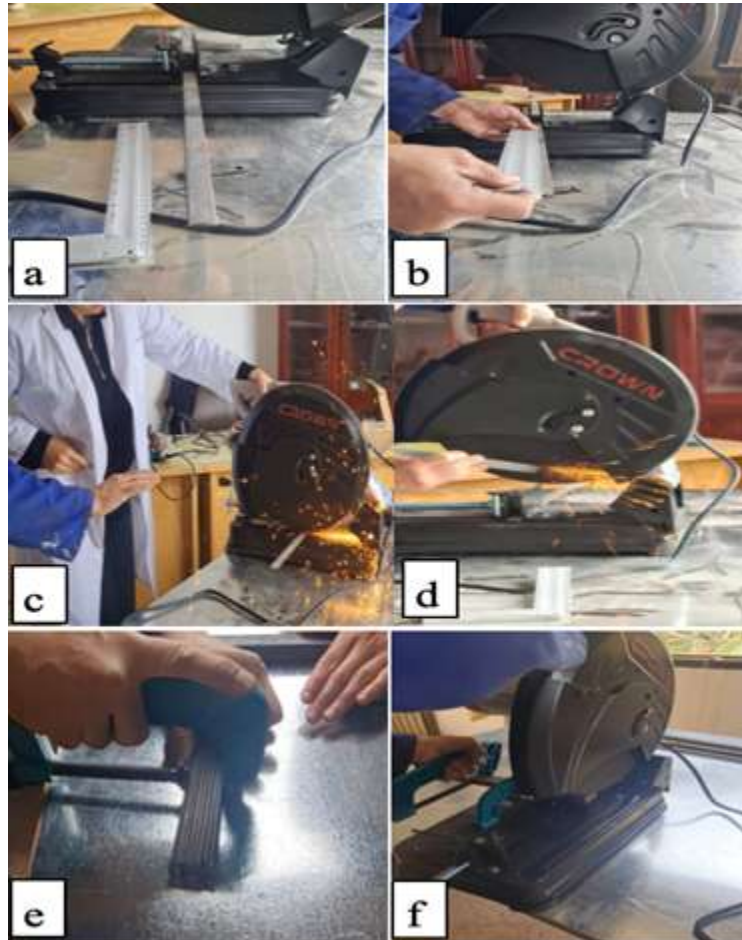


Fig III.2. Étapes de la phase de découpage : (a) positionnement des tôles en acier dans la machine de découpage, (b) réglage à la longueur de 25 cm avant découpe, (c) découpage des petites barres transversales, (d) passage des petites barres dans la machine pour l'opération de finition, (e) maintien en position des 8 barres à l'aide de serre-joints, (f) passage de l'ensemble des 8 barres pour la finition finale.

1.2 Ponçage des barres

Suite au découpage, les deux grandes barres longitudinales ont été placées parallèlement l'une à l'autre et maintenues en position à l'aide de serre-joints, afin d'assurer leur stabilité au cours de l'opération de nettoyage.

Une opération ponçage des surfaces a ensuite été réalisée sur l'ensemble des éléments découpés à l'aide d'une meuleuse d'angle de type CROWN CT13009 Angle Grinder.

Cette étape a permis d'éliminer les bavures métalliques générées lors de la coupe, d'adoucir les arêtes vives et d'obtenir des surfaces de contact parfaitement planes et régulières. L'absence de bavures et la planéité des faces d'assemblage constituent en effet des conditions indispensables à la réalisation de soudures de qualité ainsi qu'à l'assemblage orthogonal rigoureux des parois des moules. L'opération a été conduite avec une attention particulière portée aux bords de coupe, afin de préserver la géométrie rectangulaire initiale des pièces et de garantir la précision dimensionnelle requise pour les étapes d'assemblage ultérieures.



Fig. III.3 Ponçage des barres.

1.3 Assemblage et soudage du moule

Les huit petites barres fines ont été positionnées transversalement entre les deux grandes barres longitudinales pour séparer les huit compartiments de moulage (Fig. III.4). Afin de garantir la perpendicularité des assemblages, des équerres magnétiques ont été utilisées, tandis que des serre-joints assuraient la stabilité de l'ensemble et le maintien d'un niveau uniforme.



Fig III.4. Préparation des moules pour le coulage.

Le soudage des barres transversales sur les barres longitudinales a été réalisé à l'aide d'un post à souder de type VEIBER MMA250 IGBT. Une dernière opération de ponçage fût effectuée sur l'ensemble des moules pour éliminer toute irrégularité de surface.



Fig III.5. Assemblage et soudage de moule



Fig III.6. Ponçage final du moule.



Fig III.7. Résultat final du moule.

Phase 2 : Préparation et Coulage du Mortier de Ciment

2.1 Calcul des quantités et préparation du mortier

La composition du mortier a été établie conformément aux normes en vigueur dans le domaine du génie civil. Le dosage adopté est d'un volume de ciment pour trois volumes de sable. Le volume total nécessaire pour remplir les neuf moules a été calculé comme suit :

$$V_{total} = 0,25 \times 0,25 \times 0,02 \times 9 = 0,01125 \text{ m}^3 \text{ soient } 11,25 \text{ litres}$$

Le sable et le ciment ont été soigneusement mélangés à sec dans les proportions définies, humidifiés par l'eau jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène et de consistance appropriée.



Fig.III.8. Préparation du mortier

2.2 Coulage et mise en œuvre

Avant le coulage, une feuille de plastique humidifiée par l'eau a été disposée sous les moules afin de faciliter le démoulage ultérieur et d'évacuer les éventuelles impuretés.



Fig.III.9 Application de gouttes d'eau sur la feuille de plastique.

La pâte de mortier ainsi préparée est versée dans les moules puis soigneusement étalée et vibrée par une spatule afin d'obtenir une répartition uniforme de la matière dans chaque compartiment et obtenir un niveau de surface homogène pour l'ensemble des échantillons.



Fig. III.10. Remplissage des moules et étalement de la pâte.



Fig. III.11. Etalage du mortier dans les moules.

2.3 Séchage et démoulage

Les moules remplis ont été laissés au repos dans des conditions ambiantes contrôlées, durant un temps de séchage nécessaire au durcissement complet. À l'issue de cette phase de prise, les plaques ont été démoulées avec soin, donnant lieu à neuf plaques en mortier de ciment de dimensions 25×25 cm et d'épaisseur 2 cm, prêtes à recevoir les différents revêtements et peintures à tester.



Fig. III.12. Présentation des 9 échantillons de mortier.

III.3.2 Traitement de surface par différents revêtements

Après la réalisation et le séchage complet des plaques en mortier de ciment, une à deux couches de revêtement a été appliquée sur la face avant de chaque plaque. Chaque revêtement a été appliqué en une couche uniforme à l'aide d'un pinceau, en respectant les conditions d'application recommandées par le fabricant.

Une seule plaque en mortier nu sans aucun revêtement est appliquée comme mortier de référence pour pouvoir comparer l'évaluation des performances thermiques des autres revêtements testés.

Les revêtements appliqués sont les suivants :

- a. Peinture noire brillante:

La première plaque a été revêtue d'une peinture noire brillante appliquée par aérosol. Le produit utilisé est illustré dans la figure III.13, et la méthode d'application est présentée dans la figure III.14.



Fig. III.13. Peinture aérosol noire Fig. III.14. Application de la peinture noire

b. Peinture à l'huile (laque blanche)

La deuxième plaque a été revêtue d'une peinture laque blanche, appliquée au pinceau de manière uniforme sur la face avant de la plaque en mortier.



Fig. III.15. Peinture laque blanche **Fig. III.16. Application de la peinture laque blanche**

c. Peinture lavable blanche

La troisième plaque a été revêtue d'une peinture lavable blanche, appliquée au pinceau de manière uniforme sur la face avant de la plaque en mortier.



Fig III.17. Application de la peinture lavable blanche

d. Revêtement paxaluminé

La quatrième plaque a été revêtue d'un système bicouche composé de deux couches d'enduit bitumeux liquide (flinkote) appliquée sur la face avant du mortier, suivie d'une feuille de paxaluminé fixée par chalumeau, comme illustré dans la figure suivante.

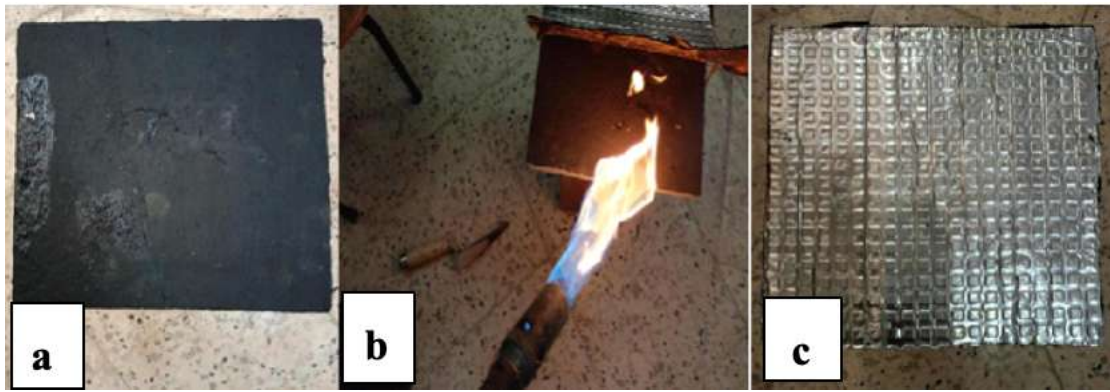


Fig. III.18. Processus d'application du revêtement bicouche (flinkote +Paxaluminé):
(a) Application de la couche d'enduit bitumeux, (b) Fixation de la feuille d'aluminium, (c) Aspect final du revêtement bicouche.

C. Revêtement en poudre de marbre

La cinquième plaque a été revêtue de poudre de marbre, appliquée de manière uniforme sur la face avant de la plaque en mortier.



Fig. III.19. Plaque en poudre de marbre

La figure III.20 représente l'ensemble des six plaques en mortier après application des différents revêtements, incluant la plaque de référence en mortier nu.

Fig III.20 Six plaques de mortier après traitement de surface

III.3.3 Adaptation du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé dans cette étude est sous forme d'un caisson conçu en bois tel qu'illustré dans la figure III.21. Afin de l'adapter aux objectifs de notre étude et d'assurer des conditions expérimentales représentatives, plusieurs modifications structurelles ont été apportées au dispositif original, comme le montre la figure III.22.



Fig. III.21. Dispositif expérimental avant modification



Fig. III.22. Dispositif expérimental après modification

- Ouverture du dispositif : La face avant, la face arrière ainsi que la face supérieure du caisson ont été retirées. Cette modification permet d'exposer directement les plaques à l'air ambiant du laboratoire, reproduisant ainsi des conditions de convection naturelle similaires à celles observées sur les parois extérieures des bâtiments en conditions réelles.
- Adaptation du logement des plaques : Du polystyrène expansé central a été découpé avec précision afin de créer un logement sur mesure destiné à accueillir et à maintenir chaque

plaque en position stable durant l'expérience, garantissant ainsi la reproductibilité des mesures d'une configuration à l'autre.

- Isolation thermique latérale : De la laine de roche a été disposée de part et d'autre de chaque plaque testée. Ce matériau isolant, caractérisé par une faible conductivité thermique, permet de minimiser les échanges thermiques latéraux (parasites) et d'assurer un transfert thermique unidirectionnel perpendiculaire à la surface de la plaque, conformément aux hypothèses du modèle thermique adopté dans cette étude.
- Passage des câbles de mesure : Un orifice a été ménagé dans la paroi latérale du dispositif afin de permettre le passage des câbles des thermocouples de type K vers la chaîne d'acquisition NI cDAQ-9174, tout en maintenant l'intégrité mécanique du dispositif et en évitant toute perturbation des conditions thermiques à l'intérieur du caisson.

Ces adaptations ont permis d'obtenir un dispositif expérimental fiable, reproductible et adapté aux exigences de l'évaluation comparative des performances thermiques des différents revêtements testés.

III.3.4. Instrumentation et acquisition des données

III.3.4.1. Chaîne d'acquisition — National Instruments (NI)

La chaîne d'acquisition utilisée dans cette étude est un système modulaire de la marque National Instruments (NI), composé d'un châssis NI cDAQ-9174 et de deux modules d'acquisition NI 9211, comme illustré dans la figure III.23.

Le châssis NI cDAQ-9174 est un système d'acquisition de données compact à 4 emplacements, conçu pour accueillir différents modules d'entrée/sortie. Il assure la communication entre les modules de mesure et le PC via une interface USB, permettant ainsi une acquisition en temps réel des données expérimentales sous le logiciel LabVIEW.

Les modules NI 9211 sont des modules d'acquisition spécialement conçus pour la mesure de température par thermocouples. Chaque module dispose de 4 voies d'entrée différentielles, avec une résolution de 24 bits et une plage de mesure de ± 80 mV, compatible avec les thermocouples de type K utilisés dans cette expérience. L'utilisation de deux modules NI 9211 permet d'acquérir simultanément jusqu'à 8 températures en temps réel.



Fig III.23 Chaîne d'acquisition National Instruments (châssis NI cDAQ-9174 avec modules NI 9211)

III.3.4.2 Capteurs de température Thermocouples type K

Les capteurs de température utilisés dans cette étude sont des **thermocouples de type K**, connectés directement aux modules **NI 9211** de la chaîne d'acquisition. Afin d'assurer un contact thermique optimal avec la surface des plaques, les thermocouples ont été fixés sur la face avant exposée et la face arrière de chaque plaque à l'aide d'un scotch en aluminium, comme illustré dans la figure suivante.

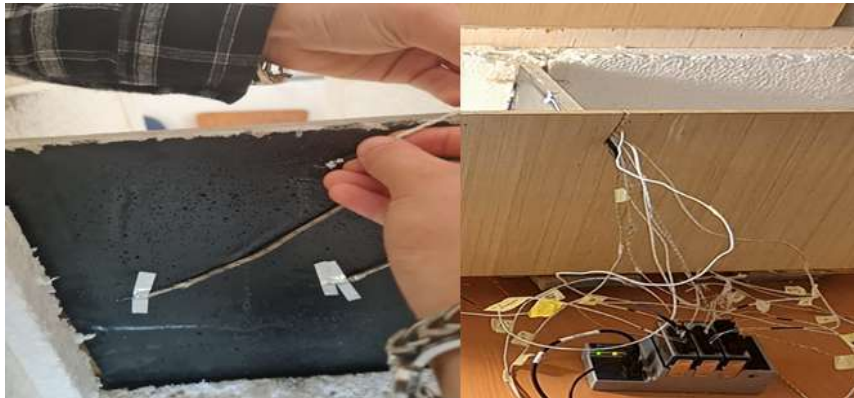


Fig III.24 Mise en place des thermocouples de type K

Ce mode de fixation permet de maintenir le thermocouple en contact direct et permanent avec la surface, minimisant ainsi les résistances de contact thermique parasites et garantissant la précision des mesures de température de surface.

III.3.4.3 Solarimètre

Le rayonnement solaire incident et réfléchi est mesuré à l'aide d'un solarimètre Amprobe SOLAR-100. Il affiche les valeurs en W/m^2 . Il est composé d'une cellule photoélectrique sensible au rayonnement lumineux, connectée à un afficheur numérique permettant la lecture directe de la densité du flux solaire reçue par la surface du capteur.



Fig. III.25. Solarimètre Amprobe SOLAR-100

Dans le cadre de cette expérience, le solarimètre a été utilisé de la manière suivante :

- Mesure du rayonnement incident: le capteur est orienté face à la source du rayonnement artificiel, permettant de mesurer le flux total émis par la lampe sur la surface des plaques.
- Mesure du rayonnement réfléchi: le capteur est orienté face à la surface de chaque plaque, permettant de mesurer le flux réfléchi par chaque revêtement.

Le rapport de ces deux mesures permet de déterminer la réflectance de chaque revêtement. Les prises de mesure ont été effectuées manuellement toutes les 15 minutes durant toute la durée de l'expérience.



Fig. III.26. Utilisation du dans le

III.3.4.4 Caméra thermique

La caméra thermique utilisée dans cette étude est une caméra infrarouge Testo 890, comme illustrée dans la figure III.27. Cet instrument de thermographie professionnelle permet la visualisation et la mesure sans contact de la distribution de température à la surface des plaques testées, en détectant le rayonnement infrarouge thermique émis par chaque surface.



Fig. III.27. Caméra thermique infrarouge Testo 890.

La caméra thermique fonctionne selon le principe de la thermographie infrarouge : chaque point de la surface émet un rayonnement infrarouge proportionnel à sa température selon la loi de Stefan-Boltzmann. Ce rayonnement est capté par le détecteur infrarouge de la caméra et converti en une image thermique colorée appelée thermogramme, où chaque couleur correspond à une gamme de températures.

Dans le cadre de cette expérience, la caméra thermique a été utilisée pour :

- Visualiser la distribution spatiale de la température sur la face avant de chaque plaque en fin d'expérience
- Valider les mesures ponctuelles obtenues par les thermocouples de type K.
- Comparer qualitativement le comportement thermique des différents revêtements testés à travers les thermogrammes obtenus.

III.3.4.5 Logiciel d'acquisition LabVIEW

Le logiciel d'acquisition et de traitement des données utilisé dans cette étude est LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), développé par National Instruments (NI). Ce logiciel constitue l'interface entre la chaîne d'acquisition NI cDAQ-9174 et l'opérateur, permettant la visualisation, l'enregistrement et le traitement en temps réel des données expérimentales.

Dans le cadre de cette expérience, LabVIEW a été utilisé pour :

- Acquérir en temps réel les températures mesurées par les thermocouples de type K connectés aux modules NI 9211, à une fréquence d'échantillonnage de 1 mesure toutes les 2 secondes
- Afficher simultanément l'évolution temporelle des températures de toutes les configurations testées sous forme de courbes.

- Enregistrer automatiquement les données dans un fichier de format exploitable pour le post-traitement sous Excel.
- Surveiller en continu le bon déroulement de l'expérience durant toute la durée des essais (90 minutes).

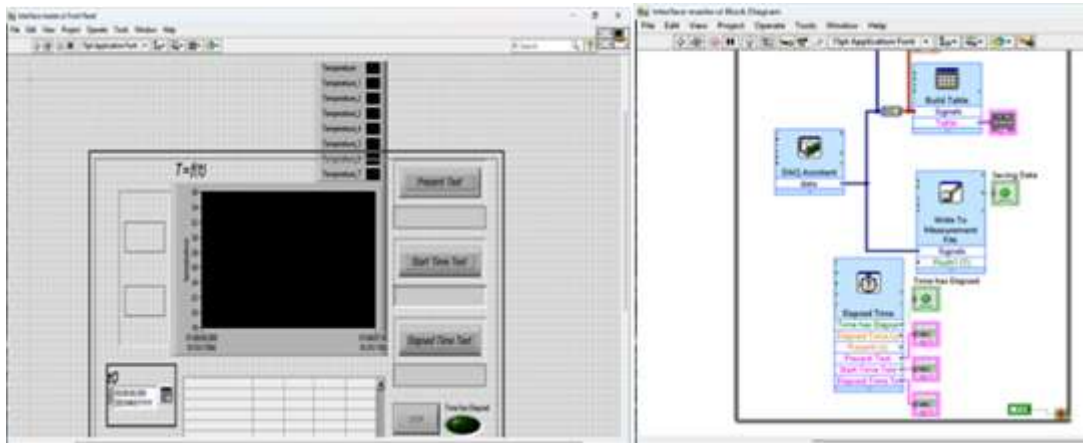


Fig III. 28 L'interface de LabVIEW utilisé

III.3.5 Protocole de mesure et positionnement des capteurs

Afin d'assurer une mesure complète et représentative des échanges thermiques pour chaque configuration testée, neuf thermocouples de type K ont été soigneusement répartis sur chaque plaque, comme illustré dans la figure III.29.

❖ **Mesure de la température de surface (face avant) :** Cinq thermocouples ont été fixés sur la face avant de chaque plaque, répartis de la manière suivante :

- TC₁ : au centre de la plaque
- TC₂ : à gauche de la plaque
- TC₃ : à droite de la plaque
- TC₄ : en haut de la plaque
- TC₅ : en bas de la plaque

Cette répartition permet de vérifier l'uniformité de la distribution thermique à la surface irradiée et de détecter d'éventuels gradients spatiaux liés à une distribution non homogène du rayonnement incident ou à une application non uniforme du revêtement.

❖ **Mesure des températures de convection :** par deux thermocouples répartis comme-suit

- TC₇ : positionné à 4 cm éloigné du mortier, mesurant la température de l'air près de la paroi exposée au rayonnement.
- TC₈ : positionné à 4 cm éloigné du mortier, mesurant la température de l'air près de la paroi non exposée au rayonnement.

Ces deux mesures permettent de quantifier les échanges convectifs entre la surface des plaques et l'air ambiant pour les prochains calculs approfondis.

Le positionnement des capteurs est identique pour toutes les configurations testées. La figure III.29, à titre d'exemple représente cette répartition des thermocouples appliquée pour chaque nouveau mortier revêtu.

Fig. III.29. Exemple de positionnement des 5 thermocouples

Mesure de la température de surface (face arrière) :

- TC₆ : positionné au centre de la face arrière de la plaque, permettant de mesurer la température après transfert thermique par conduction à travers l'épaisseur du matériau. Le gradient thermique $\Delta T = T_{avant} - T_{arrière}$ est directement déduit de ces mesures.
-

Fig. III.30. Positionnement des températures à la face arrière de la plaque

Mesure de la température ambiante :

- TC₉ : positionné à un certain écart du dispositif, mesurant la température ambiante du laboratoire, utilisée comme référence pour les calculs du bilan thermique et de l'analyse exergétique.

L'ensemble de ces neuf thermocouples est connecté aux deux modules NI 9211 de la chaîne d'acquisition NI cDAQ-9174, permettant l'enregistrement simultané de toutes les températures via le logiciel LabVIEW à une fréquence de 1 mesure toutes les 2 secondes durant toute la durée de l'expérience de 90 minutes.

III .4. Flux net reçu par une surface

Le flux thermique net montre ce que la surface perd ou gagne par rayonnement thermique IR.

Il représenté par :

$$q_{net} = \varepsilon \sigma T_s^4 F_{12} - \varepsilon \sigma T_{amb}^4 \quad (III.1)$$

- $\varepsilon \sigma T_s^4 F_{12}$: ce que la surface émet par la lampe.
- $\varepsilon \sigma T_{amb}^4$: ce que la surface reçoit de l'ambiance et réémet

III.5. réflectance solaire (SRI)

Le Solar Reflectance Index (SRI) est un indicateur adimensionnel qui quantifie la capacité d'un matériau à rejeter la chaleur solaire en combinant deux propriétés physiques : la réflectance solaire (capacité à réfléchir le rayonnement visible et proche infrarouge) et l'émissivité thermique (capacité à émettre du rayonnement infrarouge lointain). Il est normalisé par la norme **ASTM E1980 [1]

Équation générale

(III.2)

Avec :

- T_p^{noir} : température de surface du matériau de référence noir
- $T_p^{échantillon}$: température de surface du matériau de référence blanc
- $T_p^{échantillon}$: température de surface du matériau testé

III.6. Efficacité thermique

L'efficacité d'un revêtement sur un mortier stipule de combien de % ce revêtement réduit-il le transfert thermique par rapport . Elle peut se présenter de deux manières :

L'équation 3.3 quantifie la réduction du flux d'énergie traversant la paroi en comparant différents matériaux à un mortier de référence

(III.4)

Elle quantifie la baisse de la température de surface provoquée spécifiquement par l'ajout .

Physiquement si :

la peinture → elle absorbe plus que le mortier (cas de

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV.1. Introduction

Les différents revêtements et peintures appliqués sur les plaques de mortier de ciment ont été évalués de manière rigoureuse sous exposition à un rayonnement artificiel continu en laboratoire. Les résultats présentés dans ce chapitre mettent en évidence les comportements thermo-optiques clés de chaque configuration à travers des analyses thermiques approfondies. Ils traitent notamment l'évolution temporelle des températures de surface, de la dynamique des flux thermiques rayonnés, absorbés et réfléchis, ainsi que de l'impact direct de chaque et globale par rapport au mortier . Le traitement des résultats sont aussi renforcés par des logiciels graphiques et thermographiques comme suit:

- OriginPro 8 : Cet outil d'analyse de données a été employé pour l'exploitation graphique des mesures. Il permet de traiter les points enregistrés sous Excel via l'interface LabVIEW, afin de générer les courbes temporelles et de procéder à des ajustements par des fonctions mathématiques (régressions et lissages).
- IRTSoft ((Testo i890) : Ce logiciel d'analyse thermographique est dédié au post-traitement des images infrarouges et optiques acquises par la caméra thermique. Il permet de cartographier avec précision la répartition spatiale des températures à la surface des échantillons lors des essais et d'estimer l'intervalle de fusion.

IV.2. Montage expérimental

Le dispositif expérimental (Fig. IV. 1) mis en place pour l'évaluation thermique des revêtements est illustré dans la figure ci-dessus. Il est composé

afin d'assurer une exposition homogène et

. Le caisson est construit en bois dont les parois internes sont isolées par du polystyrène, permettant de minimiser les pertes de chaleur parasites et de concentrer le flux

sur les faces exposées de la boîte, tant sur la paroi frontale que sur la surface inférieure, permettant ainsi d'évaluer simultanément le comportement

. Les températures de surface sont relevées à l'aide d'une caméra thermique infrarouge, permettant de visualiser et d'enregistrer la distribution spatiale de la chaleur sur les échantillons avec précision. En complément, pour mesurer

énergétique reçu par les échantillons. Il permet de quantifier avec précision le flux de rayonnement incident. L'ensemble de ce montage permet de reproduire des conditions , garantissant ainsi la fiabilité et la comparabilité des résultats obtenus pour les différents revêtements étudiés.

Fig. IV.1. Montage

thermiques.

IV. 3. Analyse de l'évolution des températures des faces avant et arrière

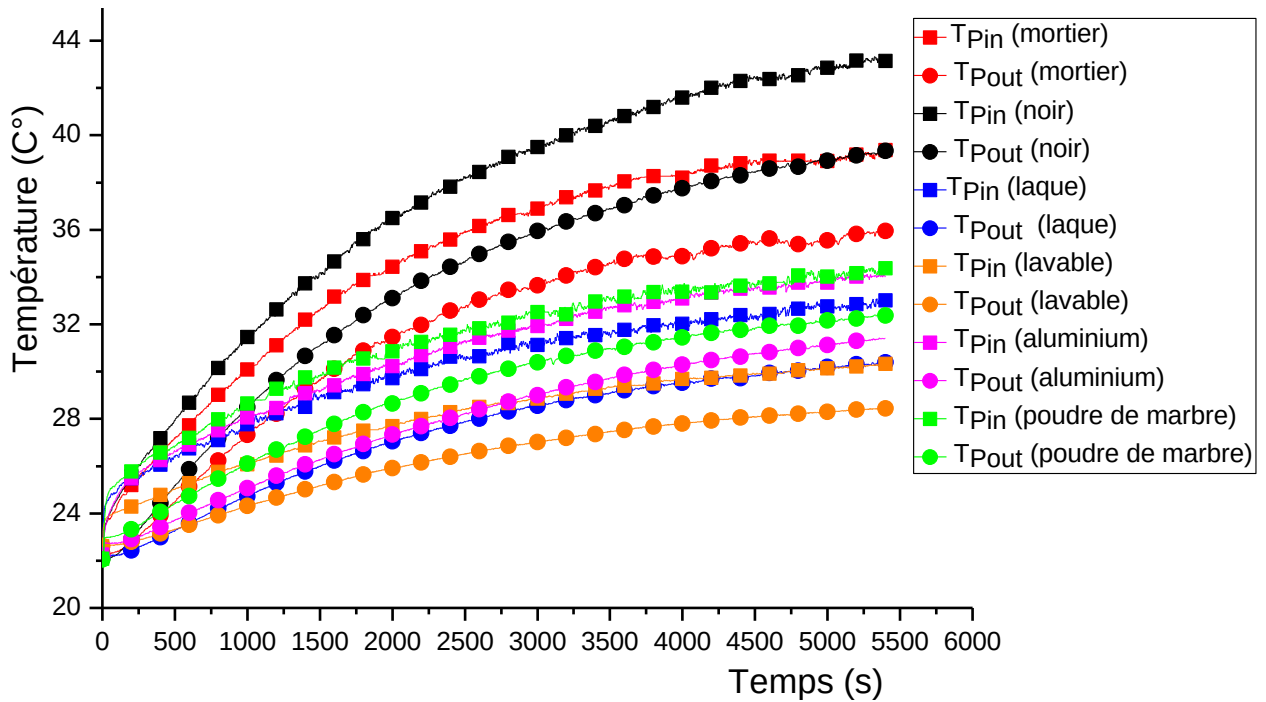


Fig. IV. 2. Évolution temporelle des températures des faces avant et arrière du mortier de ciment revêtu de différents types de peintures.

La Figure IV. 2 illustre l'évolution temporelle des températures de la face avant exposée au rayonnement $T_{p_{in}}$ et de la face arrière non exposée $T_{p_{out}}$ pour les six configurations de mortier étudiées, sur une durée totale de 5500 secondes (environ 91 minutes). L'allure générale des courbes met en évidence deux phases distinctes : un régime transitoire caractérisé par une élévation logarithmique rapide des températures dès l'exposition au flux radiatif, suivi d'une stabilisation progressive vers un équilibre thermique (régime permanent) à partir de 4500 secondes, où la chaleur absorbée est compensée par les déperditions convectives et radiatives.

Au début, se trouve à l'équilibre avec la température ambiante du laboratoire, oscillant entre . Dès l'activation du , toutes les configurations entrent dans un régime transitoire caractérisé par une élévation rapide des températures de la face avant $T_{p_{in}}$. Durant cette première phase et s, le taux de chauffage (la pente de la courbe) est maximal, car l'écart de température avec l'air ambiant est encore faible, minimisant ainsi les pertes convectives. La présente la cinétique plus en raison de sa forte , atteignant déjà s. Le mortier) suit une tendance similaire mais légèrement atténuée, atteignant même instant.

À l'inverse, la peinture lavable blanche (courbe orange) démontre un freinage thermique immédiat.

À 2000 s, sa face avant n'est qu'à 27,6 °C (soit un ΔT de 9 et 7 °C par rapport), prouvant l'efficacité instantanée de sa haute

Au-delà de s, l'échauffement commence à ralentir pour tous les échantillons. L'atténuation progressive de la pente des courbes s'explique par l'accroissement des pertes thermiques par convection et rayonnement avec l'élévation de la température de surface.

progressivement comparables au , conduisant le système vers un régime quasi stationnaire. Durant cette période, la hiérarchie des performances thermo-optiques se fige clairement. Les

se , créant un faisceau de dans la du graphique C), tandis que le mortier t s'isolent dans Vers

4500 s, les courbes tendent vers une asymptote horizontale, marquant l'atteinte d'un équilibre thermique (régime permanent).

IV. 4. Analyse de L'évolution des différences de températures

La Figure IV.3 met clairement en évidence que ainsi que le mortier présentent les écarts de température les par rapport aux autres configurations. À l'inverse, le mortier affiche les différences de température les et les de l'essai. Ce comportement thermique suggère que ce revêtement est le plus performant pour limiter l'échauffement de la surface exposée. Il apparaît ainsi comme une solution particulièrement adaptée , telles que l'Algérie.

En conclusion : Ces résultats confirment l'intérêt de ce revêtement pour la réduction des gains thermiques .

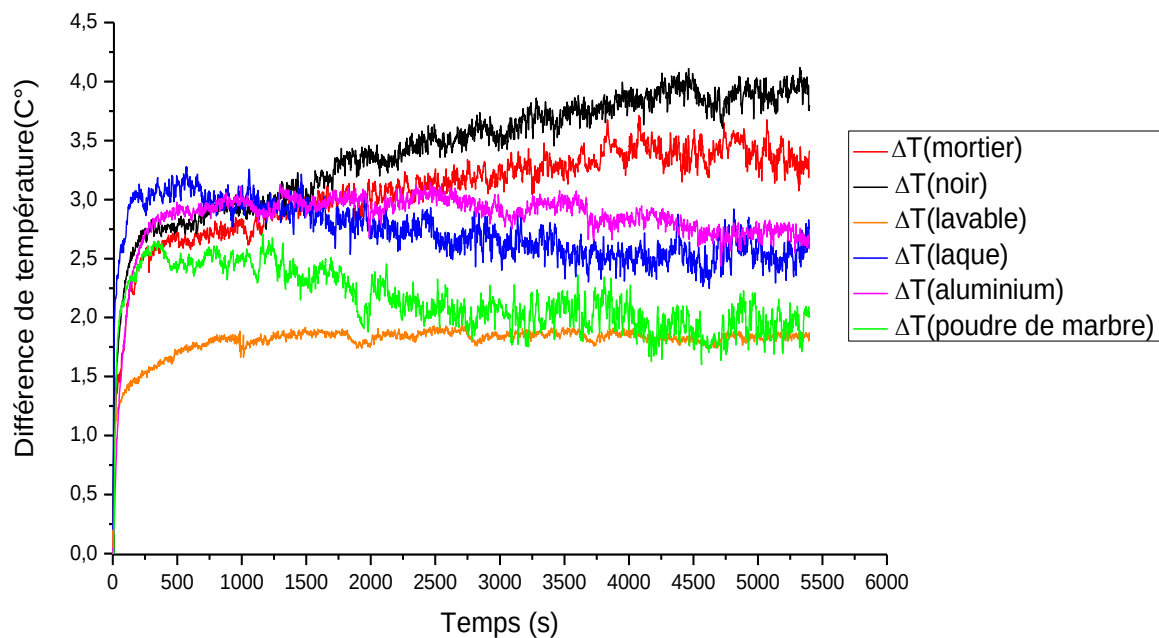


Fig. IV.3. Évolution temporelle des différences du mortier de .

IV.5. Évolution temporelle du du mortier de ciment

La Figure IV.4 présente l'évolution temporelle de la puissance du rayonnement réfléchi (W/m^2) mesurée sur les faces avant Pr_{in} et arrière Pr_{out} d'échantillons de mortier de ciment : mortier peinture e, , , feuille . Les échantillons ont été soumis au même flux de minutes afin d'évaluer l'influence des propriétés optiques des revêtements sur leur comportement radiatif.

Les courbes obtenues présentent un comportement transitoire commun caractérisé par , que nous attribuons à l'échauffement graduel des surfaces et à l'évolution des propriétés radiatives de l'interface revêtement-air, avant d'atteindre progressivement un régime quasi-stationnaire. Les deux peintures blanches se distinguent nettement de l'ensemble des revêtements :

. Ceci se traduit par un pouvoir réfléchissant important et une capacité supérieure à limiter la pénétration thermique au sein du matériau. observé entre ces deux peintures de même teinte blanche s'explique par la différence de leur nature chimique de fabrication. de surface favorisent une dans toutes les directions, présente une légèrement supérieure à celle de dans ces conditions expérimentales. Le revêtement une valeur d'environ Bien intrinsèquement un matériau hautement surface gaufrée génère des micro-cavités qui induisent des réflexions et une dispersion du rayonnement, réduisant ainsi son efficacité réfléchissante globale par rapport à une surface . Ce dernier contribue à réduire les phénomènes de transfert de masse liés à la pénétration de l'eau dans les parois, notamment au niveau des surfaces mal enduites ou fissurées.

tandis que la enregistre les valeurs les plus faibles confirmant son caractère fortement absorbant.

Concernant les valeurs de rayonnement , nous avons relevé qu'elles demeurent systématiquement et nettement inférieures à celles mesurées en face avant pour l'ensemble des revêtements, quelle que soit la configuration

testée. Cet écart considérable met en évidence le rôle atténuateur très efficace du mortier de ciment, qui dissipe la quasi-totalité de l'énergie radiative incidente par absorption volumique et transfert conductif à travers son épaisseur. Nous avons également observé que cet écart n'est pas uniforme pour tous les revêtements :

ce qui confirme l'influence déterminante des propriétés thermo-optiques du revêtement de thermique global de la paroi.

Fig. IV.4. Évolution temporelle du T_{int} derrière du mortier de ciment revêtu de différents revêtements

IV. 6. Analyse d'évolution du T_{int}

Afin de caractériser quantitativement les T_{int} de chaque revêtement indépendamment du flux incident, nous avons calculé et tracé l'évolution T_{int} en fonction du temps pendant 90 minutes d'exposition au rayonnement incident. De manière analogue aux résultats précédents, nous observons une phase transitoire commune à tous les revêtements, caractérisée par une augmentation du T_{int} au cours du temps. Le taux d'augmentation est plus élevé pour l'ensemble des revêtements, suivie d'une phase de stabilisation et continue jusqu'à 90 minutes sans atteindre l'équilibre thermique, ce qui suggère que l'équilibre thermique n'est pas encore totalement établi en fin d'expérience.

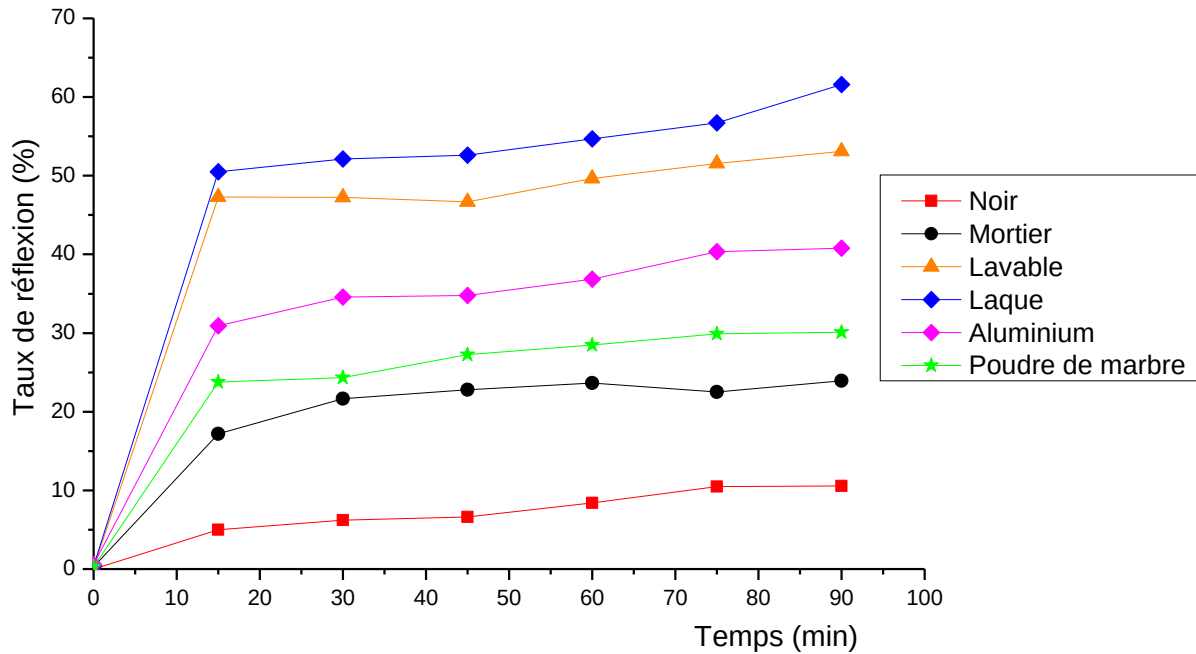


Fig. IV.5. Évolution temporelle du taux de réflexion par les faces du mortier de ciment.

Les deux revêtements se distinguent nettement de l'ensemble des revêtements testés. La Laque présente le taux de réflexion le plus élevé, atteignant environ 61% après 90 minutes avec une tendance encore croissante, contre 10% pour le Noir, soit un écart de 51 points de pourcentage entre ces deux peintures de même nature. Cet écart s'explique par la composition des revêtements : la Laque, dont la surface lisse et brillante possède une composante de réflexion spéculaire directionnelle en complément de la réflexion diffuse, présente un taux de réflexion supérieur à celui de la peinture blanche, dont la finition mate génère une réflexion exclusivement diffuse et donc moins efficace dans nos conditions de mesure. Le revêtement en feuille de paxaluminé occupe une position intermédiaire avec un taux de réflexion de 40% ; malgré les propriétés métalliques intrinsèques de l'aluminium, sa surface mate induisant des réflexions multiples qui atténuent son efficacité réflective globale, expliquant ainsi ses performances inférieures à celles des peintures blanches. La peinture lavable et le mortier se stabilisent respectivement à 53% et 24%, tandis que le Noir enregistre le taux de réflexion le plus faible avec seulement 10%, confirmant son comportement fortement absorbant et son inadaptation aux applications de rénovation thermique visant à réduire les apports solaires.

Ces résultats nous permettent de confirmer et de quantifier précisément la hiérarchie des performances réfléchies :

, constituent les solutions les
pour limiter par les parois en contexte de
rénovation énergétique.

IV. 7. Analyse d'évolution de la puissance réfléchi par les faces avant

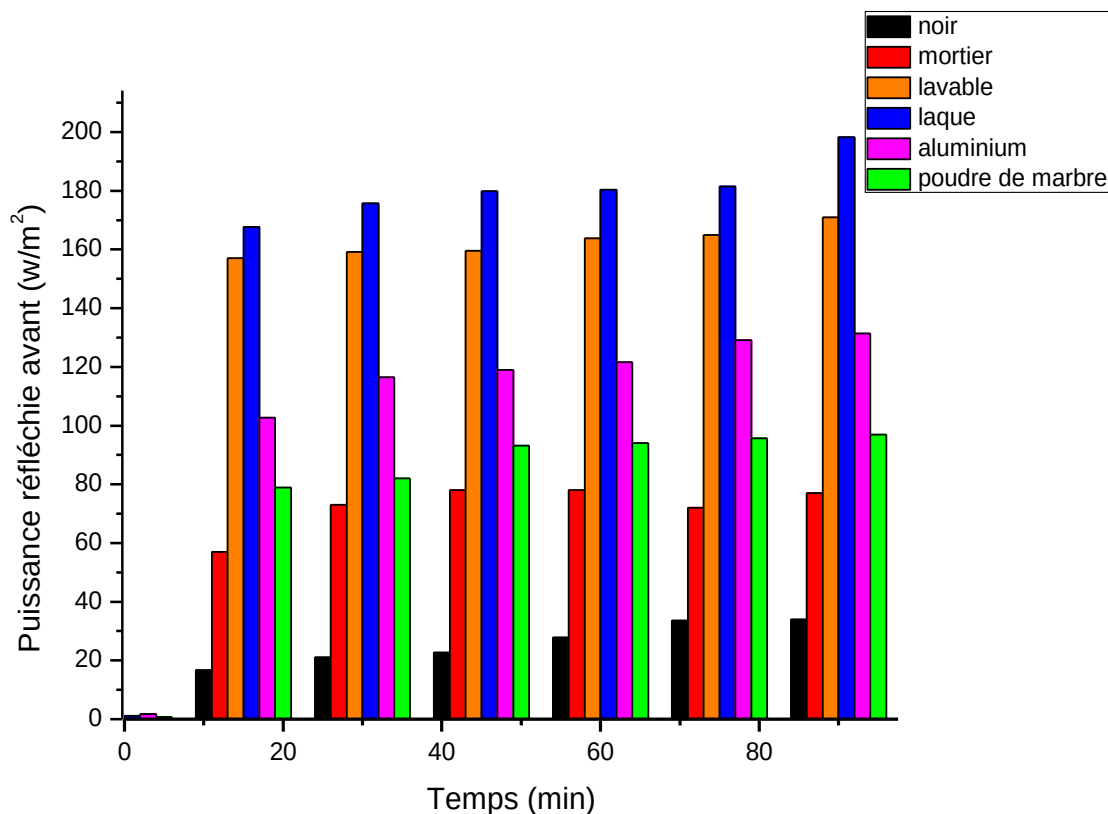


Fig. IV.6. Évolution temporelle du Puissance réfléchi par les faces avant du mortier de ciment revêtu de différents types de peintures.

La Figure 4.6 présente sous forme d'histogrammes l'évolution de la
(en) par de chaque configuration tout au long de l'expérience. Cette
grandeur représente la fraction de (le flux) qui
n'est pas absorbée par le matériau, et qui est donc renvoyée vers l'environnement. Dès les
premières minutes d'exposition, on observe rapidement à un
niveau élevé pour les revêtements clairs, puis montre une légère augmentation progressive

pour se stabiliser. Cette dynamique est en parfaite corrélation avec (albédo) analysée précédemment.

Les boucliers thermiques () : Les finitions démontrent une supériorité . La peinture) renvoie la plus grande frôlant en fin d'expérience. Elle est suivie de près par la) qui rejette environ forte réjection radiative explique directement pourquoi ces surfaces restent les plus froides (comme observé sur la Les réflecteurs in : magenta) réfléchit . Bien qu'il s'agisse d'un , sa (internes) et son altération optique potentielle limitent sa puissance aux . La (barres vertes) rejette quant à elle près de . Les surfaces fortement absorbantes : Le mortier ne parvient à réfléchir qu'environ ce qui signifie que la incident pénètre le matériau. Enfin, la oires) ferme le classement avec une L'énergie non est fatalement convertie en chaleur sensible, causant l'échauffement extrême de cet échantillon.

IV.8. Analyse d'évolution du flux la face

La Figure 4.7 illustre l'évolution temporelle du flux thermique net (en W) reçu par la es différents échantillons . Ce représente la qui est effectivement emmagasinée par le matériau (c'est-à-dire la puissance incidente déduite de la part réfléchie et des pertes convectives et radiatives vers l'ambiant). L'allure des courbes montre une et (régime transitoire) pour différents Ce qui se traduit par une forte pénétration encore . Au-delà de , les courbes s'infléchissent pour atteindre un palier d'équilibre (régime quasi-permanent), signifiant que le flux de chaleur traversant la paroi s'est stabilisé. L'analyse des valeurs met en évidence le rôle barrière de chaque revêtement contre chaleur :

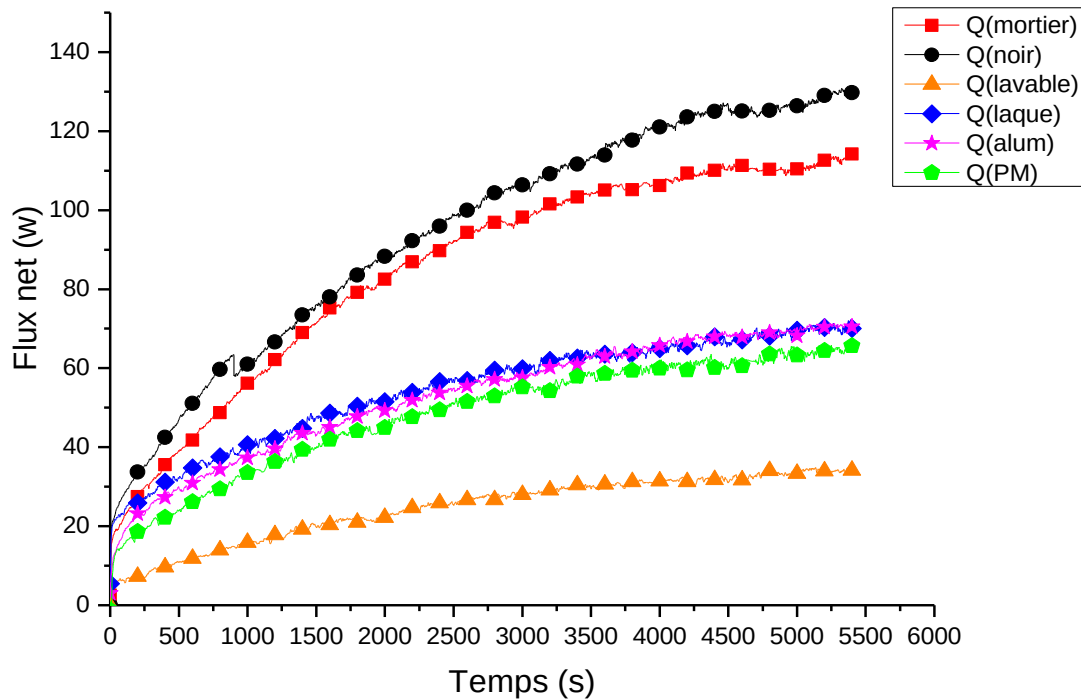


Fig. IV.7. Évolution temporelle

mortier

- Palier 1 représentant les surfaces critiques : affiche le de l'étude, se stabilisant autour de 130 W. Le absorbe également une charge , atteignant W. Ces valeurs élevées expliquent directement les observées sur les profils de température.
- Palier représentant les modérateurs thermiques : Les revêtements en et présentent un comportement très similaire, stabilisant aux alentours de . offre une légère amélioration avec d'environ . Ces solutions permettent de diviser pénétrant .
- Palier représentant le bouclier : La l se détache radicalement des autres configurations. Elle maintient au long de l'expérience, plafonnant à seulement

IV.9 Évolution temporelle du

mortier de ciment revêtu

Afin de quantifier la , effectivement absorbée par , nous avons calculé et pour les six

Les courbes montrent une croissance linéaire et continue du flux absorbé pour l'ensemble des revêtements sans tendance à la stabilisation. Ceci s'explique par la constance et par la croissance proportionnelle au cours du temps, traduisant une accumulation thermique au sein du

Les résultats obtenus montrent que la distingue nettement (ondes), confirmant sa tendance à - totalité du . Le affichent des valeurs respectivement), en raison de l'absence de dans leur composition. Le , constitué d'une gaufré à surface quadrillée, présente Cette performance intermédiaire s'explique par le double : due à sa , mais qui limite le refroidissement radiatif. Le introduit par ailleurs une composante de réflexion spéculaire pur, expliquant pourquoi le flux absorbé reste supérieur à celui des malgré l'aspect .

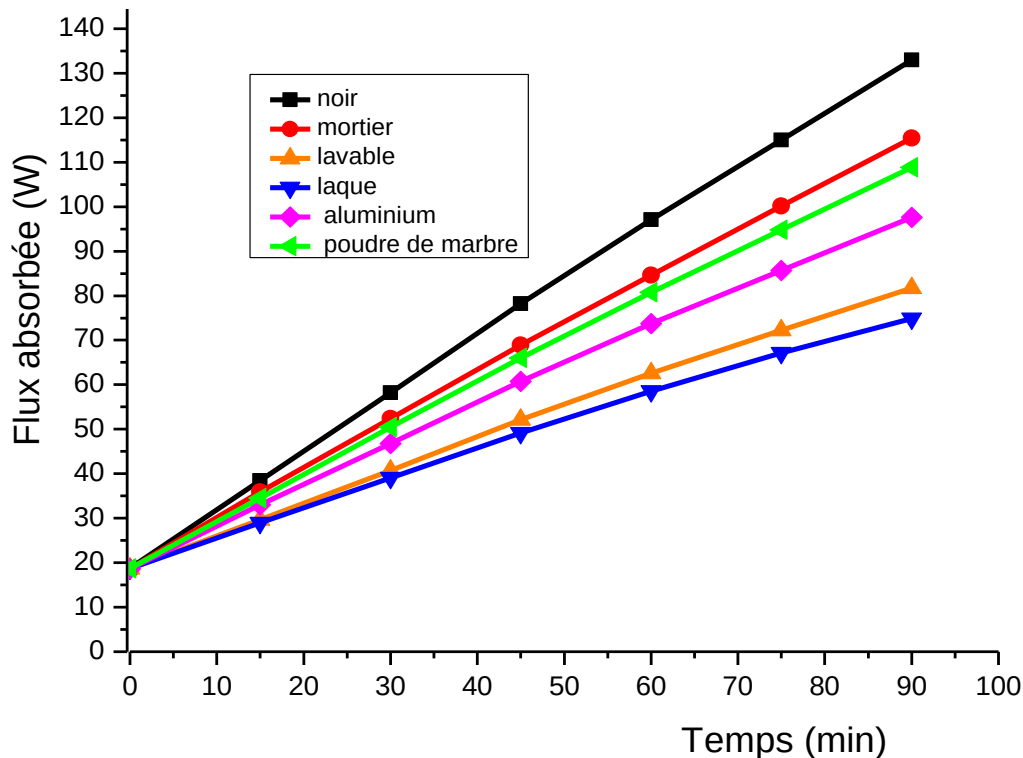


Fig. IV.8. Évolution temporelle du flux absorbé par le mortier de ciment

Les deux peintures enregistrent les les plus faibles, avec toutefois un écart notable entre elles : la absorbe environ tandis que la n'absorbe que , soit une différence en faveur de la l . Cet écart, bien que modéré en valeur absolue, est physiquement significatif et s'explique par la nature de la finition de surface. par sa , favorise une composante de directionnelle via sa , lui conférant ainsi un coefficient d'absorption légèrement inférieur à celui de dont la finition mate induit une réflexion exclusivement diffuse et une absorption marginalement plus élevée.

Ces résultats confirment que les , et particulièrement la laque, constituent les solutions les plus efficaces pour limiter les apports thermiques à travers les parois de

adapté

dans une optique de rénovation énergétique.

IV.10. Analyse comparative de ciment

de mortier

Fig.IV.9 Analyse comparative

mortier de ciment

L'indice

est un paramètre adimensionnel normalisé défini par la norme ASTM E1980, qui quantifie la capacité d'une surface à rejeter l'énergie solaire incidente en combinant simultanément sa réflectance solaire et son émissivité thermique infrarouge. Contrairement à la norme originale qui utilise une surface noire et une surface blanche standards comme références. Nous avons adapté cette approche en adoptant comme surfaces de référence les deux revêtements extrêmes de notre étude : la peinture noire, caractérisée par le coefficient d'absorption le plus élevé, à laquelle nous avons attribué

Cette calibration relative permet de situer les performances thermiques des revêtements restants directement par rapport aux cas limites mesurés dans nos conditions expérimentales, garantissant ainsi une comparaison cohérente et scientifiquement rigoureuse.

L'analyse comparative des valeurs de pour les quatre revêtements étudiés met en évidence des écarts importants, en accord avec l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus précédemment. La laque présente la valeur de dépassant ainsi les performances du revêtement en feuille de la poudre

dont les valeurs voisines traduisent des comportements thermiques comparables et cohérents avec leurs taux de réflexion mesurés expérimentalement. Le mortier nu, en revanche, enregistre une valeur de confirmant qu'en l'absence de tout revêtement fonctionnel, la paroi se comporte comme un absorbeur quasi-intégral, se

rapprochant ainsi du comportement de la référence noire, et maximisant la densité de flux thermique transmise vers l'intérieur de la structure.

Ces résultats établissent une hiérarchie thermique claire et quantifiée : laque (SRI ≈ 79) > aluminium gaufré (SRI ≈ 71) > poudre de marbre (SRI ≈ 69) >> mortier nu (SRI ≈ 1), et démontrent de manière rigoureuse que l'application d'un revêtement à haute réflectance solaire sur le mortier de ciment constitue une stratégie passive efficace et scientifiquement fondée pour améliorer significativement les performances énergétiques des enveloppes de bâtiments en contexte de rénovation thermique.

IV.11. Analyse comparative de l'indice de réflectance solaire (SRI) et de la réflectance du mortier de ciment revêtu de différents types de peintures à $t = 5400$

La figure IV.10 représente une idée de l'analyse conjointe du SRI à $t = 5400$ s et de la réflectance du mortier de ciment revêtu de différents types de peintures. La peinture blanche laque affiche la plus haute réflectance (SRI ≈ 79), dépassant celle de l'aluminium gaufré (SRI ≈ 71) et de la poudre de marbre (SRI ≈ 69). Le mortier nu (SRI ≈ 1) présente la plus faible réflectance. Les courbes de réflectance du mortier de ciment revêtu de peinture blanche laque et d'aluminium gaufré sont très proches, indiquant une performance thermique similaire.

IV.10 Analyse comparative de l'indice de réflectance solaire (SRI) et de la réflectance du mortier de ciment revêtu de différents types de peintures à $t = 5400$ s.

Concernant les deux peintures blanches, l'écart de performance entre () et la (, référence) s'explique par la nature fondamentalement différente de leur finition de surface. La 1 , de par sa texture lisse et brillante, favorise une réflexion spéculaire directionnelle qui renvoie le rayonnement incident selon un angle déterminé, réduisant ainsi l'énergie absorbée. Cette composante spéculaire, ajoutée à la réflexion diffuse, lui confère un coefficient d'absorption légèrement inférieur. La , en revanche, présente une finition mate qui induit une réflexion exclusivement diffuse, sans composante spéculaire. Cette diffusion omnidirectionnelle, bien que réfléchissante, engendre une absorption marginalement plus élevée due à des phénomènes de rétrodiffusion interne dans la couche poreuse de la peinture. Cependant, dans notre protocole expérimental, e affiche la température de surface la plus faible (pour la , ce qui justifie son attribution = 100. Cette apparente contradiction entre réflectance et température s'explique par la position angulaire du projecteur : la réflexion spéculaire de la laque renvoie le rayonnement dans une direction privilégiée qui peut ne pas coïncider avec l'axe de mesure, alors que la diffusion de répartit uniformément l'énergie réfléchie, minimisant l'échauffement global de la surface.

combine une forte réflectivité visible avec une émissivité thermique très faible ($\varepsilon \approx 0,05-0,20$) qui limite son refroidissement radiatif. Le gaufrage quadrillé diffuse le rayonnement et réduit l'effet miroir, tandis que la faible inertie thermique de la feuille minore son efficacité globale.

sa réflectance plus faible par une émissivité élevée ($\varepsilon \approx 0,90$) et une inertie thermique accrue due au carbonate de calcium dense. Sa texture granuleuse assure une réflectance diffuse stable, offrant une durabilité supérieure aux surfaces métalliques.

enregistre un SRI quasi-nul (≈ 1), confirmant son comportement d'absorbeur dominant et la nécessité impérieuse d'un revêtement réfléchissant.

En synthèse, les constituent les solutions les plus efficaces, avec un avantage contextuel pour la laque en réflexion spéculaire et pour la en diffusion homogène. offrent des alternatives techniques intéressantes malgré leurs limitations respectives.

IV.12. Analyse comparative de l'efficacité thermique

La Figure IV.11 présente sous forme d'histogramme l'efficacité thermique moyenne de chaque configuration. Dans cette étude, cette efficacité traduit le gain relatif en termes de réduction de la charge thermique par rapport à la plaque de référence (la ligne de base est fixée à 0 %). Une courbe ascendante indique une amélioration de la protection thermique (refroidissement passif), tandis traduit une (effet capteur solaire).

•

le

mortier brut. Du point de vue thermodynamique, elle agit comme un capteur solaire qui emmagasine plus de chaleur que le ciment brut, aggravant ainsi continuellement la surchauffe de la paroi.

Fig. IV.11. Analyse
de peintures.

IV.13. Conclusion du chapitre

Tableau IV.1. Analyse comparatives des paramètres thermiques et de puissance à t = 90min (5400s) pour chaque configuration

Plaques				
Mortier	42,98543	38,98261	4,002829	77
Mortier+	43,13148	39,33223	3,79925	34
Mortier+	30,3218	28,44309	1,878709	171
Mortier+	33,00989	30,38448	2,625418	198,3
Mortier+	33,9939	31,41118	2,582717	131,4
Mortier+	34,36308	32,3645	1,99858	97

La figure IV.12 résume le tableau précédent sous forme d'histogramme dans lequel est présenté un bilan comparatif global des performances thermiques et radiatives des six configurations de plaques en mortier de ciment testées sous rayonnement artificiel continu pendant 90 minutes. Ce graphe met en relation synoptique quatre paramètres fondamentaux : la puissance réfléchie (Pr en W/m^2 , sur l'axe droite), les températures des faces avant (T_{avant}) et arrière ($T_{arrière}$) en $^{\circ}C$, ainsi que le gradient thermique interne ($\Delta T = T_{avant} - T_{arrière}$).

Fig. IV.12. Graphe récapitulatif qui compare l'évolution temporelle de Pr , T_{avant} , $T_{arrière}$ et ΔT des différents mortiers de ciment

1. Analyse du pouvoir

L'analyse de la

met en évidence l'influence déterminante de la nature et de la composition des revêtements sur leur réflectance spectrale. La peinture laque présente la performance optique

λ , suivie de la λ , ce qui s'explique par leur fort pouvoir

clairs dans le spectre visible et le proche i . Le léger

avantage de la peut être attribué à sa finition plus lisse et brillante, favorisant une en sus de la .

Le la affichent des valeurs intermédiaires de tandis que le

enregistrent les respectivement, confirmant leur comportement fortement absorbant.

2. Impact sur le comportement thermique des plaques (

est inversement proportionnelle à la puissance réfléchie, validant l'effet « Cool Roof » recherché. La peinture noire enregistre le pic thermique le plus sévère avec , suivie du mortier =

38.98°C, confirmant que l'absorption radiative massive se traduit par une élévation

significative de l'énergie interne du matériau. À l'opposé, la peinture

), suivie de la

30.38°C), soit un écart thermique de surface de près de 13°C entre les cas extrêmes, ce qui représente une réduction substantielle des apports thermiques solaires par les parois opaques.

3. Analyse du T): Le température T quantifie l'intensité du flux conductif traversant l'épaisseur du mortier. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées pour la peinture °C et le mortier °C), indiquant un flux thermique par conduction plus intense à travers la paroi. Les revêtements réfléchissants induisent des nettement atténués : peinture = 1.88°C), = 2.00°C), = 2.58°C) et = 2.63°C), démontrant que ces s limitent non seulement l'échauffement de surface mais réduisent également les transferts conductifs vers l'intérieur de la paroi.

Ces résultats valident l'hypothèse de recherche : l'application de , en particulier la laque et la , constitue une solution passive la plus performante pour la rénovation énergétique des enveloppes de bâtiments exposées à un rayonnement intense, C par rapport à une surface ; par rapport à un mortier , limitant ainsi drastiquement les transferts thermiques vers l'intérieur des structures.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce mémoire de fin d'études présente une étude expérimentale et comparative approfondie sur l'évaluation de [] et [] à performances thermiques, conçus comme une solution passive et durable pour la rénovation énergétique des bâtiments. L'objectif principal de ce travail était d'analyser scientifiquement l'impact de différents traitements de surface appliqués sur des plaques de mortier de ciment, afin de limiter la pénétration de la chaleur sous un rayonnement artificiel contrôlé en laboratoire.

Pour bien mener cette étude, un dispositif expérimental sous forme de tunnel d'essai isolé a été adapté au sein du laboratoire d'Energétique et Thermique Appliquée (ETAP) de l'Université de Tlemcen. Grâce à une instrumentation précise combinant des capteurs de température, des mesures [] imagerie infrarouge, nous avons pu suivre rigoureusement le comportement thermique et optique de chaque configuration face à une [] continue.

Les résultats expérimentaux obtenus mettent en évidence l'efficacité [] et revêtements [] pour limiter l'échauffement des parois en mortier de ciment. Comparativement au [] nu, ces traitements de surface permettent une réduction significative []. Les principales conclusions de cette étude peuvent être résumées comme suit :

❖ **L'influence déterminante des propriétés thermo-optiques** : Les essais ont physiquement démontré que la nature et la [] de surface gouvernent directement le comportement thermique global de la paroi.

❖ **La supériorité des []** Les []) se sont imposées comme d'excellents boucliers thermiques. En maximisant le rayonnement [] elles maintiennent la face exposée à des températures nettement [] le gradient thermique à travers le matériau, soit un [] pour la [] °C, mortier [] au-delà de 39 et 43 °C. Ces [] offrent aussi une efficacité [] remarquable par [] La [] apparaissent ainsi comme une solution particulièrement adaptée pour le revêtement [] l'Algérie.

Le rôle des réflecteurs intermédiaires : Les solutions alternatives telles que le [] apportent une amélioration nette par rapport à la []

référence brute, bien que leurs performances globales soient influencées par leur texture ou leur conductivité intrinsèque.

❖ **L'effet critique des** : À l'inverse, s'est comportée comme un capteur solaire actif. En absorbant la quasi-totalité du pour la convertir , elle et e bilan énergétique, confirmant qu'elle représente le choix le moins adapté pour le confort thermique. La puissance ré s faces a sont W/m^2 .

En somme, ce projet valide de manière indéniable l'intérêt des technologies passives de l'enveloppe extérieure. L'application d'un revêtement constitue une stratégie efficace, économique et facile à mettre en œuvre pour atténuer l'impact du

En guise de perspectives, ce travail ouvre la voie à de futures investigations, notamment l'étude du vieillissement naturel de climatiques réelles (poussière, humidité) ou encore l'évaluation de leur durabilité thermique à long terme, afin d'optimiser leur de demain.

Références bibliographique

- [1] Barišić, I., Grubeša, I. N., Krstić, H., & Kubica, D. (2022). Field and Laboratory Assessment of Different Concrete Paving Materials Thermal Behavior. *Sustainability*, 14(11), 6638. <https://doi.org/10.3390/su14116638>
- [2] Li, Y., Xie, Y., Syu, J., Huang, C., Tsai, H., Cheng, T., Chen, Y., & Lee, W. (2021). A Study on the Influence of the Next Generation Colored Inorganic Geopolymer Material Paint on the Insulation Measurement of Concrete Building Shell. *Sustainability*, 14(1), 164. <https://doi.org/10.3390/su14010164>
- [3] Lu, Y.; Rahman, M.A.; Moore, N.W.; Golrokh, A.J. Lab-Controlled Experimental Evaluation of Heat-Reflective Coatings by Increasing Surface Albedo for Cool Pavements in Urban Areas. *Coatings* 2022, 12, 7. <https://doi.org/10.3390/coatings12010007>
- [4] Yi, Y.; Jiang, Y.; Li, Q.; Deng, C.; Ji, X.; Xue, J. Development of Super Road Heat-Reflective Coating and Its Field Application. *Coatings* 2019, 9(12), 802. <https://doi.org/10.3390/coatings9120802>
- [5] He, Y., Lu, B., Fang, J., Lei, Y., Gao, S., & Feng, C. (2024). Radiative cooling for long-term building energy efficiency: An experimental comparison of seven coatings. *National Science Open*, 3(3), 20230065. DOI : <https://doi.org/10.1360/nso/20230065>
- [6] Shang, J., et al. (2024). Study on Thermal Reflection Characteristics of Composite Inorganic Coatings on Different Walls. *Applied Sciences*, 14(16), 6898. <https://doi.org/10.3390/app14166898>
- [7] Wai, C. Y., Chau, H.-W., Paresi, P., & Muttill, N. (2025). Experimental Analysis of Cool Roof Coatings as an Urban Heat Mitigation Strategy to Enhance Thermal Performance. *Buildings*, 15(5), 685. DOI : <https://doi.org/10.3390/buildings15050685>
- [8] Marchini, F., Chiatti, C., Fabiani, C., Latterini, L., & Pisello, A. L. (2024). Investigating the relationship between surface roughness and reflectance properties of building materials. *Journal of Physics: Conference Series*, 2685(1), 012030. DOI : <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2685/1/012030>
- [9] Nie, X., Yoo, Y., Song, J., Krishna, A., Hu, H., & Lee, J. (2020). Cool White Polymer Coatings based on Glass Bubbles for Buildings. *Scientific Reports*, 10, Article 6661. DOI : [10.1038/s41598-020-63027-2](https://doi.org/10.1038/s41598-020-63027-2)

- [10] Farhan, S. A., Ismail, F. I., Kiwan, O., Shafiq, N., Zain-Ahmed, A., Husna, N., & Abd Hamid, A. I. (2021). Effect of roof tile colour on heat conduction transfer, roof-top surface temperature and cooling load in modern residential buildings under the tropical climate of Malaysia. *Sustainability*, 13(9), 4665. <https://doi.org/10.3390/su13094665>
- [11] Nutakki, T. U. K., & Kazim, W. U. (2022). Effects of natural weathering on the performance of high solar reflective index paint surfaces exposed in harsh climatic conditions of United Arab Emirates. *Buildings*, 12(7), 1002. <https://doi.org/10.3390/buildings12071002>
- [12] Athmani, W., Sriti, L., Dabaieh, M., & Younsi, Z. (2023). The potential of using passive cooling roof techniques to improve thermal performance and energy efficiency of residential buildings in hot arid regions. *Buildings*, 13(1), 21. <https://doi.org/10.3390/buildings13010021>.
- [13] Gawełek, M., Norvaisiene, R., Krause, P., Belok, J., Wilk-Słomka, B., Marchacz, M., & Sitek, M. (2026). The impact of 'thermo-protective' paints on the thermal insulation of external walls. *Energies*, 19(10), 2362. <https://doi.org/10.3390/en19102362>
- [14] S. Bensaada et M. T. Bouziane, *Transfert de Chaleur : Cours et exercices résolus*. Algérie: [s.n.], s.d.
- [15] B. Achour, B. Rabia, et K. Srairi, « L'ETUDE DE LA CONDUCTION THERMIQUE ».
- [16] F. Le Frious, « Les propriétés thermiques des matériaux et les références métrologiques », Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), Paris, France, Rapport technique, déc. 2010. [En ligne]. Disponible sur: www.lne.fr.
- [17] Matan, « Quels sont les facteurs influençant la conductivité ? », Electricity - Magnetism. Consulté le: 18 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.electricity-magnetism.org/fr/quels-sont-les-facteurs-influençant-la-conductivite/>
- [18] « Conductivité thermique d'un matériau », Energie Plus Le Site. Consulté le: 18 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://energieplus-lesite.be/theories/enveloppe9/comportement-des-materiaux4/conductivite-thermique-d-un-materiau/>
- [19] « Chapitre 3 : Transfert de chaleur par convection », dans *Cours de Transfert de Chaleur*, pp. 1-9. [En ligne].
- [20] B. Kharbouch, « Notes de cours : Transfert de chaleur, Partie : CONVECTION », polycopié de cours, Département de Physique, Faculté des Sciences, Université Abdelmalek Essaâdi, Tétouan, Maroc, Année Universitaire 2018/19.

- [21] « Chapitre 3 : Convection thermique », Polycopié de cours, Département génie des procédés, ISET Kélibia, Tunisie, Année Universitaire 2015/2016, pp. 30-41.
- [22] « Convection | Definition, Examples, Types, & Facts | Britannica ». Consulté le: 16 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.britannica.com/science/convection>
- [23] « Convection - 2011 - Aide de SOLIDWORKS Design ». Consulté le: 16 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://help.solidworks.com/2011/french/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/AnalysisBackground/ThermalAnalysis/Convection_Topics/IDH_Analysis_Background_Convection.html
- [24] Sustainable Energy Science and Engineering Center. (n.d.). Solar Radiation [Cours universitaire]. Florida State University. Récupéré le 18 mai 2026 sur <https://esc.fsu.edu/documents/lectures/ECSI/SolarRadiation.pdf>
- [25] Jandaghian, Z.; Lacasse, M.; Gaur, A. (2025). Solar Reflectance Index of Building Envelope Materials: A Comparative Review of North American and European Standards and Long-Term Performance. *Buildings*, 15(6), 888. DOI: [10.3390/buildings15060888](https://doi.org/10.3390/buildings15060888)
- [26] Chrzanowski, K. (2024). Review of Thermal Imaging Technology. INFRAMET, Poland. Disponible sur : <https://www.inframet.com/Literature/Review-thermal-imaging-technology-2024.pdf>
- [27] Yovanovich, M. M. (n.d.). Radiation Laws. In ECE 309: Thermal Engineering, University of Waterloo, Microelectronics Heat Transfer Laboratory. Récupéré le 18 mai 2026, à l'adresse https://www.mhtlab.uwaterloo.ca/courses_old/ece309/notes/radiation/radlaw.pdf
- [28] Neotech Coatings. (2022). Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces (According to ASTM E1980). Disponible sur : <https://neotechcoatings.com/wp-content/uploads/2022/08/ASTM-E-1980.pdf>
- [29] Torres, C. E. (2020, 5 novembre). *Fundamentals of infrared thermography*. Power-MI. <https://power-mi.com/content/fundamentals-infrared-thermography>

ملخص

الهدف من هذا العمل هو إجراء تقييم مقارن للأداء الحراري لمختلف الدهانات والطلاءات المطبقة على ملاط الإسمنت في إطار تحسين الكفاءة الطاقوية للمباني. ولإعادة إنتاج ظروف التعرض الشمسي بشكل مضبوط، تم تطوير جهاز تجريبي يعتمد على الإشعاع الاصطناعي داخل مخبر الطاقوية والحرارة التطبيقية بجامعة تلمسان. وقد تم قياس درجات حرارة أسطح العينات أنياً باستعمال المزدوجات الحرارية (Thermocouples) ، مع استكمال ذلك بقياسات التدفقات الإشعاعية وتحليل الصور الحرارية بواسطة كاميرا حرارية.

أظهرت النتائج التجريبية وجود تباين واضح في أداء المعالجات السطحية المختلفة. فقد حققت الطلاءات والدهانات البيضاء أفضل أداء حراري بفضل قدرتها على عكس جزء كبير من الإشعاع الساقط، مما ساهم في خفض درجة حرارة سطح الجدار بمقدار يتراوح بين 4 و 10 درجات مئوية، مع توفير كفاءة تبريد سلبية ممتازة تجاوزت 30٪ مقارنة بملاط الإسمنت غير المطلي المعتمد كمرجع. وعلى العكس من ذلك، أدى الطلاء الأسود إلى امتصاص كمية كبيرة من الحرارة، مما أثر سلباً على التوازن الحراري. وتبرز هذه الدراسة أن استخدام الطلاءات العاكسة، ولا سيما مسحوق الرخام وطلاء الباكسالوميني (Paxaluminé) ، يمثل استراتيجية سلبية بسيطة وفعالة للحد من ظاهرة ارتفاع الحرارة وتحسين الكفاءة الطاقوية لغلاف المباني.

الكلمات المفتاحية: التجديد الطاقوي، الطلاءات العاكسة، ملاط الإسمنت، الإشعاع الاصطناعي، التصوير الحراري بالأشعة تحت الحمراء، التبريد السلبي، الكفاءة الحرارية.

Abstract

The objective of this study is to comparatively evaluate the thermal performance of various paints and coatings applied to cement mortar for building energy retrofitting applications. To reproduce controlled solar exposure conditions, an experimental setup using artificial radiation was developed in the Applied Energy and Thermal Engineering Laboratory of the University of Tlemcen. Real-time surface temperature measurements of the specimens were carried out using thermocouples, complemented by radiative heat flux measurements and thermal imaging analysis.

The experimental results reveal a clear distinction between the performance of the different surface treatments. White coatings and paints exhibited the best thermal behavior by reflecting a significant portion of the incident radiation, thereby reducing wall surface temperatures by 4 to 10 °C and providing excellent passive cooling efficiency exceeding 30% compared with uncoated cement mortar used as the reference material. In contrast, black paint absorbed a large amount of heat and negatively affected the thermal balance. The findings demonstrate that the integration of reflective coatings, particularly marble powder and Paxaluminé, represents a simple and effective passive strategy for mitigating overheating and enhancing the energy efficiency of building envelopes.

Keywords: Energy renovation, Reflective coatings, Cement mortar, Artificial radiation, Infrared thermography, Passive cooling, Thermal efficiency.

Résumé

L'objectif de ce travail consiste à évaluer de manière comparative les performances thermiques de différentes peintures et revêtements appliqués sur du mortier de ciment pour la rénovation énergétique des bâtiments. Afin de reproduire les conditions d'ensoleillement contrôlées, un dispositif expérimental sous rayonnement artificiel a été adapté en laboratoire (Énergétique et thermique appliquée) de l'Université de Tlemcen. L'acquisition en temps réel des températures de surface des échantillons a été effectuée à l'aide de thermocouples, complétée par des mesures de flux radiatifs et une analyse par caméra thermique. Les résultats expérimentaux mettent en évidence une distinction claire entre les performances des différents traitements. Les revêtements et peintures blancs dominent l'évaluation en réfléchissant une part importante du flux incident, ce qui permet de réduire considérablement la température de la paroi entre 4 et 10 °C et d'offrir une excellente efficacité de refroidissement passif supérieure à 30% par rapport au mortier nu sans revêtement pris comme référence. À l'inverse, la peinture noire absorbe la chaleur et dégrade le bilan thermique. Ce projet démontre ainsi que l'intégration de revêtements réfléchissants (poudre de marbre et paxaluminé) constitue une stratégie passive simple et efficace pour limiter la surchauffe et optimiser l'efficacité énergétique de l'enveloppe des bâtiments.

Mots clés : Rénovation énergétique, Peintures réfléchissantes, Mortier de ciment, Rayonnement artificiel, Thermographie infrarouge, Refroidissement passif, Efficacité thermique.