



Université de Constantine 3
Faculté d'Architecture et d'Urbanisme
Département d'Architecture

TEXTURE DE L'ENVELOPPE ET SON INFLUENCE SUR
LA PERFORMANCE ENERGETIQUE DU BATIMENT
DANS LE CLIMAT CHAUD ET ARIDE

THESE

Présentée pour l'Obtention du
Diplôme de Doctorat en Sciences
en Architecture Bioclimatique et environnement

Par
Islam BOUKHELKHAL

Année Universitaire
2021-2022



Université de Constantine 3
Faculté d'Architecture et d'Urbanisme
Département d'Architecture

N° de Série :

N° d'Ordre :

**TEXTURE DE L'ENVELOPPE ET SON INFLUENCE SUR
LA PERFORMANCE ENERGETIQUE DU BATIMENT
DANS LE CLIMAT CHAUD ET ARIDE**

THESE

Présentée pour l'Obtention du
Diplôme de Doctorat en Sciences
en Architecture Bioclimatique et environnement

Par

Islam BOUKHELKHAL

Sous la direction de :

Pr. BOURBIA Fatiha

Devant le Jury Composé de :

DERRADJI Mohamed	Président	Professeur	Université Constantine 3
BOURBIA Fatiha	Directeur	Professeur	Université Constantine 3
LOUAFI BELLARA Samira	Examineur	MCA	Université Constantine 3
MAZOUZ Said	Examineur	Professeur	Université d'Oum El Bouaghi
BENABBAS Moussadek	Examineur	Professeur	Université de Biskra
HAMOUDA Abida	Examineur	MCA	Université Batna 1

Année Universitaire

2021-2022

REMERCIEMENTS

Je voudrais en premier exprimer ma reconnaissance à ma directrice de thèse, madame le Professeur BOURBIA Fatiha, pour sa disponibilité et ses précieux conseils tout au long de ma formation. J'ai apprécié sa rigueur scientifique et ses qualités humaines indéniables.

Je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude à Monsieur Derradji Mohamed, Professeur à l'université de Constantine 3 pour avoir accepté de présider le jury de cette thèse. J'adresse mes vifs remerciements aussi à Madame LOUAFI BELLARA □Samira, Maitre de conférences à l'université de Constantine 3, Monsieur MAZOUZ Said, Professeur à l'université d'Oum El Bouaghi, Monsieur Benabbas Moussadek, Professeur à l'université de Biskra et Madame HAMOUDA Abida, Maitre de conférences à l'université de Batna 1, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'examiner ce travail.

Je remercie chaleureusement Professeur Shady Attia, directeur du laboratoire SBD LAB, à l'Université de Liège, pour ses précieuses contributions scientifiques. J'adresse aussi mes vifs remerciements à Madame Bouchahma yasmina et Madame Abdou Saliha, Professeurs à l'université de Constantine 3.

Mes plus sincères remerciements à Hadbaoui Hichem, Sotehi Walid, Lamine Mohamed, Benbacha Cherif, et tous ceux qui m'ont aidé de prêt ou de loin tout au long de ma formation.

DEDICACES

A mes parents pour leur amour et leur sacrifice.

A ma femme pour son amour et son soutien indéfectible.

A mon frère, mes sœurs, et tous ceux qui me sont chers.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	iv
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xii
LISTE DES ABREVIATIONS	xiii
RESUME	iv
INTRODUCTION GENERALE	1
Introduction	1
Problématique	2
Hypothèses	3
Objectifs	4
Méthodologie.....	4
Structure de la thèse.....	5
CHAPITRE I	
LE REVETEMENT EXTERIEUR ET SON ROLE DANS LE BATIMENT	
Introduction	7
1. Définition du revêtement extérieur dans le bâtiment.....	8
1.1. Concepts liés au revêtement extérieur.....	8
1.2. Aperçu historique sur le revêtement et ses matériaux de construction	8
2. Types de revêtement extérieur.....	10
2.1. Le revêtement en enduit	10
2.2. Le revêtement en bardage	11
2.3. Le revêtement ventilé.....	12
2.4. Le revêtement en parement	14
2.5. Le revêtement en végétation	14
3. Rôle et fonction du revêtement extérieur	15
3.1. Effet de protection contre les intempéries.....	16
3.2. Effet de protection contre les chocs	16
3.3. Effet esthétique.....	16
3.4. Effet d'isolation thermique et d'optimisation du confort thermique.....	17
3.5. Effet d'isolation acoustique.....	17
3.6. Effet écologique	18
4. Le revêtement extérieur dans le grand Sud d'Algérie	19
4.1. Contexte climatique et architectural de la région Sud de l'Algérie.....	19

4.2. Classification des revêtements extérieurs en Algérie.....	21
4.2.1. Selon les matériaux de construction.....	22
4.2.2. Selon la morphologie	24
4.2.3. Selon la couleur.....	26
4.3. Préservation et valorisation du revêtement extérieur en tant que patrimoine architectural...	27
Conclusion.....	28

CHAPITRE II

NOTIONS ET NORMES DE TRANSFERT DE CHALEUR

Introduction	30
1. Caractéristiques des zones climatiques dans le Sud de l'Algérie.....	31
1.1. La température de l'air.....	32
1.2. Le rayonnement solaire.....	33
1.2.1. Rayonnement solaire direct.....	33
1.2.2. Rayonnement solaire diffus.....	33
1.2.3. Rayonnement solaire réfléchi.....	34
1.3. L'humidité relative.....	36
1.4. La température moyenne radiante.....	38
1.5. Le vent.....	38
1.6. Précipitation et aridité.....	39
1.7. Efficacité énergétique du bâtiment dans le Sud de l'Algérie	40
2. Confort thermique dans le bâtiment	40
2.1. Définition	40
2.2. Notions d'évaluation du confort thermique dans le bâtiment	41
2.2.1. Indices thermiques empirique	42
2.2.2. Indices psycho-socio-climatiques.....	43
2.2.3. Indices de l'équation du bilan énergétique	43
2.2.4. Indices de l'équation du bilan thermique.....	43
3. Concepts sur le transfert de chaleurs dans le mur	46
3.1. Les différents modes de transfert de chaleurs dans le mur.....	46
3.1.1. Le transfert par conduction.....	46
3.1.2. Le transfert par convection.....	47
3.1.3. Le transfert par rayonnement	47
3.2. Le coefficient de transmission thermique (U -value).....	48
3.3. La résistance thermique (R -value)	48
3.4. La densité du flux thermique Q.....	48
3.5. Le coefficient de transfert thermique par rayonnement hr	49

3.6. Le coefficient de transfert thermique par convection hc	50
4. Protocoles de mesure et standards internationaux de transfert de chaleur pour l'enveloppe du bâtiment	50
4.1. La norme ISO 9869-1.....	51
4.1.1. Méthode moyenne	52
4.1.2. Méthode dynamique :.....	53
4.2. La norme ASTM C 1155-95	54
4.2.1. Méthode de sommation	54
4.2.2 Méthode de la somme des moindres carrés.....	55
4.3. Dispositifs de mesure du transfert de chaleur pour l'enveloppe du bâtiment.....	56
5. Protocoles de mesures du transfert d'humidité pour l'enveloppe du bâtiment.....	58
5.1. La méthode gravimétrique	58
5.2. Dispositifs de mesure du transfert d'humidité dans le mur.....	60
Conclusion.....	60

CHAPITRE III

ETUDES EXPERIMENTALES ET NUMERIQUES SUR L'ENVELOPPE EXTERIEUR DU BATIMENT (ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE)

Introduction	62
1. Les revêtements extérieurs	63
2. Auto-ombrage du revêtement extérieur.....	66
3. Albédo du revêtement extérieur	70
4. Enveloppe intelligente	72
5. Particules des matériaux	75
6. Couvert végétal de l'enveloppe du bâtiment.....	78
7. Synthèse récapitulative.....	81
8. Mesures in-situ et normes de transfert de chaleur dans l'enveloppe extérieure.....	83
9. Mesures in-situ de transfert d'humidité dans l'enveloppe extérieure	87
Conclusion.....	88

CHAPITRE IV

COMPORTEMENT THERMIQUE DES TEXTURES DU REVETEMENT EXTERIEUR

Introduction	90
1. Objectif de l'étude expérimentale.....	91
2. Situation et contexte climatique de Constantine.....	91
3. Méthodologies de l'étude expérimentale.....	93
3.1. Description du protocole expérimental	94
3.1.1. Première phase expérimentale (été 2019)	94

3.1.2.	Deuxième phase expérimentale (été 2020).....	100
3.2.	Choix des instruments du relevé de mesures.....	103
3.2.1.	Caméra thermique type (FLIR).....	104
3.2.2.	Multimètre à sonde connectable type (TESTO 925).....	104
3.2.3.	Pyranomètre (S-LIB-M003) avec un Data logger (HOBO H21 USB)	105
3.2.4.	Station météo type (Oregon Scientific).....	106
3.3.	Choix des périodes des relevés de mesures.....	107
4.	Interprétation et discussion des résultats	108
4.1.	Effet de la géométrie de la texture sur la température de surface	108
4.2.	Effet des particules de texture sur la température de surface	118
5.	Synthèse.....	119
5.1.	Profondeur de la texture	119
5.2.	Organisation, disposition et assemblage de la texture.....	119
5.3.	Épaisseur de la texture.....	120
5.4.	Composantes de la texture.....	120
	Conclusion.....	120

CHAPITRE V

EFFET DE LA TEXTURE DU REVETEMENT EXTERIEUR SUR LE TRANSFERT DE CHALEUR ET LE CONFORT THERMIQUE INTERIEUR

	Introduction	122
1.	Objectif de l'étude expérimentale.....	123
2.	Étapes de modélisation des cellules expérimentales	123
2.1.	Description du protocole expérimental	123
2.2.	Choix des matériaux de construction	132
3.	Méthodologie de l'étude expérimentale	132
3.1.	Méthodologie suivie pour le calcul des paramètres de mesure	134
3.1.1.	Calcul de R_{value}	134
3.1.2.	Calcul de la température opérative Top	135
4.	Configuration de la série de mesure	136
4.1.	Choix de l'instrumentation.....	136
4.1.1.	Anémomètre multifonction type TESTO 480.....	136
4.1.2.	Thermocouple Data logger type HOBO U12-012.....	137
4.1.3.	Sonde globe de type TESTO 0602 0743 avec un Data logger type TESTO IAQ.....	137
4.2.	Calibrage des instruments de mesure	141
4.3.	Choix des périodes de relevés de mesures	141
5.	Résultats et discussions	141

5.1. Texture lisse -Cellule de référence-.....	147
5.2. Texture rugueuse -Cellule Expérimentale 1	147
5.3. Texture en cristal -Cellule Expérimentale 2.....	148
6. Synthèse et comparaison des résultats.....	148
Conclusion.....	150
CONCLUSION GENERALE.....	152
BIBLIOGRAPHIE	158
ANNEXES	155
ANNEXE A	165
(Voir la version complète de la Norme ISO 9869-1:2014 sur DVD).....	165
ANNEXE B.....	168
Spécifications et détails des appareils de mesure.....	168
ANNEXE C.....	171
Données climatiques de Constantine.....	171
ANNEXE D	173
Articles publié	173

LISTE DES FIGURES

Figure 1. 1 : Quelques matériaux de construction utilisés dans le revêtement	9
Figure 1. 2 : Exemple de revêtement extérieur sous forme d'enduit en mortier de ciment.	10
Figure 1. 3 : Exemples de revêtements en bardage de différents matériaux	12
Figure 1. 4 : Exemple de revêtement ventilé en Algérie	13
Figure 1. 5 : Principe de fonctionnement du revêtement ventilé.....	13
Figure 1. 6 : Exemple de revêtement en parement naturel et artificiel	14
Figure 1. 7 : Exemples de revêtement végétal en France.....	15
Figure 1. 8 : Différents exemples d'un revêtement décoratif.....	17
Figure 1. 9 : Revêtement extérieur par le liège utilisé pour l'isolement sonore.....	18
Figure 1. 10 : Différence entre un tissu traditionnel et un tissu moderne	20
Figure 1. 11 : Différence entre un revêtement traditionnel et un autre moderne dans le Sud algérien	20
Figure 1. 12 : Revêtement extérieur sous forme de plaques de pierre naturelle.	22
Figure 1. 13 : Les matériaux utilisés dans la composition des revêtements extérieurs à Ghardaïa. 23	23
Figure 1. 14 : Les matériaux utilisés dans la composition des revêtements extérieurs à Taghit....	24
Figure 1. 15 : Application du revêtement à main nue afin de profiter de ces traces, à Ghardaïa....	25
Figure 1. 16 : Application du revêtement extérieur par de petites boules en argile à Timimoun ...	26
Figure 1. 17 : Différentes couleurs utilisées dans les revêtements extérieurs au Sud algérien	27
Figure 2. 1 : Zones climatiques d'été et d'hiver en Algérie	31
Figure 2. 2 : Température moyenne mensuelle de l'air dans la région de Bechar 1997-2008.....	32
Figure 2. 3 : Types de rayonnements solaires reçus par le bâtiment.....	34
Figure 2. 4 : Diffusion du flux solaire reçu par un revêtement extérieur de bâtiment	35
Figure 2. 5 : Radiation solaire globale dans la région de Béchar 1997-2008.....	36
Figure 2. 6 : Humidité relative moyenne dans la région de Béchar 1997-2008.....	37
Figure 2. 7 : Rose des vents de Bou Saada.....	39
Figure 2. 8 : Sensation de confort et équilibre thermique entre le corps humain.....	41
Figure 2. 9 : Zone de confort thermique D'après Olgyay	42
Figure 2. 10 : Graphique du pourcentage de l'indice PPD calculé en fonction du PMV.....	44
Figure 2. 11 : Capteur de la température de globe avec une thermistance à l'intérieur.....	45
Figure 2. 12 : Température Opérative optimale selon l'habillement et le métabolisme	46
Figure 2. 13 : Différents modes de transfert de chaleur à travers un revêtement extérieur.....	47
Figure 2. 14 : Densité du flux de chaleur traversant un revêtement extérieur.	49
Figure 2. 15 : Principe de fonctionnement de la méthode du débitmètre thermique.....	51
Figure 2. 16 : Dispositifs de mesure du transfert de chaleur dans le mur.	57
Figure 2. 17 : Dispositifs de mesure du transfert d'humidité dans le mur.	58
Figure 2. 18 : Exemple de prélèvement d'un échantillon de paroi.....	59
Figure 2. 19 : Four pour le séchage des échantillons de la paroi à 105 °c.	60
Figure 3. 1 : Images thermiques élaborée par Peeks et Badarnah sur des textures de revêtement de différentes profondeurs et rugosités	63
Figure 3. 2 : Le nouveau revêtement à base d'aérogel proposé par Ibrahim et al	65
Figure 3. 3 : Les motifs géométriques inspirés de la nature, proposés par Merhan	67
Figure 3. 4 : Deux variantes de conception proposées par Capeluto pour la façade sud	68
Figure 3. 5 : Configuration des variables du modèle d'auto-ombrage proposé par Liu et al	69

Figure 3. 6 : Comparaison entre les températures surfaciques intérieures des trois couleurs du revêtement extérieur appliquées par Mansouri et al.....	70
Figure 3. 7 : Température surfacique du cas d'étude simulé par Benbacha et al. avant et après intégration de l'enveloppe dynamique	73
Figure 3. 8 : Revêtement composite à base de SEBS avec un tissu de fibres de carbone, proposé par Rodonò et al	74
Figure 3. 9 : Particules de palmier de différentes tailles, proposé par Benmansour et al.....	76
Figure 3. 10 : Agrégats naturels et à base de caoutchouc proposés par Záleská et al.	77
Figure 3. 11 : Box de mesures avec différentes densités végétales,.....	79
Figure 3. 12 : Huit couverts végétaux testés par Wong et al.....	79
Figure 3. 13 : Protocole de mesure des cellules expérimentales proposé par Zhang et al.	80
Figure 3. 14 : Mesures in-situ basées sur la norme ISO 9869 pour les côtés Nord et Est testés par Ahmad et al.	86
Figure 3. 15 : Méthode de mesure de deux côtés intérieur-extérieur, proposée par Rasooli pour la température surfacique et le flux de chaleur	87
Figure 4. 1 : Diagramme psychrométrique de Constantine.....	92
Figure 4. 2 : Étude du cadre conceptuel.....	93
Figure 4. 3 : Choix des matériaux des boxes de mesures.....	94
Figure 4. 4 : Réalisation des boxes de mesures.....	95
Figure 4. 5 : Description et détail de la texture rugueuse.....	96
Figure 4. 6 : Description et détail de la texture en lame.....	97
Figure 4. 7 : Description et détail de la texture en cristal.....	98
Figure 4. 8 : Finalisation des textures sélectionnées pour les mesures de température de surface .	99
Figure 4. 9 : Évaluation du comportement thermique du granulat testé.	100
Figure 4. 10 : Comparaison du comportement thermique des trois agrégats sélectionnés.....	101
Figure 4. 11 : Valeurs de température surfacique des trois échantillons.....	102
Figure 4. 12 : Préparation de la texture rugueuse du revêtement extérieur avec des particules de palmier.....	102
Figure 4. 13 : Texture rugueuse avec différentes concentrations d'agrégats de particules de palmier	103
Figure 4. 14 : Caméra thermique type FLIR	104
Figure 4. 15 : Multimètre à sonde connectable type TESTO 925	105
Figure 4. 16 : Pyranomètre S-LIB-M003 avec un Data logger HOBO H21 USB	106
Figure 4. 17 : Station météo type Oregon Scientific	106
Figure 4. 18 : Température surfacique extérieure de l'orientation sud à 9h00.	108
Figure 4. 19 : Température surfacique extérieure de l'orientation sud à midi.....	109
Figure 4. 20 : Température surfacique extérieure de l'orientation sud à 15h00.	109
Figure 4. 21 : Température surfacique extérieure de l'orientation sud à 18h00.	110
Figure 4. 22 : Diagramme de la température surfacique extérieure de la façade nord.....	110
Figure 4. 23 : Diagramme de la température surfacique extérieure de la façade est.....	111
Figure 4. 24 : Diagramme de la température surfacique extérieure de la façade sud.....	111
Figure 4. 25 : Diagramme de la température surfacique extérieure de la façade ouest.....	112
Figure 4. 26 : Diagramme de la température surfacique moyenne (nord-est-sud-ouest).	112
Figure 4. 27 : Rapport de corrélation entre la température surfacique extérieure (Est) et la fraction d'ombre (SF).....	116
Figure 4. 28 : Température surfacique extérieure à midi, comparée au pourcentage de (SF) pour l'orientation sud..	116

Figure 4. 29 : Température de surface externe pour toutes les orientations.....	117
Figure 4. 30 : Température surfacique extérieure de la texture rugueuse avec différentes concentrations de particules (0%, 30%, 70 %).....	118
Figure 5. 1 : Terrain de réalisation de l'étude expérimentale.....	124
Figure 5. 2 : Construction des cellules expérimentales.....	125
Figure 5. 3 : Construction du plancher des cellules expérimentales	125
Figure 5. 4 : Pose et coulage de la plate-forme des cellules expérimentales.....	126
Figure 5. 5 : Travaux de maçonnerie de la salle tampon des cellules	126
Figure 5. 6 : Construction du toit des cellules expérimentales en béton.....	127
Figure 5. 7 : Réalisation et mise en œuvre des textures d'études.....	127
Figure 5. 8 : Types de texture étudiés en finition.....	128
Figure 5. 9 : Mise en place de l'isolation de la salle tampon.	129
Figure 5. 10 : Mise en place d'isolation du toit de la salle tampon.....	129
Figure 5. 11 : Séparation et isolation des cellules par des panneaux de polystyrène et confection des joints avec la mousse du Polyuréthane	130
Figure 5. 12 : Plan du système expérimental -vue en plan-	131
Figure 5. 13 : Coupe du système expérimental -vue en coupe-	131
Figure 5. 14 : Étude du cadre conceptuel.....	133
Figure 5. 15 : Anémomètre multifonction type TESTO 480	136
Figure 5. 16 : Thermocouple Data logger type HOBO U12-012.....	137
Figure 5. 17 : Sonde TESTO 06020743 - Data logger TESTO IAQ	138
Figure 5. 18 : Installation intérieure des instruments de mesure.....	138
Figure 5. 19 : Installation extérieure de la station météo	139
Figure 5. 20 : Détail de l'installation des instruments de mesures -vue en plan-.....	140
Figure 5. 21 : Installation extérieure des instruments de mesures.....	140
Figure 5. 22 : Température de l'air entre le 23 et le 30 juin 2020	142
Figure 5. 23 : Température à globe entre le 23 et le 30 juin 2020	142
Figure 5. 24 : Température surfacique extérieure entre le 23 et le 30 juin 2020.....	143
Figure 5. 25 : Température surfacique intérieure entre le 23 et le 30 juin 2020	143
Figure 5. 26 : Flux de chaleur calculé à travers le mur intérieur entre le 23 et le 30 juin 2020....	144
Figure 5. 27 : Diagramme chronologique de la valeur Rc de la cellule de référence pour la période de surveillance du 23 au 30 juin 2020.....	145
Figure 5. 28 : Diagramme chronologique de la valeur Rc de la cellule expérimentale 1 pour la période de surveillance du 23 au 30 juin 2020.....	145
Figure 5. 29 : Diagramme chronologique de la valeur Rc de la cellule expérimentale 2 pour la période de surveillance du 23 au 30 juin 2020.....	146
Figure 5. 30 : Comparaison de la valeur Rc-Average des 03 cellules expérimentales pour la période de surveillance du 23 au 30 juin 2020.....	146
Figure 5. 31 : Température opérative entre le 23 et le 30 juin 2020	149

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2. 1 : Echelle de sensation thermique selon l'indice PMV.....	44
Tableau 2. 2: Paramètres de rugosité des surfaces dans le modèle de McAdams.....	50
Tableau 3. 1 : Récapitulatif d'état de l'art des stratégies étudiées.....	82
Tableau 4. 1 : Résultats enregistrés par la station météorologique Oregon Scientific :.....	107
Tableau 4. 2 : Températures de surface externe pour toutes les orientations répertoriées.....	114
Tableau 4. 3 : Rapport entre les surfaces ombragées et ensoleillées pour toutes les orientations (nord, est, sud, ouest).	115

LISTE DES ABREVIATIONS

Désignation : Description	unité
STB : Cellule de texture lisse	
RTB : Cellule de texture rugueuse	
CTB : Cellule de texture cristalline	
BTB : Cellule de texture en lame	
RTB₁ : RTB avec 30% de particule de palmier	
RTB₂ : RTB avec 70% de particule de palmier	
T_a : Température de l'air	(°c ou k)
T_{si} : Température de surface intérieure	(°c ou k)
T_{se} : Température de surface extérieure	(°c ou k)
T_g : Température du globe	(°c ou k)
T_r : Température radiante moyenne	(°c ou k)
T_{op} : Température opérative	(°c)
S_r : Rayonnement solaire	(w/m ²)
SF : Fraction de l'ombre	
R_{value} : Résistance thermique	(m ² KW-1)
Rc-in : Résistance thermique intérieure	(m ² KW-1)
Rc-out : Résistance thermique extérieure	(m ² KW-1)
Rc-ave : Résistance thermique moyenne	(m ² KW-1)
q : Densité du flux thermique	(w/m ²)
E : Emittance spatiale	
hr : Coefficient de transmission thermique par rayonnement	
hc : Coefficient de transmission thermique par convection	
σ : Constante de Stefan-Boltzmann	
g : Émittance ondes longues (0,95)	
D : Diamètre du globe (0,15m)	

RESUME

La présente recherche aborde la question de l'efficacité de la texture des revêtements extérieurs dans le bâtiment en tant que procédé de rafraîchissement passif sous un climat chaud et aride. Elle vise l'évaluation des performances thermiques et énergétiques des façades avec différentes textures de revêtements extérieurs par le biais de l'étude expérimentale. Les différents modèles choisis de texture sont inspirés de l'architecture traditionnelle dans le grand Sud de l'Algérie, qui présente une identité architecturale pour chaque région. Les modèles choisis sont considérés comme l'une des solutions les plus utiles pour le refroidissement des bâtiments en été, et constituent aussi une alternative au refroidissement passif dans les régions du Sud de l'Algérie.

Pour cela, ce travail a été basé sur deux volets expérimentaux. Premièrement, des mesures in-situ en compagnie d'une étude de la température de surface, en utilisant l'imagerie thermique, afin d'évaluer le comportement thermique de la texture de l'enveloppe extérieure. Cette phase est complétée par une approche similaire, en explorant l'effet de trois types de particules ayant le même aspect mais avec des caractéristiques thermiques différentes. Par conséquent, l'intégration des particules de palmier dans les façades texturées, peut contribuer à la diminution de la température surfacique extérieure. Ce travail a été poursuivi par l'exploration de l'effet des textures évaluées dans l'étude expérimentale initiale, sur le confort thermique intérieur et le transfert de chaleur par le moyen des chambres expérimentales. Cette deuxième phase de l'étude expérimentale vise à étudier l'effet des textures déjà testées dans la première phase expérimentale au moyen de normes et standards internationaux tels que la norme ISO 9869- 2014.

Les résultats indiquent une crédibilité et une relation significative entre la géométrie de la texture, le pourcentage d'ombre projetée, la température de surface extérieure, le transfert de chaleur à travers l'enveloppe texturée et le confort thermique intérieur. Les résultats expérimentaux ont révélé que l'adoption de la texture du revêtement extérieur dans la façade, à travers ses variables, est capable de limiter les surchauffes, réduire les gains de chaleur et la température surfacique extérieure. Elle peut donc avoir un effet thermique positif pour les bâtiments sous climat chaud et aride durant la période estivale. A travers l'évaluation de la résistance thermique et la température opérative, les résultats ont indiqué une corrélation entre la texture, la température surfacique extérieur, la température opérative et la résistance thermique de la paroi. Ce qui prouve et met en évidence l'évaluation proposée par la norme internationale ISO 9869- :2014 sur la texture de l'enveloppe extérieur.

Cette étude fournit une feuille de route et permet d'établir des lignes directrices et des recommandations sur la texture du revêtement extérieur, qui s'avère l'une des solutions les plus utiles, en intégrant la notion d'efficacité énergétique dans la conception des enveloppes extérieures des bâtiments. La synthèse de cette étude pourrait être utilisée par les architectes, les constructeurs et les concepteurs.

Mots clés :

Texture du revêtement ; Température de surface ; Radiation solaire ; Ombre ; Particules de palmier ; Confort thermique ; Norme ISO 9869- 2014.

ABSTRACT

The building envelope is the barrier between the interior and exterior environments, its first role is shielding the indoor space from the outer climatic variations through its envelope materials and design elements, to reduce energy consumption and improve indoor thermal comfort. External wall coating in addition to their aesthetic appearance, their texture and cladding material might be also used to improve the walls' performance and how to specify it to meet these requirements for optimal energy performance and design efficiency providing eco-friendly surroundings.

This research discusses the thermal behavior of the exterior walls with different coating textures inspired by traditional architecture in the great south desert of Algeria, which used self-shading wall as a cooling strategy for diminishing the intensity of incoming long wave radiation and lowering the external surface temperature. The research work aims to evaluate the thermal and energy performance of wall facades with different exterior coating textures through the site experimental study. The models chosen for the investigation are selected based on the most used traditional wall coating texture for cooling buildings. The models chosen are considered to be one of the most useful solutions for cooling buildings in summer, and also constitute an alternative to passive cooling in the regions of southern Algeria.

For this, this work was based on two experimental sections. First, in-situ measurements together with a study of the surface temperature using thermal imaging, in order to assess the thermal behavior of the texture of the outer shell. This phase is completed by a similar approach, exploring the effect of three types of particles having the same appearance but with different thermal characteristics. Therefore, the integration of palm particles in the textured facades, can contribute to the reduction of the outdoor surface temperature. This work was continued by exploring the effect of the textures evaluated in the initial experimental study, on indoor thermal comfort and heat transfer through the experimental chambers. This second phase of the experimental study aims to study the effect of textures already tested in the first experimental phase by means of international standards and standards such as ISO 9869-2014.

The results indicate a credibility and significant relationship between the geometry of the exterior texture, the percentage of shadow cast, the exterior surface temperature, the heat transfer through the textured envelope and the interior thermal comfort. The experimental results revealed that the adoption of the texture of the exterior cladding in the facade, through its variables, is capable of limiting overheating, reducing heat gains and the exterior surface temperature. It can therefore have a positive thermal effect for buildings in hot and arid climates during the summer period. This study made it possible to establish guidelines and recommendations on the texture of the exterior cladding, which is proving to be one of the most useful solutions, by integrating the notion of energy efficiency in the design of the exterior envelopes of buildings. . Architects, builders and designers could use the synthesis of this study.

Key words:

Coating texture; Surface temperature; Solar radiation; Shadow ; Palm particles; Thermal comfort ; ISO 9869-2014 standard.

ملخص

يتناول هذا البحث مسألة فعالية نسيج الكسوة الخارجية في المباني كعملية تبريد سلبي في المناخات الحارة والجافة. يهدف إلى تقييم الأداء الحراري والطاقة للواجهات ذات القوام المختلف للكسوة الخارجية من خلال الدراسة التجريبية. نماذج النسيج المختلفة التي تم اختيارها مستوحاة من العمارة التقليدية في جنوب الجزائر الكبير، والتي تقدم هوية معمارية لكل منطقة. تعتبر النماذج المختارة من أكثر الحلول المفيدة لتبريد المباني في الصيف، كما أنها تشكل بديلاً للتبريد السلبي في مناطق جنوب الجزائر.

لهذا، استند هذا العمل إلى قسمين تجريبيين. أولاً، القياسات في الموقع جنباً إلى جنب مع دراسة درجة حرارة السطح باستخدام التصوير الحراري، من أجل تقييم السلوك الحراري لنسيج الغلاف الخارجي. يتم الانتهاء من هذه المرحلة من خلال نهج مماثل، لاستكشاف تأثير ثلاثة أنواع من الجسيمات التي لها نفس المظهر ولكن بخصائص حرارية مختلفة. لذلك، يمكن أن يساهم تكامل جزيئات النخيل في الواجهات المزخرفة في تقليل درجة حرارة السطح الخارجي. استمر هذا العمل من خلال استكشاف تأثير القوام الذي تم تقييمه في الدراسة التجريبية الأولية، على الراحة الحرارية الداخلية وانتقال الحرارة من خلال الغرف التجريبية. تهدف هذه المرحلة الثانية من الدراسة التجريبية إلى دراسة تأثير القوام الذي تم اختباره بالفعل في المرحلة التجريبية الأولى عن طريق المعايير والمعايير الدولية مثل ISO 9869-2014.

تشير النتائج إلى وجود مصداقية وعلاقة معنوية بين هندسة النسيج الخارجي ونسبة الظل المصبوب ودرجة حرارة السطح الخارجي وانتقال الحرارة عبر الغلاف المحكم والراحة الحرارية الداخلية. أظهرت النتائج التجريبية أن اعتماد نسيج الكسوة الخارجية للواجهة من خلال متغيراتها قادر على الحد من ارتفاع درجة الحرارة وتقليل مكاسب الحرارة ودرجة حرارة السطح الخارجي. لذلك يمكن أن يكون لها تأثير حراري إيجابي على المباني في المناخات الحارة والجافة خلال فترة الصيف. أتاحت هذه الدراسة وضع مبادئ توجيهية وتوصيات بشأن نسيج الكسوة الخارجية، والتي أثبتت أنها أحد الحلول الأكثر فائدة، من خلال دمج مفهوم كفاءة الطاقة في تصميم المغلفات الخارجية للمباني. يمكن استخدام توليف هذه الدراسة من قبل المهندسين المعماريين والبنائين والمصممين.

الكلمات المفتاحية:

نسيج الطلاء؛ الحرارة السطحية؛ اشعاع شمسي؛ ظل؛ جزيئات النخيل؛ الراحة الحرارية؛ معيار ISO 9869-2014.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction

Les facteurs environnementaux entourant l'être humain sont considérés comme les causes les plus importantes des maladies. Il faut noter que les efforts physiques et intellectuels sont directement liés aux facteurs environnementaux et au climat, en particulier les conditions climatiques inappropriées, car ils affectent directement l'individu et la société. Cette dernière est devenue essentiellement consumériste, notamment dans le domaine de l'énergie. Le secteur résidentiel dépense plus de 41 % de la consommation totale de l'Etat algérien (Sonatrach, 2013) qui endure de récentes crises économiques.

Cette consommation excessive dans le secteur du logement possède un impact important sur l'économie du pays en premier lieu, et sur l'environnement et la santé de la population. Cependant, les concepteurs doivent mettre au point des solutions afin d'assurer le confort intérieur des résidents sans pour autant avoir une consommation d'énergie excessive, car l'objectif de l'architecture est de rechercher tout d'abord l'intégration maximale avec le climat, sans négliger l'aspect formel et physique (Ravéreau, 1981).

L'enveloppe du bâtiment est également le lien entre l'environnement naturel extérieur et l'environnement bâti, elle peut être exploitée à travers ses matériaux et éléments de conception pour réduire la consommation d'énergie et améliorer le confort thermique intérieur. Plusieurs études à travers le monde ont montré que cet élément du bâtiment peut affecter le confort thermique interne à travers plusieurs stratégies telles que le matériau de construction, sa couleur, sa forme, sa position, sa composition ou encore sa texture.

Le Grand Sud algérien se caractérise par un riche patrimoine architectural et urbain qui se confond avec un mode de vie basé sur la protection contre les conditions climatiques telles que les fortes chaleurs et la radiation solaire en période estivale (Mefiteh, 2008). Il faut noter qu'il existe plusieurs styles architecturaux des bâtiments sahariens selon les régions, la plupart d'entre eux sont considérés comme un patrimoine architectural protégé (Unesco, 2021). La stratégie mise en place par les ancêtres était basée sur la protection du bâtiment contre les conditions climatiques en habillant l'enveloppe extérieure du bâtiment. Cette enveloppe décorative traditionnelle utilisée par ces anciens bâtisseurs dans le Sud algérien peut jouer un rôle afin d'améliorer l'efficacité énergétique du bâtiment (Ravéreau, 1981). Ces stratégies aident les architectes et les constructeurs à améliorer le confort thermique

des bâtiments dans ces zones tout en respectant la valeur culturelle et historique du patrimoine bâti.

Problématique

Le climat et les changements qui s'y produisent sont parmi les problèmes les plus importants de notre époque en raison des vagues de chaleur, de la montée des eaux de la mer, des tempêtes et des incendies, à cause desquels des centaines de milliers de personnes meurent chaque année. Dans le secteur de la construction énergivore (30 % à 40 % de la consommation énergétique mondiale) les ingénieurs pourraient économiser une part importante de cette énergie si des stratégies réfléchies étaient mises en place, à la fois à l'intérieur, à l'extérieur du bâtiment, et surtout dans l'enceinte entre eux.

Les chercheurs ont développé plus de 10 000 composants chimiques, mais en parallèle un déficit énorme en matière d'informations se manifeste sur l'évaluation sanitaire de ces produits chimiques, dont une grande partie est utilisée dans la production des matériaux de construction. Par exemple, le béton de ciment Portland, qui est le matériau le plus utilisé dans le monde entier (10 000 Mt/an qui augmenteront de 100 % dans les 40 prochaines années) contient des produits chimiques utilisés pour modifier ses propriétés. Ces produits ont des impacts nocifs importants sur la santé et l'environnement, qui n'ont pas encore été saisis (Pacheco, 2016). Aujourd'hui, les architectes et les urbanistes travaillent afin de réduire l'utilisation d'énergies fossiles et de produits chimiques nocifs pour la santé humaine et l'environnement, tels que l'éclairage électrique et la climatisation, et de relancer des solutions de conception passive afin d'atténuer le réchauffement climatique. Parmi ces aboutissements, l'application des solutions sur l'enveloppe du bâtiment, et plus précisément le revêtement extérieur qui permet d'éliminer les effets indésirables et d'améliorer l'efficacité énergétique du bâtiment et le confort intérieur des habitants. Il est nécessaire de bien choisir le revêtement extérieur approprié, pour améliorer l'efficacité énergétique. Ce choix se décline en différentes classes (ardoise, carrelage, ciment, marbre, peinture) utilisés pour couvrir, renforcer, protéger ou décorer les murs extérieurs.

En Algérie, l'utilisation du revêtement extérieur comme élément décoratif apparaît dans un certain nombre de styles architecturaux traditionnels, notamment dans le grand Sud du désert algérien, caractérisé par un climat chaud et sec. Une revue de la littérature à travers le désert algérien montre une grande variation dans la texture des revêtements extérieurs

des bâtiments, ce qui marque une identité architecturale pour chaque région du Sahara algérien. Il faut citer également la texture du revêtement façonnée à main nue dans la vallée du M'Zab, à l'égard de la texture en forme de boules projetées sur le mur dans la région de Timimoune, ainsi que la texture en forme de cube d'argile dans la région de Taghit, et un autre type de texture en cristal de pierre dans la région du Hoggar. Aujourd'hui, ce qui se produit dans le Sahara en matière d'architecture, n'a pas su conserver l'originalité du passé. Cela est dû surtout à l'arrivée et l'influence de nouveaux styles et matériaux coûtant moins cher et facile à appliquer par la main-d'œuvre, mais qui ne correspondent malheureusement pas au contexte d'origine de la région.

Les chercheurs ont mené de nombreuses recherches au sujet de l'effet de l'enveloppe extérieure sur le confort thermique du bâtiment au moyen de plusieurs stratégies telles que les matériaux de construction utilisés dans le revêtement extérieur, l'auto-ombrage, la végétation, la couleur, l'enveloppe intelligente, etc. Parmi ces méthodes, peut-on considérer la stratégie de la texture du revêtement extérieur qu'elle, soit rugueuse ou lisse, comme une solution affectant le comportement thermique et le confort thermique du bâtiment ? Les composants de cette texture ont-ils un rôle dans le changement du comportement thermique du revêtement extérieur ? Quel type de texture du revêtement extérieur pourrait gérer au mieux le confort thermique intérieur ? Quelles solutions peut-on introduire sur la texture de l'enveloppe du bâtiment pour obtenir une performance énergétique maximale ?

Hypothèses

La protection et la prévention contre la chaleur extrême et le soleil sont des conditions et des priorités de la vie et du bien-être de l'individu. Dans le grand Sud algérien, l'être humain couvre tout son corps avec des vêtements traditionnels qui l'aident à se protéger du rayonnement solaire pour un confort corporel maximal. A partir de ce principe, il est logique de supposer que couvrir le bâtiment par un revêtement extérieur, qu'il soit d'une texture lisse ou rugueuse, permet d'éviter l'exposition des façades à un ensoleillement intense et à des températures élevées, et de réduire la consommation irrationnelle de l'énergie. Sur la base de cette hypothèse centrale, le développement d'autres hypothèses a été effectué comme suit:

- 1- Le revêtement extérieur du bâtiment peut être utilisé, selon ses éléments de conception, pour réduire la consommation énergétique du bâtiment.
- 2- L'auto-ombrage du revêtement extérieur du bâtiment, par sa texture, peut changer la surface exposée au soleil, ce qui influe sur l'apport énergétique et la consommation à l'intérieur du bâtiment.
- 3- La texture du revêtement extérieur, à travers ses particules, peut fonctionner comme une couche protectrice pour augmenter le confort thermique intérieur et améliorer la durabilité des bâtiments.

Objectifs

La présente recherche s'inscrit dans le cadre de la préservation et de la valorisation du patrimoine bâti du Sud algérien, afin de contribuer au développement durable de ces régions caractérisées par un climat chaud et aride. L'objectif de cette approche est de développer la qualité, la durabilité et la performance énergétique du cadre bâti de la plus grande région climatique de l'Algérie, à travers l'élément de liaison entre l'espace extérieur et intérieur. Afin d'arriver à cet objectif, la recherche tente d'examiner et d'évaluer l'effet du revêtement extérieur avec des textures et des géométries différentes inspirées de la construction traditionnelle de la région, concernant le confort thermique et la performance énergétique du bâtiment. Elle a aussi pour objectif d'améliorer cette performance par l'optimisation de la texture à travers sa géométrie et sa composition afin de réduire le niveau de stress thermique tout en assurant le confort à l'intérieur du bâtiment. Et enfin, de mettre au point des lignes directrices et des recommandations destinées aux professionnels du métier afin qu'ils interviennent de manière à repenser, réutiliser et développer ces recommandations de façon passive et moderne.

Méthodologie

Afin d'arriver aux objectifs tracés dans cette étude, la méthodologie suivie a été effectuée sur la base d'un état de l'art de plusieurs principaux domaines qui ont un rapport avec la thématique de la recherche tels que la nature du revêtement extérieur, l'auto-ombrage, les couleurs de revêtement, les composants des revêtements, le revêtement intelligent et le revêtement végétal. Ensuite, il fallait passer en revue un état de l'art sur les différentes méthodes et calculs de la performance thermique de l'enveloppe extérieure, pour faire

ressortir les paramètres qui peuvent être utilisés dans la présente étude. Sur cette base, le travail expérimental a été réalisé selon la méthodologie suivante :

Au début, l'étude expérimentale consiste à évaluer le comportement thermique de la texture du revêtement extérieur à travers sa géométrie. A ce stade, le choix des échantillons expérimentaux est basé sur des box afin de voir le comportement thermique des différentes textures étudiées par rapport à différentes orientations.

En deuxième lieu, et sur la base des résultats de la 1^{er} phase, l'étude a porté sur l'effet de l'incorporation de particules naturelles dans les revêtements extérieurs (composants écologiques, organiques, déchets et produits de recyclage) toujours au niveau des box expérimentaux afin de voir le changement de comportement thermique par rapport à la texture étudiée.

Ensuite, et après avoir effectué une recherche bibliographique approfondie sur la thématique, le choix de mesure a porté sur une autre expérimentation avec des dimensions plus étendues et plus réelles, et cela après avoir procédé à une étude expérimentale au niveau des cellules (chambres) expérimentales permettant d'évaluer avec des normes internationales le transfert de chaleur, la performance énergétique et le niveau de confort thermique avec différents textures de revêtement extérieur. Cette méthode permet de déterminer quelles sont les meilleures textures de revêtements extérieurs afin de minimiser les besoins énergétiques en été et augmenter le confort à l'intérieur du bâtiment.

Structure de la thèse

Le travail présenté dans cette recherche s'organise autour de deux parties principales qui se complètent :

La première partie est théorique, elle introduit le domaine de recherche autour duquel la thématique de ce travail s'articule, c'est une synthèse des connaissances issues d'une analyse bibliographique. Cette partie est formée de trois chapitres : le premier est consacré aux concepts liés aux revêtements extérieurs et leur rôle dans le bâtiment, d'une manière générale, et en particulier le revêtement extérieur dans le grand Sud algérien. Le deuxième chapitre concerne la revue des notions générales et les normes internationales sur la thermique du bâtiment ainsi que le transfert de chaleur. Quant au troisième chapitre, il présente un état de l'art des travaux récents sur la thématique de notre recherche.

La deuxième partie est pratique, elle est partagée en deux chapitres expérimentaux, et entreprend dans le quatrième chapitre une campagne de mesures sur terrain, qui traite le comportement thermique de la texture du revêtement extérieur à travers plusieurs paramètres. Il est suivi par une autre étude sur des chambres expérimentales afin d'évaluer la performance énergétique et le flux thermique traversant la texture du revêtement extérieur, afin de voir l'impact de cette texture sur le confort thermique intérieur des cellules expérimentales, ce qui fera l'objet du cinquième chapitre. Enfin, une conclusion générale et des recommandations faisant la synthèse de la recherche développée dans cette thèse pour des recherches plus avancées dans le futur.

CHAPITRE I
LE REVETEMENT EXTERIEUR ET SON ROLE
DANS LE BATIMENT

Introduction

Depuis l'existence de l'homme, les métiers du bâtiment sont considérées comme les plus anciens, car la vie humaine représente un véritable défi face à diverses conditions climatiques allant des rayons solaires brûlants jusqu'aux diverses inondations et orages. Par conséquent, l'homme doit s'adapter à l'environnement, que ce soit un environnement physique tel que le climat et les reliefs, ou un environnement culturel tel que les habitudes et les traditions au sein des sociétés. Tous ces facteurs ont un impact direct sur le développement et la formation du style architectural déterminé par l'homme. La négligence de l'un de ces facteurs conduit sans aucun doute à un déséquilibre de l'aspect architectural tel qu'il existe à l'heure actuelle, en particulier dans les zones désertiques, d'où le constat que les constructeurs privilégient un seul facteur, tout en négligeant les autres facteurs climatiques et les conditions minimales de confort thermique. Tous ces problèmes conduisent à une inadaptation de l'œuvre architecturale à son environnement climatique et physique (Belakehal, 1995).

En Algérie, le secteur de l'habitat, notamment l'habitat individuel, est basé sur l'auto construction de bâtiments, où l'individu construit sa propre maison en choisissant lui-même les techniques de construction et les matériaux disponibles sur le site sans tenir compte de leur adaptation par rapport à l'environnement et au climat local dans lequel il vit (Donnadieu, 1977). Parmi les solutions efficaces proposées par les chercheurs figure le recours à l'aménagement de l'enveloppe du bâtiment (que ce soit au niveau des murs ou des toitures) et à son adaptation en fonction du climat et des conditions naturelles. Car cette enveloppe est le premier récepteur des différents facteurs et conditions climatiques externes telles que la radiation solaire, la forte chaleur, les pluies, etc. Parmi les éléments constituant cette enveloppe du bâtiment, on peut citer le revêtement extérieur, qui est l'élément le plus important dans l'enveloppe extérieure et qui a un lien direct avec l'ambiance extérieure du bâtiment.

Ce chapitre traite quelques concepts théoriques liés aux revêtements extérieurs du bâtiment, aux types de ces revêtements, en plus du rôle et de la fonction de chaque type de revêtement extérieur. Il aborde également les revêtements extérieurs dans le grand Sud algérien, qui est un facteur important de valorisation du patrimoine architectural de la région par ses formes et ses matériaux de construction.

1. Définition du revêtement extérieur dans le bâtiment

1.1. Concepts liés au revêtement extérieur

En général, le revêtement est le résultat du travail de couverture, de masquage, d'emballage. Ce concept est utilisé afin d'indiquer que cette couche est utilisée pour couvrir, protéger ou décorer un espace ou une surface spécifique. Pour la construction et le bâtiment, le revêtement extérieur fait partie intégrante de son enveloppe, c'est une couche constituée d'un matériau spécifique qui est choisi par le bâtisseur en fonction des objectifs à atteindre. Ce revêtement peut être utilisé pour protéger ou décorer un espace bâti (murs, plafond et sol). Il peut être constitué de plusieurs matériaux de construction, que ce soit de l'intérieur ou de l'extérieur (façade) de l'espace. Le choix des matériaux de revêtement extérieur devra être pertinent afin de pouvoir protéger le bâtiment. Les matériaux les plus courants sont le mortier de ciment, le plâtre, la terre cuite, le bois, etc.

Selon le Larousse, « *le revêtement en architecture et bâtiment, est une portion externe de garnir la surface d'une construction d'un placage ou d'une couche d'un matériau quelconque, pour protéger et/ou orner cette construction ; le matériau lui-même, l'effet qu'il produit. De tout temps, les murs extérieurs ou intérieurs des bâtiments sont habillés de plaques de pierre, de marbre ou de céramique, revêtus de bardeaux ou de clins pour les murs extérieurs, de mosaïque, d'enduits et de stucs, de lambris de bois pour les parois intérieures. L'industrie fournit aujourd'hui tout un choix de panneaux, bardages et vêtements préfabriqués* »

Selon le CNRTL (Centre National des Ressources Textuelles et Lexicales), « *le revêtement dans le bâtiment est un Élément de nature diverse, ardoise, brique, carrelage, ciment, enduit, marbre, plâtre, peinture, stuc... dont on recouvre les murs ou les parois d'une construction à l'extérieur ou à l'intérieur pour consolider, pour protéger ou pour orner* » (CNRTL, 2021).

1.2. Aperçu historique sur le revêtement et ses matériaux de construction

L'histoire de la construction est liée directement à la disponibilité des matériaux de construction en général. L'être humain a utilisé des matériaux de revêtement extérieur tels que l'argile, la chaux, la pierre naturelle, la terre crue. A travers l'Histoire, les matériaux de construction utilisés dans le revêtement diffèrent d'une région à l'autre. Par exemple, la terre crue a été utilisée surtout dans les zones arides et semi arides ; la pierre et la chaux

issue de la calcination des pierres, utilisées dans la région méditerranéenne telle que les civilisations grecque et romaine ; le bois était employé en Europe occidentale et en Scandinavie. Aujourd'hui, avec le développement de l'industrie du secteur du bâtiment. On assiste à un changement radical au niveau des matériaux utilisés pour le revêtement extérieur des bâtiments, avec l'introduction du verre et du fer, de l'aluminium, du PVC et surtout du mortier de ciment Portland qui est fortement utilisé dans le monde entier. Il existe aussi d'autres matériaux de source végétale qui sont considérés comme des revêtements écologiques par excellence, tels que le mélange de terre crue et de paille de blé, ou carrément un revêtement totalement végétal qui habille le bâtiment. Enfin, un autre matériau de revêtement utilisé en Alaska est basé sur la neige et la glace, et habille les murs extérieurs constitués de blocs de glaces.



Figure 1. 1 : Quelques matériaux de construction utilisés dans le revêtement (a : sable- b : pierre naturelle- c : mortier de ciment- d : argile (source : Éditée par l'auteur, 2020)

2. Types de revêtement extérieur

Le revêtement extérieur d'un bâtiment peut être considéré comme le vêtement des murs de façade, il représente la couche qui habille le bâtiment avec différentes fonctions de protection et de décoration. Il existe plusieurs types de revêtements extérieurs tels que:

2.1. Le revêtement en enduit

C'est le revêtement extérieur le plus basique, il se présente comme une simple couche de matériau de construction qui est étalée directement sur le mur et est pulvérisée uniformément sur toute la surface du mur. Ce type de revêtement se caractérise par une composition simple, généralement constituée de mortier de ciment, gypse, chaux ou argile... Il est aussi largement choisi et accepté par les artisans et les constructeurs, du fait de sa facilité d'application qui s'adapte bien à la plupart des matériaux muraux comme la pierre naturelle, la brique, le béton.

Ce type de revêtement présente de nombreux avantages de par sa praticabilité et la facilité de son application, ainsi que par son accessibilité financière, car il est considéré comme le revêtement de façade le plus raisonnable. De plus, ce type de revêtement permet sa coloration avec de la peinture. En revanche, il est considéré comme faible en matière d'isolation thermique, à moins qu'il ne soit appliqué avec un procédé d'isolation thermique.



Figure 1. 2 : Exemple de revêtement extérieur sous forme d'enduit en mortier de ciment.

(source : Éditée par l'auteur, 2020)

Plusieurs finitions peuvent également être appliquées à ce type de revêtement, ce qui déterminera son apparence, telles que le revêtement taloché offrant une surface assez lisse par la taloche ; le lissé affichant une surface parfaitement lisse à l'aide d'une lisseuse ; le gratté présentant une surface irrégulière, projeté de manière brute ou projeté à main nue.

2.2. Le revêtement en bardage

Le bardage de façade est un revêtement extérieur qui permet d'habiller le bâtiment au moyen des matériaux de construction utilisés comme protection extérieure et fixés sur le côté extérieur du mur de la façade. Ce sont des éléments préfabriqués qui s'ajoutent à l'enveloppe existante. Ce type de revêtement extérieur est très fiable, permettant d'apporter une touche très contemporaine au bâtiment. Parmi ses avantages, il est considéré comme l'isolant thermique par excellence, car il permet l'utilisation de la couche d'isolation thermique de l'extérieur avant de fixer la couche de revêtement extérieur et sans compromettre l'espace intérieur de la maison. Il protège également du soleil brûlant et empêche l'apparition d'humidité sur le mur du bâtiment. Parmi ses avantages aussi, la protection du bâtiment contre les chocs violents et la couverture des défauts de mise en œuvre des parois extérieures, il est pratique à remplacer sans compromettre la structure du mur extérieur. Cependant, le bardage est dispendieux, quel que soit le matériau dont il est constitué.

Ce type de revêtement extérieur a un impact significatif sur l'aspect extérieur du bâtiment. Pour cette raison, les constructeurs ont fabriqué plusieurs types de ce revêtement, notamment: le bardage en bois, qui est durable et économique ; le bardage métallique qui est solide, léger et d'apparence moderne ; le bardage en PVC qui est une solution pratique, économique et facile à entretenir par rapport au bois, mais moins esthétique ; le bardage composite, qui est constitué d'un mélange de bois et de PVC, bénéficiant de l'aspect du bois et de la facilité d'entretien du PVC ; et enfin, le bardage en pierre, qui offre une protection solide contre les chocs et donne un aspect naturel et durable.



Figure 1. 3 : Exemples de revêtements en bardage de différents matériaux

(source : <https://www.inoxdesign.fr>, 2021, Editée par l'auteur)

2.3. Le revêtement ventilé

Le revêtement ventilé « connu sous le nom de la façade ventilée » est un système de bardage connu. Ce type de revêtement est considéré comme l'un des plus courants grâce à son efficacité énergétique, car il est compatible avec les exigences de l'architecture durable.

Ce type de revêtement se caractérise par une installation simple avec des panneaux indépendants. Il se compose de l'intérieur à l'extérieur, d'une structure installée sur la paroi extérieure qui, à son tour, fixe les panneaux de revêtements de sorte que l'espace qui se forme entre le revêtement et le bâtiment est d'environ 3 à 5 centimètres.



Figure 1. 4 : Exemple de revêtement ventilé en Algérie (source : Éditée par l'auteur, 2021)

La lame d'air créé entre le revêtement et le bâtiment lui permet de respirer par l'air en mouvement qui fonctionne grâce à l'effet de cheminée en aspirant de l'air chaud. Ce principe maintient la chaleur en hiver et la fraîcheur en été, et améliore les performances du bâtiment. L'association des panneaux de revêtement ventilé et d'une couche isolante extérieure offre une meilleure isolation thermique et acoustique (Schianchi et al. 2021).

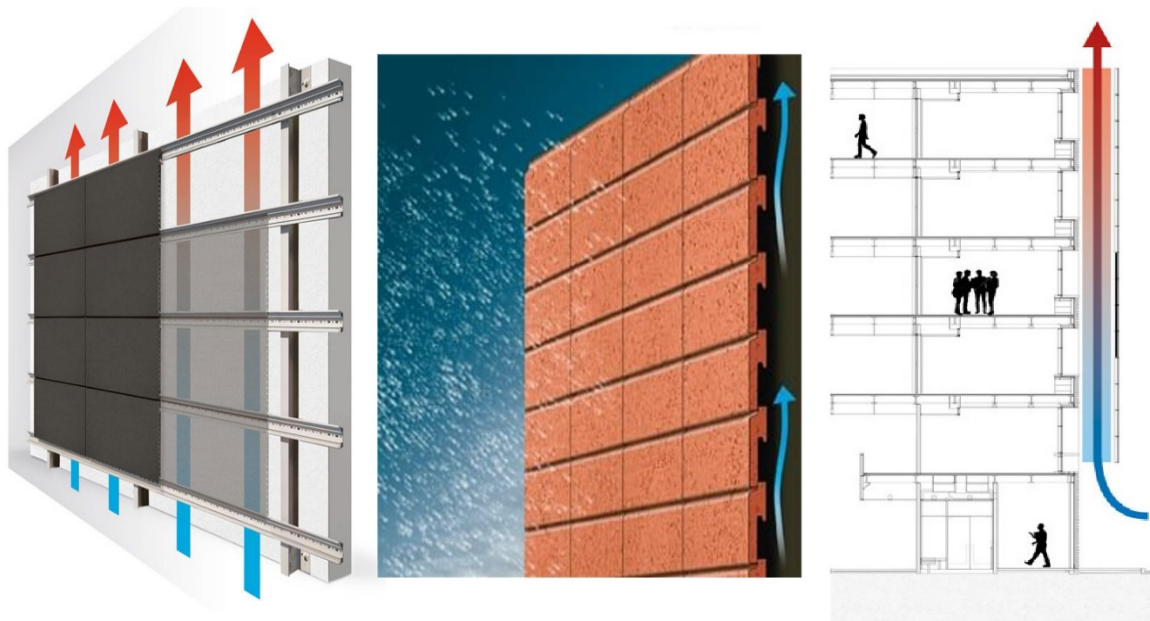


Figure 1. 5 : Principe de fonctionnement du revêtement ventilé

(source : <https://www.tempio.es>, 2021)

De nombreux chercheurs ont étudié ce type de revêtement à cause des solutions efficaces qu'il apporte à l'enveloppe du bâtiment dans le domaine de l'énergie et du développement durable (Khadraoui et al. 2016).

2.4. Le revêtement en parement

Ce type de revêtement consiste en la pose d'une couche décorative ou d'une mosaïque, directement sur le mur extérieur. Il est considéré comme le plus esthétique et son objectif est de décorer la façade, principalement, afin de lui donner un aspect agréable. Il peut se présenter sous plusieurs formes, comme la pierre sèche, les briques d'argile, l'ardoise ou la pierre naturelle. L'aspect de sa texture est généralement rugueuse ou en cristal. Ce revêtement offre plus de finitions et avec moins d'effort que l'enduit ordinaire. Parmi ses avantages, également, de multiples apparences possibles pour la façade.



Figure 1. 6 : Exemple de revêtement en parement naturel et artificiel

(source : Éditée par l'auteur, 2021)

2.5. Le revêtement en végétation

Ce type de revêtement est connu sous le nom de façade végétale, il est considéré comme la tendance préférée des architectes. Son principe est de couvrir les parois extérieures du bâtiment par de la végétation grimpante qui sera considérée comme revêtement extérieur englobant, couvrant, isolant et protégeant le bâtiment. Le revêtement en végétation est considéré comme un revêtement écologique par excellence. Il est avant tout utilisé pour

son côté esthétique. Il aide en grande partie à l'isolation thermique et acoustique du bâtiment. En revanche, il est indispensable d'entretenir la paroi extérieure afin d'éviter les désagréments liés à la végétation (Harmonie, 2021).



Figure 1. 7 : Exemples de revêtement végétal en France

(Source : <https://www.arts-in-the-city.com>, 2021)

Plusieurs recherches ont été menées sur l'évapotranspiration, l'isolation thermique et acoustique, et la performance énergétique de ce type de revêtement, et qui ont démontré plusieurs avantages tels que la lutte contre les îlots de chaleur urbaine, la lutte contre la pollution atmosphérique et une grande capacité écologique (Zhang et al. 2019).

3. Rôle et fonction du revêtement extérieur

En architecture, la composition du bâtiment se caractérise par plusieurs composantes, qu'elles soient fondamentales ou secondaires. Chaque partie est responsable d'un rôle pour le meilleur fonctionnement du bâtiment, et aucun de ces éléments ne peut être négligé. Par exemple, les fondations et la structure sont chargées de l'équilibre et la transmission des charges dans le bâtiment ; les murs intérieurs jouent le rôle de séparation interne du bâtiment, tandis que les murs extérieurs forment la façade sont les plus exposés aux facteurs naturels, car cette partie est en contact direct avec l'extérieur, c'est pourquoi elle doit être protégée par un revêtement extérieur qui joue le rôle d'un habillement lors de la construction. Comme le reste du bâtiment, ce revêtement extérieur aura plusieurs rôles, comme :

3.1. Effet de protection contre les intempéries

Le revêtement extérieur est le premier récepteur de toutes les conditions climatiques, c'est le lien et la partie intermédiaire entre l'ambiance intérieure et extérieure. Son rôle sera donc de protéger la paroi extérieure, « et automatiquement tout l'espace intérieur », contre les différentes conditions climatiques chaudes et froides. Un mur de façade nu non protégé par un revêtement extérieur risque de subir des infiltrations d'eau lors des intempéries, ce qui provoque l'augmentation de l'humidité à l'intérieur. Aussi, le matériau de construction de la paroi risque d'être endommagé à cause des différents changements climatiques et des fortes radiations solaires.

3.2. Effet de protection contre les chocs

Le revêtement extérieur peut être considéré comme un habillage pare choc contre toutes les percussions venant de l'espace extérieur telles que la grêle, les accidents de voiture, les différents chocs et secousses. C'est la partie du bâtiment qui peut sécuriser les structures, les parois extérieures et même les utilisateurs, contre les différents chocs extérieurs. Il est donc indispensable que le revêtement extérieur soit rigide et avec une certaine profondeur, afin qu'il puisse supporter tout type de chocs exceptionnels ou accidentels. Les façades et les structures non protégées par un revêtement risquent d'être abimées à cause de différentes collisions venues de l'extérieur.

3.3. Effet esthétique

Le revêtement extérieur est utilisé pour ses propriétés esthétiques. Sa qualité esthétique possède un impact significatif sur l'aspect architectural du bâtiment. De nombreux architectes font appel à la décoration extérieure qui est considérée comme un habillage de tout le bâtiment et qui joue un rôle fondamental dans le style architectural choisi. En général, un mur brut sans revêtement est rarement esthétique. L'aspect du revêtement extérieur joue aussi un rôle dans l'intégration et la fusion du projet avec l'environnement et les reliefs. Pour cela, le choix de l'aspect décoratif reste un point très important afin que le bâtiment s'intègre parfaitement dans son environnement.



Figure 1. 8 : Différents exemples d'un revêtement décoratif.

(source : <https://www.agremat.ca>, 2021)

3.4. Effet d'isolation thermique et d'optimisation du confort thermique

Parmi les rôles fondamentaux du revêtement extérieur, l'isolation thermique qui participe à la performance énergétique du bâtiment. Le revêtement extérieur est donc considéré comme une partie de l'enveloppe extérieure englobant tout le bâtiment, et qui peut amplement participer dans l'isolation thermique par l'extérieur et empêcher les ponts thermiques, afin d'économiser l'énergie et assurer un meilleur rendement d'isolation. Pour cette raison, le choix judicieux du revêtement extérieur permet des performances thermiques primordiales. Les études menées sur le revêtement extérieur et ses effets sur la performance thermique du bâtiment ont démontré plusieurs de leurs avantages. En revanche, le choix du revêtement doit être très judicieux (Boukhelkhal & Bourbia, 2021).

3.5. Effet d'isolation acoustique

Le revêtement extérieur est considéré comme le premier récepteur des influences extérieures telles que le bruit et les nuisances sonores. Pour cela, un revêtement adéquat doit répondre aux exigences de l'isolation acoustique, qui peut aider à isoler le bâtiment contre tout type de sources sonores extérieures, afin de contribuer à l'augmentation du confort dans le bâtiment. Lors de la conception, les matériaux de revêtement extérieur employés doivent être choisis selon leurs capacités à répondre aux exigences fixées.

L'association du revêtement extérieur avec un isolant sonore peut offrir de meilleurs résultats (Rona, 2021).

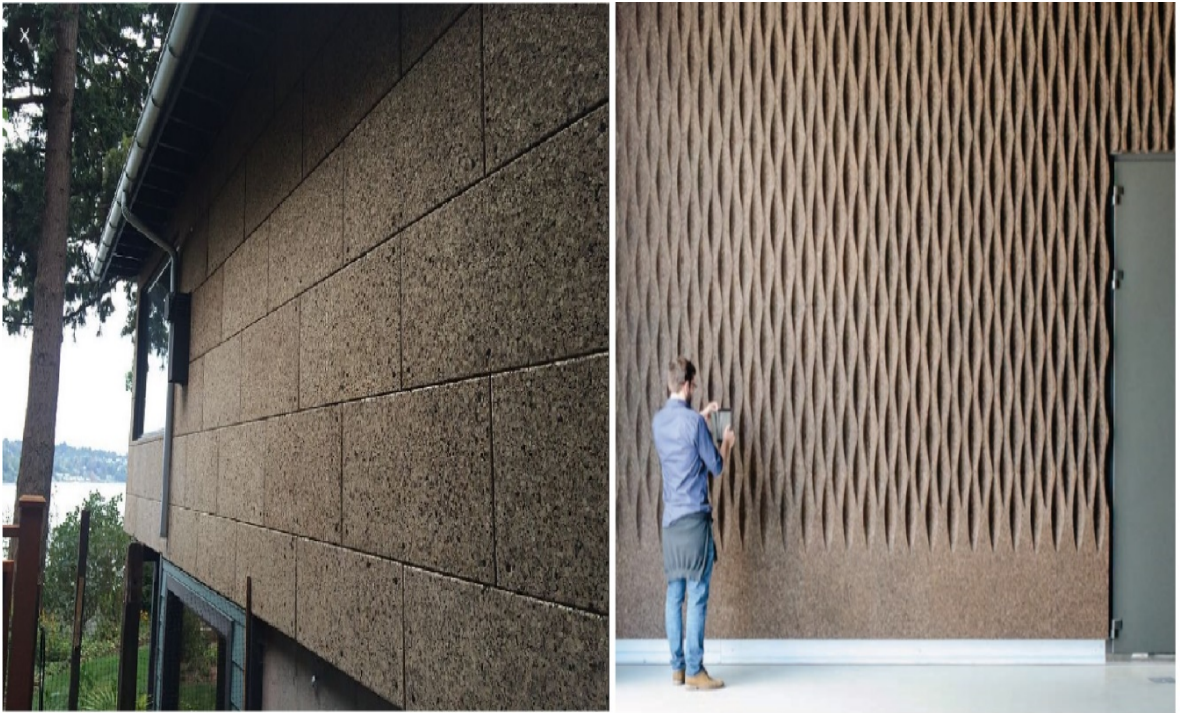


Figure 1. 9 : Revêtement extérieur par le liège utilisé pour l'isolement sonore.

(source : <https://kenovel-liege.be>, 2021)

3.6. Effet écologique

Un bâtiment écologique se caractérise par son respect de l'environnement, en produisant le moins de déchets possibles, tout en optimisant les ressources renouvelables et l'énergie passive, afin de protéger l'environnement. Ce processus peut être assuré au niveau de l'enveloppe du bâtiment à travers son revêtement extérieur écologique respectant l'environnement et les ressources naturelles. C'est notamment le cas du pisé destiné au revêtement des façades, ou de la chaux qui représente un matériau écologique par excellence en raison de son énergie grise et son aspect économique. De même, le bardage en acier, malgré son aspect industriel, reste un matériau recyclable (Futura-sciences, 2021).

4. Le revêtement extérieur dans le grand Sud d'Algérie

4.1. Contexte climatique et architectural de la région Sud de l'Algérie

La surface terrestre est caractérisée par différents types de climats, chaque région possède une géographie et des éléments naturels différents. Tous ces facteurs ont un impact direct sur la nature du climat et de l'environnement. Le climat des régions littorales est complètement différent de celui des régions désertiques et des milieux arides qui se caractérisent par un climat chaud et sec. (Ayoob, 1990). Le climat du Sud de l'Algérie est connu pour son rayonnement solaire intense, des températures très élevées ainsi qu'une faible humidité et peu de précipitations. Les agglomérations urbaines de ces régions désertiques se développent avec un taux d'urbanité très accéléré et d'énormes implications sur les besoins de refroidissement (Matallah et al. 2020). Afin d'améliorer ces conditions de vie, les ingénieurs devraient assurer une protection maximale des bâtiments de ces régions avec des techniques passives, durables et adaptatives au climat, que ce soit à l'échelle architecturale ou urbaine (Al-Mumin, 1995).

Les villes des zones désertiques en Algérie se caractérisent par un tissu très compact pour se protéger du soleil, et des ruelles longues et sinueuses afin de fournir le maximum d'ombre durant la période chaude. De même, l'intérieur des maisons prennent souvent la forme de la parcelle, avec des constructions de type Haouch sous forme de cours intérieures afin de faciliter la ventilation intérieure ; cet espace est entouré de pièces en encorbellement afin de fournir un maximum d'ombre (Chaouche et al. 2000).



Figure 1. 10 : Différence entre un tissu traditionnel et un tissu moderne dans le Sud algérien. (source : Google Earth, 2021)

L'aspect architectural extérieur le plus adapté dans ces régions désertiques est la forme qui peut fournir un maximum de protection contre le soleil avec un minimum d'énergie solaire en été, en particulier, la forme et la couleur de l'enveloppe extérieure du bâtiment, qui est considérée comme le premier récepteur des différentes conditions extérieures (Mansouri et al. 2017),



Figure 1. 11 : Différence entre un revêtement traditionnel et un autre moderne dans le Sud algérien. (source : Éditée par l'auteur, 2020)

4.2. Classification des revêtements extérieurs en Algérie

Les zones désertiques algériennes sont caractérisées par un patrimoine architectural et urbain de grande valeur, qui reflète un mode de vie urbain et une manière d'adaptation établis sur plusieurs siècles dans une zone caractérisée par des conditions naturelles difficiles telles que des températures élevées, des rayonnements solaires intenses, de grandes tempêtes de sable et la rareté des précipitations. Ces zones représentent une grande richesse urbaine avec des modèles différents. On constate que les maisons traditionnelles sont les plus importantes et les plus merveilleuses de ces installations et diffèrent d'une région à une autre. (Bounab et Kenati, 2015). Par exemple, l'aspect architectural dans la vallée des M'Zab est différent de ceux des régions du Hoggar, de Taghit et de Timimoun. Chacune a ses particularités et son style qui traduisent des valeurs qui reflètent la vie de chacune des communautés et reflètent l'aspect architectural et les techniques avec lesquelles il a été construit. Cet aspect est considéré comme un héritage des anciens bâtiments de nos ancêtres qui ont su développer des techniques de construction distinctives, et exploiter des matériaux proches de leur environnement pour la construction. Les sociétés ancestrales se sont largement adaptées à cet environnement, surtout sur le plan thermique qui est le principe de base de l'aménagement urbain des zones désertiques. Aujourd'hui, ce style traditionnel a été mis à l'écart, laissant sa place à la production massive des barres et des tours en blocs de béton, avec des tissus ouverts et des rues larges sans préoccupation d'urbanité ni de vie urbaine communautaire, ce qui conduit l'architecture saharienne à perdre son originalité et ses caractéristiques bioclimatiques avec la disparition du rôle du revêtement extérieur couleur de sable. Malheureusement, cela est lié à la société actuelle qui a totalement négligé l'ingéniosité et le savoir-faire des anciens pour s'adapter à des environnements difficiles, et ces sociétés souffrent maintenant avec des conséquences désastreuses (Chelghoum et Belhamri, 2011).

Parmi les différentes richesses architecturales du Sud algérien, figure la diversité phénotypique du revêtement extérieur qui varie d'une région à l'autre. Cette diversité résulte des contraintes climatiques inhérentes au milieu désertique et qui ont un impact permanent sur l'homme (Matallah et al. 2021).

La nouvelle génération des revêtements extérieurs dans le Sud algérien consiste en différentes formes modernes qui sont pour la plupart construites sans respecter le contexte climatique de la région. A l'inverse, l'ancien style inclut une adaptation thermique incarnée

dans les formes de revêtement extérieur de ces zones qui respectent les stratégies d'ombrage et de protection contre les fortes chaleurs et les rayons solaires. Ces types de revêtement extérieur peuvent être divisés en plusieurs types selon leur apparence, leur couleur et leurs matériaux de construction (Boukhelkhal et Bourbia, 2021) :

4.2.1. Selon les matériaux de construction

Les maisons traditionnelles dans les villes de Sahara algérien ont été construites à l'aide de matériaux localement disponibles, d'où le constat que les revêtements extérieurs ont été élaborés avec des techniques simples et originales. Par exemple, dans le Hoggar, la pierre naturelle est considérée comme le matériau principal dans l'élaboration des murs et des revêtements extérieurs. Même avec de nouvelles constructions en parpaing, les bâtisseurs essayent d'habiller les parois extérieures avec des plaques de pierre afin de garder l'aspect traditionnel de la région.



Figure 1. 12 : Revêtement extérieur sous forme de plaques de pierre naturelle.

(source : <https://www.algerie360.com>, 2020)

Dans la vallée des M'Zab, la pose des revêtements a été basée sur des techniques à main nue sans utilisation d'instruments mécaniques, et recourant à des matériaux de constructions locaux tels que l'argile, le plâtre et la chaux. L'application de ce type de revêtement extérieur se fait uniquement aux endroits où il est nécessaire, là où il y a le contact et le frottement avec l'extérieur (Raverau, 1981).



Figure 1. 13 : Les matériaux utilisés dans la composition des revêtements extérieurs à Ghardaïa. (source : Éditée par l'auteur, 2017)

Dans les régions de Timimoune et Taghit, les habitants ont construit leurs maisons avec des matériaux locaux. Les murs porteurs de 50 à 60 cm sont élevés avec de la brique de terre fabriquée sur place. Le revêtement extérieur est basé sur un mélange tamisé de terre sableuse et argileuse légèrement humidifiée qui, une fois posée sur le mur, sèche au soleil (Chelghoum et Belhamri, 2011).



Figure 1. 14 : Les matériaux utilisés dans la composition des revêtements extérieurs à Taghit. (Source : Yaou et Saloui, 2012)

4.2.2. Selon la morphologie

Les revêtements extérieurs des maisons traditionnelles dans le grand Sud algérien, se caractérisent par différentes morphologies. Leur aspect est le résultat d'un savoir-faire impressionnant dont le but était de rechercher des irrégularités brutes et apparentes et non pas de réaliser une forme géométrique plane et lisse. Cette irrégularité dans l'aspect extérieur permet de créer un auto-ombrage sur le revêtement extérieur en lui-même, en donnant plus de protection contre les facteurs extérieurs par rapport à une surface lisse qui est considérée comme fragile. Par exemple, dans la région mozabite, le revêtement est appliqué à main nue, laissant la trace et l'effet des doigts en créant une texture rugueuse. Ce geste diffère de celui effectué par l'instrument dit "tyrolien", car cette morphologie est appliquée à la main de façon à ne pas effacer les traces de doigts. Parfois, le passage est effectué de la forme rugueuse à la forme lisse dans les endroits où il n'y a pas de contact (Raverau, 1981).



Figure 1. 15 : Application du revêtement à main nue afin de profiter de ces traces,
à Ghardaïa (source : Raverau, 1981)

Dans le Hoggar, la morphologie du revêtement extérieur traditionnel est le résultat de l'utilisation de la pierre naturelle qui est considéré comme le matériau principal dans l'élaboration des revêtements extérieurs. Ce matériau a conduit à la formation d'une texture cristalline à cause de la sculpture et du polissage sur les plaques de pierre naturelle utilisée dans la formation du revêtement extérieur.

Dans la région de Timimoune, la forme du revêtement était basée sur de petites boules en argile de la taille d'une paume et sous forme de sphère. Ces boules étaient directement projetées sur le mur extérieur afin de créer une forme rugueuse constituée de boules collées les unes aux autres. Tandis que dans la région de Taghit, la forme du revêtement extérieur suit la forme de la brique de terre fabriquée sur place. Le revêtement fabriqué par le sable et l'argile légèrement humidifié laisse l'apparence du mur porteur composé de la juxtaposition des briques de terre.



Figure 1. 16 : Application du revêtement extérieur par de petites boules en argile à Timimoun (source : Éditée par l’auteur, 2017)

4.2.3. Selon la couleur

La perception des couleurs des revêtements extérieurs est fortement accordée à la perception des matériaux locaux utilisés, car l'architecture traditionnelle tirait ses ressources des matériaux locaux. En Algérie, le paysage du désert n'est pas représenté seulement par du sable jaune, il offre en réalité une multitude de couleurs dues à l'érosion des roches. Le jaune, le beige, la couleur de sable doré jusqu'au rouge sont souvent les couleurs utilisées dans les revêtements extérieurs. Par exemple, dans la région de Timimoun, la couleur rouge avec intonation vers la couleur grenade apparaît dans tous les revêtements extérieurs, vu la couleur rouge du sable dans la région, la couleur beige au niveau de la vallée des Mزاب, et la couleur de la roche naturelle, qu'elle soit grise, bleue ou rouge, au niveau des Hoggar. Il est important de signaler que le choix des couleurs dans chaque région n'est pas fortuit, c'est un savoir-faire qui aide à l'intégration et l'harmonie de l'aspect architectural avec l'environnement immédiat. Il symbolise l'architecture vernaculaire. Ainsi, ces couleurs aident à diminuer le stockage de l'énergie solaire par le phénomène de la réflectivité « albédo » (Mansouri et al. 2018).



Figure 1. 17 : Différentes couleurs utilisées dans les revêtements extérieurs au Sud algérien. (Source : Éditée par l’auteur, 2020)

4.3. Préservation et valorisation du revêtement extérieur en tant que patrimoine architectural

L’Algérie possède un héritage riche en termes de patrimoine architectural. Ce savoir-faire ancestral hérité, à l’égard des nouvelles réalisations, devrait constituer un ensemble homogène. Malheureusement, l’Algérie ne s’engage pas pleinement dans l’élaboration de plans et projets de préservation et conservation du patrimoine architectural dans le grand Sud algérien. Malgré l’existence de quelques tentatives, cela reste insuffisant. Cette paresse se révèle dans le manque d’entretien, la dégradation de l’ancien bâti ainsi que le produit neuf qui vient s’approprier l’ancien. Cette situation entraîne une qualité médiocre, même sur la nouvelle production. Et parmi les opérations qui doivent être effectuées, il faut insister sur la préservation des revêtements traditionnels à travers la protection des différentes couleurs des matériaux de constructions utilisés, ainsi que la forme à donner à ces matériaux. Face au problème de la dégradation, l’Etat doit mettre un programme à long terme afin de sensibiliser les populations locales à la valeur de ce patrimoine. Dans une perspective de revalorisation, l’Etat peut éditer un cahier des charges strict ayant pour but d’établir des recommandations architecturales liées à la forme et la couleur des matériaux des revêtements extérieurs. Cette opération pourra être confiée à des compétences convenablement formées dans le domaine, telles que des architectes spécialistes en

patrimoine architectural, afin de contribuer à la revalorisation et la préservation du vieux revêtement qui est considéré comme l'interface principale de toute œuvre architecturale.

En revanche, l'état du patrimoine bâti dans le Sud de l'Algérie peut être appréhendé à la lumière des réalités économiques actuelles parce que la restauration architecturale nécessite d'importantes ressources financières et humaines. Les possibilités actuellement indisponibles ont donné comme résultat un processus de dégradation du patrimoine hérité en Algérie.

Conclusion

Aujourd'hui, la construction dans la région saharienne ne reflète plus ce que les ancêtres ont construit à travers les siècles. D'après Marc Cote, « *il y a rupture statistique dans le rythme d'urbanisation et d'architecture au Sahara : le 20ème siècle a introduit quelque chose de radicalement nouveau* ». Les nouveaux matériaux utilisés actuellement se caractérisent par de mauvaises propriétés thermo physiques à l'égard des conditions climatiques qui caractérisent la région. Les revêtements extérieurs utilisés actuellement se résument en une simple façade avec crépissage lisse totalement exposée aux rayonnements solaires intenses.

Ce chapitre a essayé de présenter quelques concepts liés au revêtement extérieur, les différents types et fonctions des revêtements extérieurs, ainsi que les principales stratégies utilisées des revêtements dans les milieux sahariens au climat chaud et sec. Ces systèmes de revêtement traditionnel, sont fondés sur un savoir-faire local qui a prouvé, pendant de longs siècles, leur efficacité et fait preuves de conditionnement et d'adaptation avec le climat au fil du temps.

La sélection et le choix d'un système de revêtement extérieur efficient joue un rôle clé dans la détermination du confort thermique ressenti par les habitants. Cependant, une attention particulière doit être portée sur la texture des revêtements, en se basant sur leurs composantes et les matériaux de constructions utilisés. Cette texture semble avoir un effet primordial sur la performance énergétique des bâtiments. En effet, le revêtement traditionnel a prouvé son efficacité comme étant une stratégie passive qui aide à la réduction des températures de l'air par l'augmentation du phénomène de réflexion du rayonnement solaire, afin d'absorber un faible taux de rayonnement et obtenir un minimum d'accumulation de chaleur.

Ces phénomènes de réflexion, absorption et transmission de rayonnement de courtes longueurs d'ondes, agissent sur la thermique du bâtiment en réduisant le taux de transfert de chaleur à travers le revêtement extérieur, impliquant ainsi une amélioration au niveau du confort thermique intérieur. Ce phénomène de transfert de chaleur, de même que d'autres notions sur la thermique du bâtiment, notamment celles liées au fonctionnement thermique de la paroi, seront analysés en détail dans le prochain chapitre.

CHAPITRE II

NOTIONS ET NORMES DE TRANSFERT DE CHALEUR

Introduction

Le climat est considéré comme le premier facteur jouant un rôle majeur dans la qualité de vie de l'homme et de son confort, qu'il soit à la maison, au travail ou dans les lieux publics. Depuis des décennies ; la recherche du confort devient de plus en plus accrue, ce qui a exigé la consommation de grandes ressources naturelles et financières. Cette indifférence des concepteurs vis-à-vis du climat a fait que la plupart d'entre eux ont valorisé l'esthétique, le fonctionnement et la structure du bâtiment au détriment des techniques d'adaptation par rapport au climat et au confort intérieur et extérieur. En revanche, la recherche du confort par des moyens industriels et technologiques crée un environnement artificiel mais malheureusement non durable, ce qui entraîne de graves conséquences, en particulier dans les zones chaudes et sèches, car ces régions sont caractérisées par des facteurs climatiques très sévères, de sorte que l'ambiance intérieure des bâtiments fabriqués artificiellement ne peut pas apporter une solution durable au problème du confort.

Plusieurs études sont menées sur l'impact du climat dans les villes du désert algérien. Dans l'une d'elles, plus de 75% des habitants interrogés décrivaient le temps comme froid en hiver, surtout la nuit, tandis qu'en été, la plupart des habitants sont incommodés par la chaleur intense et l'inadaptation des bâtiments aux conditions climatiques (Ben Sharif, 1996). En effet, le conditionnement climatique naturel des bâtiments en zone chaude est un facteur très important pour le confort des habitants. Les ingénieurs doivent en tenir compte dans les études de projet ou de restauration de bâtiments, de sorte que toutes les données climatiques pour chaque région doivent être prises en considération en phase d'études avec l'identification des stratégies affectant le confort thermique. Parmi ces éléments, le revêtement extérieur peut apporter des solutions en le développant selon une bonne approche afin de réduire les températures intérieures et augmenter le niveau de confort thermique. Ce chapitre aborde certains concepts théoriques liés aux climats, aux transferts de chaleur et à l'efficacité énergétique dans le Sud de l'Algérie. Et aussi, aux protocoles de mesures et standards internationales de transfert de chaleur et d'humidité à travers l'enveloppe extérieure des bâtiments.

1. Caractéristiques des zones climatiques dans le Sud de l'Algérie

L'Algérie, le plus grand pays africain, se caractérise par de multiples types de climats. Selon la classification de Köppen *Csa*, le Nord algérien possède un climat méditerranéen, alors que le Sud se caractérise par un climat aride et semi-aride. Cependant, entre ces deux grands types de climats, existent un climat méditerranéen avec une sécheresse durant la majorité de l'année. Tandis que dans la partie Sud de l'Algérie, le climat est typiquement désertique, caractérisé par de fortes chaleurs et une sécheresse durant toute l'année.

D'après Köppen et Geiger, le zonage climatique de l'Algérie est très varié. En été, les régions Sud se situent dans les zones climatiques d'été (E3-E4-E5), la zone (E3) qui contient les régions de Biskra, Boussaâda, Laghouat et Ghardaïa qui se caractérise par des étés chauds et secs mais moins contraignants que la zones (E4) qui contient la région des Hoggar et Tassili et la zone (E5) qui contient la région d'Adrar. Par ailleurs, les zones climatiques d'hiver des régions sahariennes sont (H3a- H3b- H3c-), qui connaissent des hivers très froids la nuit par rapport au jour, ce qui entraîne des écarts de température très importants (Ould Henia, 2003).

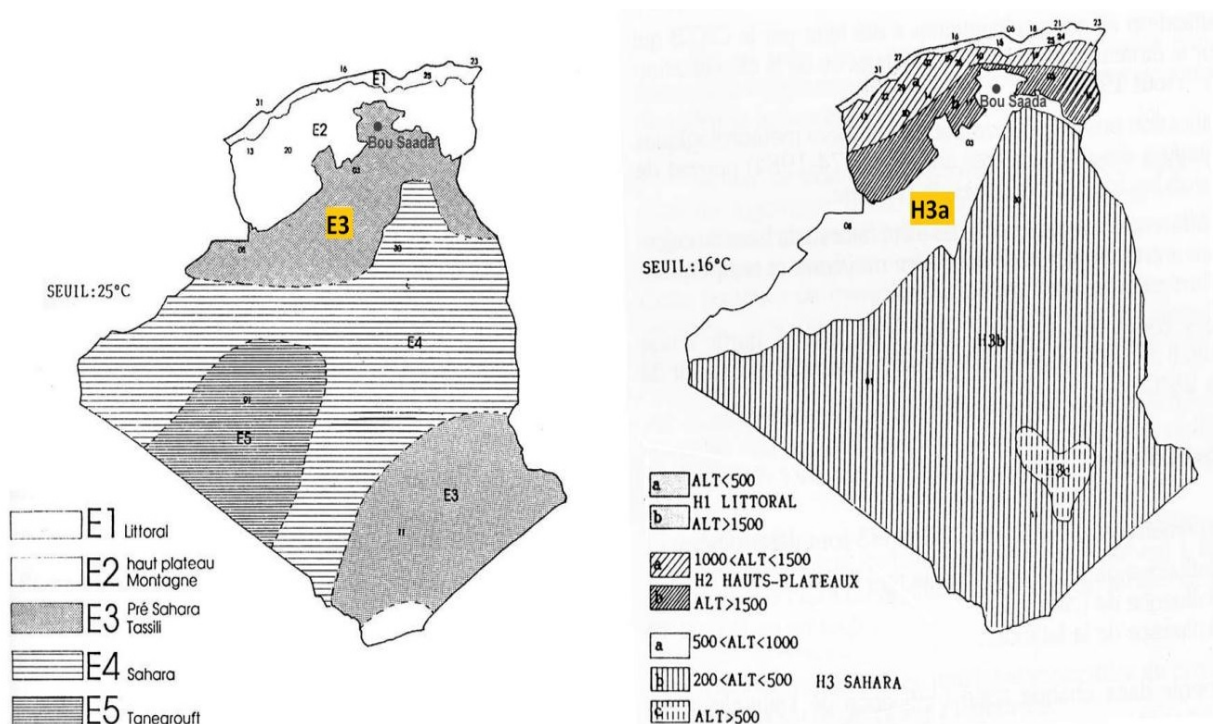


Figure 2.1 : Zones climatiques d'été et d'hiver en Algérie

(source : Ould Henia, 2003. Éditée par l'auteur)

Ci-dessous les plus importants facteurs climatiques qui caractérisent les régions Sud de l'Algérie :

1.1. La température de l'air

Dans les régions Sud de l'Algérie, l'écart de température est très variable entre les périodes diurne et nocturne, avec une différence atteignant jusqu'à 50 °c, notamment dans la zone délimitée par Adrar - Reggane - In Salah où les températures restent écrasantes à partir du mois d'avril jusqu'au mois d'octobre. Cette région est l'une des plus chaudes au monde en été (Fezzioui, 2004).

D'après les données météorologiques fournies par l'Office Nationale de la Météorologie entre 1997 et 2008, dans la région de Béchar par exemple, la température annuelle moyenne est de 21,17°c avec une moyenne maximale de 38,03°c au mois de juillet et une moyenne minimale de 4,9°c au mois de janvier.

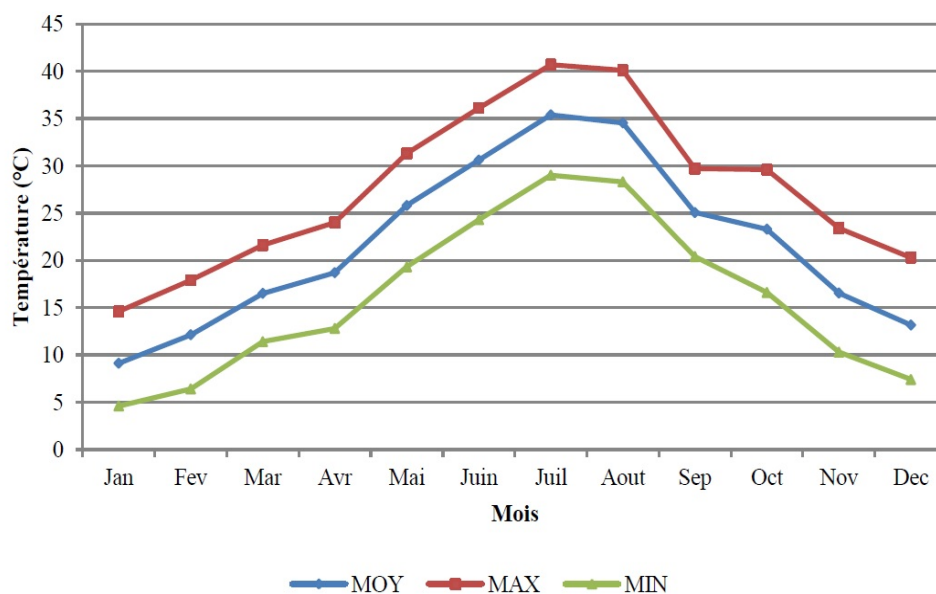


Figure 2. 2: Température moyenne mensuelle de l'air dans la région de Bechar 1997-2008.

(source : O.N.M, 2010)

La température de l'air au Sahara est un paramètre climatique qui a un impact sur la quantité d'énergie à consommer afin de garantir le chauffage en hiver ou le refroidissement en été. Ce facteur climatique intervient dans le transfert thermique conductif et convectif de l'enveloppe extérieure des bâtiments (Al-Mumin, 1995). En effet, une meilleure étude

bioclimatique avec des mesures passives, devrait sans aucun doute, régler les problèmes liés à la température de l'air en rapprochant la température intérieure de la zone de confort. dans le cas où ces méthodes passives ne suffisent pas, le problème pourra être complété par des systèmes mécaniques mais avec une intensité moins forte (Roulet, 2012).

1.2. Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est considéré comme le facteur climatique principal dans l'évaluation du confort thermique dans les régions chaudes et arides. C'est un ensemble d'ondes électromagnétiques émises par le soleil et composé d'ondes ultraviolet comme les rayons gamma, d'ondes radio, et de rayons cosmiques, en passant par la lumière visible. Selon les standards normalisés fournis par l'ASTM (American Society for Testing and Matériel), l'énergie contenue dans les spectres sont d'environ 5% pour les UV, 46% pour les VIS et 49% pour les PIR. La terre reçoit une quantité d'énergie solaire égale à deux milliardièmes de l'énergie solaire totale. Par ciel clair, cette énergie reçue représente plus de 5 000 fois la consommation mondiale d'énergie par an. Ce rayonnement atteint à midi une puissance de l'ordre de 1 000 W sur une surface totalement orthogonale de 1 m². La puissance reçue par la paroi d'un bâtiment dépend de l'angle d'incidence, de l'orientation et de l'inclinaison de la paroi (Liebard et al. 2005).

Cependant, en traversant l'atmosphère, l'énergie reçue à partir du rayonnement solaire subit plusieurs repartitions qui peuvent diminuer l'intensité de cette énergie reçue. Cette diminution est d'autant plus forte que la couche d'atmosphère est importante. Le rayonnement global reçu sur une surface plane est composé de trois types de rayonnements : (direct + diffus et réfléchi) (Lavigne et al. 1994) :

1.2.1. Rayonnement solaire direct

Il provient en ligne droite du soleil vers la surface de réception. Ce type de rayonnement peut être nul par temps couvert. Il est calculable en fonction de la transmittance de l'atmosphère.

1.2.2. Rayonnement solaire diffus

Il provient de la répartition du rayonnement direct par les particules de l'atmosphère, ce rayonnement n'est jamais nul même si le ciel est très clair, et il représente environ 15% du rayonnement direct.

1.2.3. Rayonnement solaire réfléchi

Il provient de la réflexion des rayonnements solaires directs et diffus sur les différentes surfaces de l'environnement terrestre. Il dépend en grande partie de la nature du sol (eau, sable, terre, gravier, neige...).

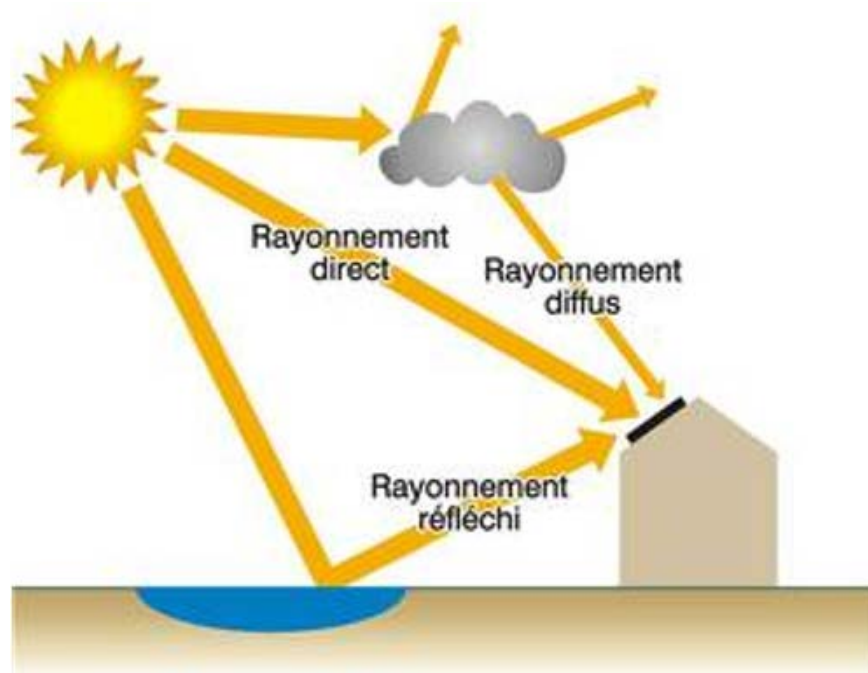


Figure 2. 3 : Types de rayonnements solaires reçus par le bâtiment

(source : Éditée par l'auteur, 2021)

Sur l'enveloppe extérieure du bâtiment, le rayonnement solaire total reçu par le revêtement dépend des caractéristiques physiques, des matériaux, de la couleur et de la texture de ce revêtement. Une partie du rayonnement incident est réfléchi dans l'atmosphère, une autre est absorbée par le revêtement extérieur sous forme d'énergie et qui sera transmise par la suite à l'intérieur. Le rayonnement solaire total sera partagé en :

- Un flux solaire réfléchi qui dépend du facteur de réflexion solaire et de la nature du revêtement extérieur à travers son matériau, sa couleur et sa texture. Par exemple, si la surface du revêtement extérieur est mat, la réflexion sera identique dans toutes les directions, et si cette surface est polie, la réflexion sera spéculaire dans une seule direction et symétrique à la direction incidente (Mazria, 1980).

- Un flux solaire transmis qui dépend de la capacité des matériaux de revêtement à absorber le rayonnement solaire et de le transmettre à l'intérieur. Il dépend en grande partie des coefficients d'absorption et de réflectivité des matériaux du revêtement.
- Et un flux solaire absorbé qui correspond à l'énergie incidente, et auquel on retire ce qui réfléchit et transmet. Le rayonnement solaire absorbé par le revêtement extérieur se transforme en chaleur et participe à l'augmentation de la température surfacique de ce revêtement.

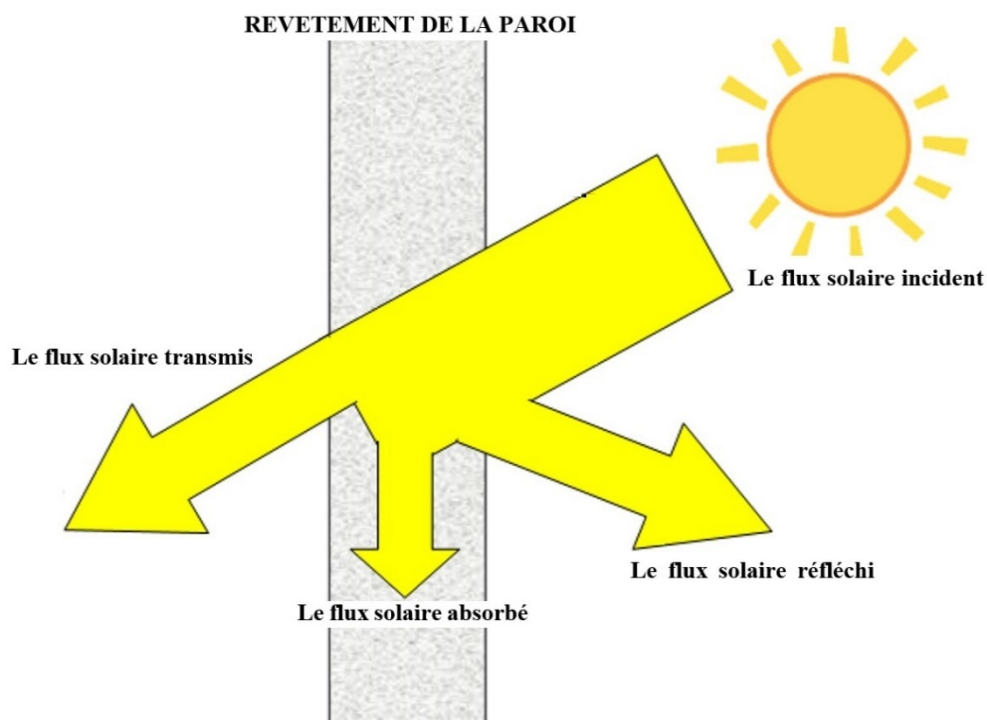


Figure 2. 4 : Diffusion du flux solaire reçu par un revêtement extérieur de bâtiment

(source : Éditée par l'auteur, 2021)

Dans les régions sahariennes d'Algérie, l'intensité des radiations solaires est le facteur le plus important, il a un effet primordial sur la conception architecturale dans ces régions (Izard, 1993). Cette intensité radiative varie en fonction de la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon, de l'inclinaison de ses rayons sur la surface frappée, et de la durée d'exposition solaire. Avec un ciel clair, les régions Sud de l'Algérie disposent d'un taux d'ensoleillement très fort, caractérisé par des journées très longues et une durée

d'insolation supérieure à 8 heures/jour pendant toute l'année. Par exemple dans la région de Béchar, et selon les données de l'Office National de la Météorologie, la durée moyenne d'ensoleillement est de 146j/an : soit 3500 heures sur 8760 heures, avec taux de 40%. Ces valeurs peuvent dépasser les 14 heures par jour en juin, alors qu'elles diminuent jusqu'à 9h par jour en décembre. Ainsi, le rayonnement total reçu pendant le mois de juillet sur une surface horizontale est de l'ordre de 7840 Wh/m²/jour. Alors qu'en période hivernale, ce rayonnement atteint son maximum en janvier, avec une valeur de 2334 Wh/m²/jour (O.N.M, 2010). Afin de minimiser cette intensité trop élevée, surtout en période estivale, un traitement et une étude pertinemment réfléchi des revêtements extérieurs doit être menée sur le choix des matériaux, des couleurs et de la texture du revêtement extérieur afin de maîtriser au mieux le flux de la radiation solaire et par conséquent le confort thermique intérieur dans le bâtiment.

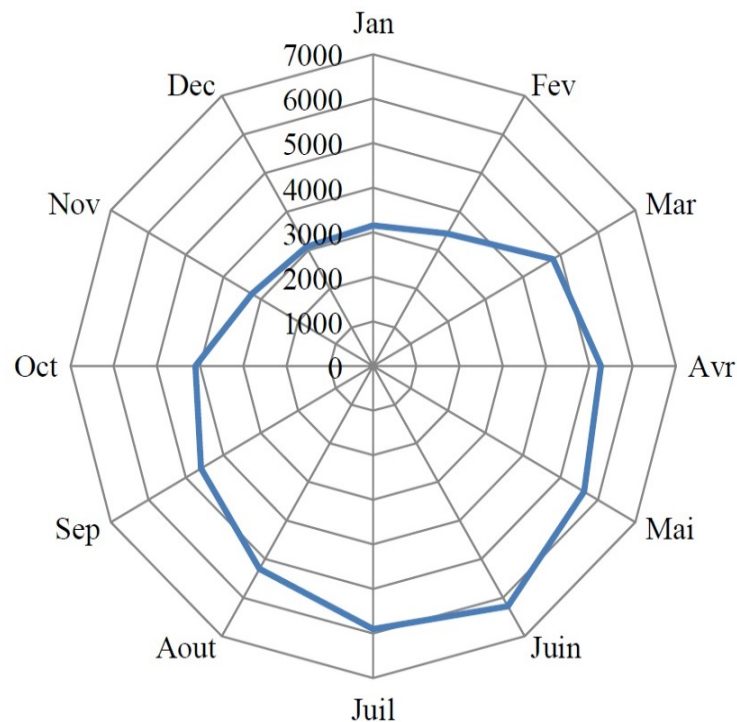


Figure 2. 5 : Radiation solaire globale dans la région de Béchar 1997-2008

(source : O.N.M, 2010)

1.3. L'humidité relative

L'humidité relative est le facteur climatique qui donne le rapport entre la concentration de la vapeur d'eau contenue dans l'air à sa saturation. L'humidité relative diminue si la

température augmente, même si l'humidité absolue reste stable. L'humidité relative est un facteur climatique très important dans les régions à climat chaud aride, parce qu'elle a un effet primordial dans l'évaluation du confort thermique. De nombreux phénomènes tels que la sécheresse, l'assèchement de la végétation, et le développement des moisissures ont une relation directe avec l'humidité relative. La relation entre l'humidité et la température de l'air se caractérise par une forte relation inverse, et l'association entre les deux détermine la situation de confort thermique dans les régions arides (Adelard, 1998). Ce facteur climatique possède aussi un effet sur la qualité de l'air et la partition des vents de sable qui accentue davantage le phénomène de l'aridité (MEIR, 1995).

Les données météorologiques enregistrées dans le Sud de l'Algérie, comme Béchar, ont indiqué une valeur minimale de 10,2% en Juillet, et toutes les valeurs minimales sont enregistrées l'après-midi. Alors que la valeur maximale était de 60,1% en Janvier vers 6 heures du matin. Généralement, ces valeurs restent faibles à cause du manque de végétation et d'eau.

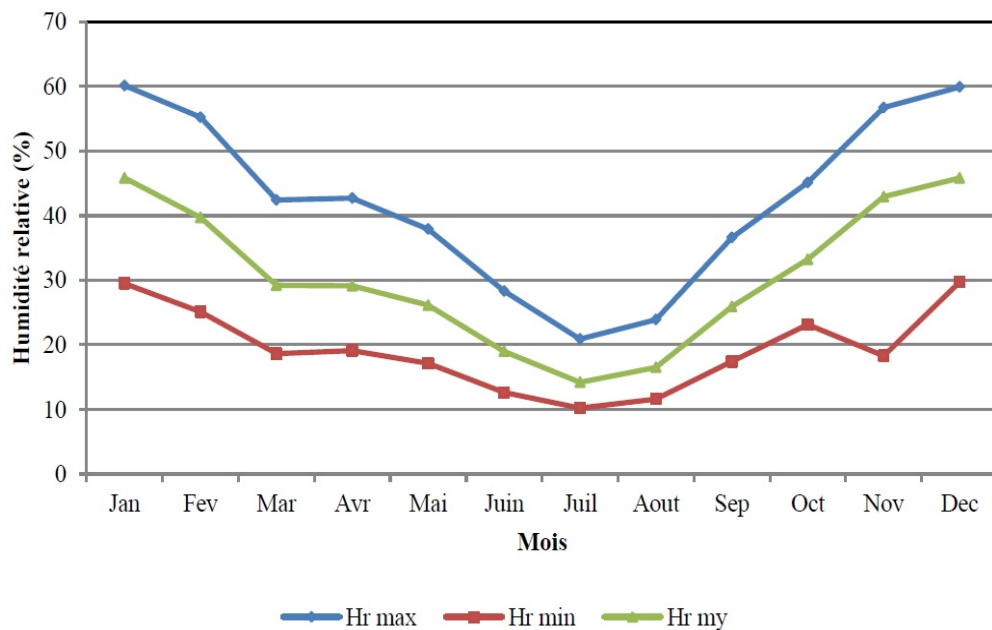


Figure 2. 6 : Humidité relative moyenne dans la région de Béchar 1997-2008

(source : O.N.M, 2010)

1.4. La température moyenne radiante

La température moyenne radiante (T_{mrt}) permet de globaliser les échanges thermiques par rayonnement. Ce facteur climatique est un paramètre très important dans l'évaluation du confort thermique dans les régions chaudes et arides, car elle est directement liée aux zones ensoleillées et aux zones ombragées. Ce facteur est considéré comme la somme des températures surfaciques entourant le corps humain (ISO 7726, 1998). Dans le Sud de l'Algérie, la température moyenne radiante est considérée comme étant un indice thermique, une variable importante dans l'évaluation du confort thermique, qui dispose d'un effet primordial sur le calcul des indices de confort thermique. Les températures surfaciques des revêtements extérieurs ont un effet principal sur la mesure de la température moyenne radiante. Un savoir-faire optimal concernant les revêtements extérieurs des bâtiments de la part des professionnels du métier, peut contrôler la valeur de la température moyenne radiante qui dépend en grande partie des surfaces ensoleillées et ombragées du revêtement extérieur (Kotzenn, 2003).

1.5. Le vent

Le vent est un facteur climatique déterminé par plusieurs phénomènes locaux tels que les variations des températures, la rotation de la terre, la topographie et la pression de l'air.

Ce facteur climatique a un effet important sur les échanges par convection et par évaporation. Par conséquent, les concepteurs doivent prendre en considération ce facteur dans la conception de l'enveloppe des bâtiments.

Dans les régions du Sud de l'Algérie, le vent est un facteur principal de la topographie désertique, il se caractérise par ses diverses directions, en créant des tourbillons de sable et de poussière pendant les saisons printanières, ce qui constitue un handicap majeur pour toute activité (AL-Mumin, 1995). Dans la région de Béchar par exemple, la vitesse moyenne des vents varie entre 1,8 à 6,1m/s avec une moyenne annuelle de 3,5m/s. Cette vitesse est constamment faible le matin, elle atteint son maximum l'après-midi à cause de l'écart de température entre matin et après-midi. A Bou Saada par exemple, les vents d'hiver viennent du nord-est. Alors qu'en été, les vents chauds viennent du sud-ouest. Ces régions désertiques se caractérisent par des vents très secs et très chauds désignés sous le nom de « Sirocco » ou « Chehili », Ils adviennent en été et ils sont nocifs pour la santé en provoquant une ambiance de confort thermique intolérable.

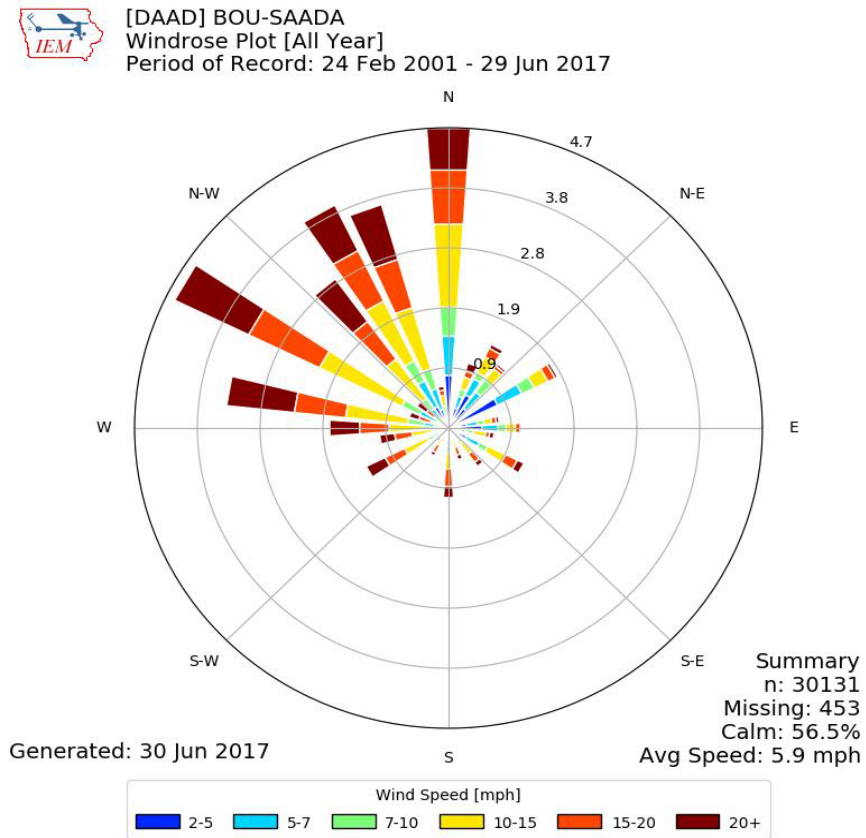


Figure 2. 7: Rose des vents de Bou Saada (source : O.N.M, 2017)

1.6. Précipitation et aridité

Les régions sahariennes en Algérie se caractérisent par un climat aride et déficient de toute source de pluie. Les précipitations moyennes annuelles enregistrées par l’Office National de la Météorologie dans la région de Béchar indiquent une valeur entre 100 mm et 150 mm. Cependant, ces régions sahariennes souffrent constamment d’une aridité inégale. Parfois, les moyennes peuvent descendre jusqu’à 10 mm dans les régions les plus arides. Afin de calculer l’indice d’aridité (I) dans ces régions, Martonne a développé une formule reliant les précipitations avec les températures :

$$I = P / (T + 10) \dots\dots\dots(01)$$

Avec P la précipitation annuelle et T est la température moyenne annuelle. L’échelle suivie par Martonne indique que si la valeur de I < 5 le climat est hyper aride. L’application de cette formule sur la région de Béchar donne un indice d’aridité de 2,10. Ce qui confirme que les régions sahariennes en Algérie subissent un climat hyper aride. Cependant, ce climat concourt avec l’apparition de pluies torrentielle qui peuvent entraîner de graves

catastrophes et dégâts. Par exemple en 2008, la vallée des Mزاب a été inondée par une grande quantité de pluie diluvienne, ce qui a entraîné des ravages humains et matériels sans précédent dans la région.

1.7. Efficacité énergétique du bâtiment dans le Sud de l'Algérie

La région saharienne de l'Algérie est renommée pour sa richesse en énergies fossiles telles que le gaz et le pétrole connus pour leurs larges champs d'utilisation au cours du 20ème siècle. Cette réalité a conduit les zones désertiques à dépendre entièrement de ce type d'énergie, ce qui a triplé la production d'électricité pour les bâtiments au cours de ces dernières années. Car, la société algérienne, en seulement quelques années, a totalement changé son mode de vie traditionnel en devenant dépendante et consommatrice de la technologie qui génère une forte consommation énergétique dans le bâtiment. Cette soumission est réellement exprimée dans l'utilisation massive de la climatisation, vu les conditions climatiques des régions sahariennes, surtout durant la période estivale.

Afin d'assurer une efficacité énergétique dans ces bâtiments, l'Etat doit fournir suffisamment d'efforts afin de rechercher et d'appliquer des méthodes d'optimisation de la performance énergétique dans le secteur du bâtiment dans ces régions. Pour arriver à cet objectif, le bâtiment saharien doit assurer les besoins d'éclairage, de refroidissement, et de chauffage, en répondant aux exigences d'assurer des espaces intérieurs confortables et sains tout en diminuant la facture d'électricité et de gaz. Cette vision d'efficacité énergétique pourra être assurée par l'utilisation des énergies renouvelables et des techniques de construction passive au niveau de l'enveloppe extérieurs des bâtiments, et avec la participation d'une équipe pluridisciplinaire (Cantin et al. 2005). Maintenant, il devient primordial d'introduire l'audit énergétique dans le secteur résidentiel qui est limité dans le secteur industriel. L'auditeur énergétique dans le bâtiment doit s'imposer en urgence comme une nécessité d'efficacité énergétique dans le Sud de l'Algérie.

2. Confort thermique dans le bâtiment

2.1. Définition

Le confort thermique est une sensation de satisfaction du corps humain et de l'état d'esprit qui exprime son bien-être vis-à-vis d'un environnement thermique (ASHRAE, 1997). C'est un ensemble de sensations subjectives appréciées uniquement si le corps est dans un état

d'inconfort. Givoni a défini le confort thermique comme étant les conditions pour lesquelles les mécanismes d'autorégulation du corps humain seront à un niveau d'activité minimale (Givoni, 1978). D'après lui « *Le maintien de l'équilibre thermique entre le corps humain et son environnement est l'une des principales exigences pour la santé, le bien-être et le confort* ».

Le confort thermique dans le bâtiment est une sensation indispensable qui peut avoir un impact non négligeable sur la santé. Son objectif est d'assurer une sensation de chaleur en hiver et une sensation de fraîcheur en été. Cet enjeu demande une maîtrise et un savoir-faire de la conception durable. Ce savoir-faire est obligatoire non seulement pour les ambiances intérieures, mais aussi pour la consommation d'énergie fournie afin d'assurer la sensation de confort thermique (Roulet, 2010).

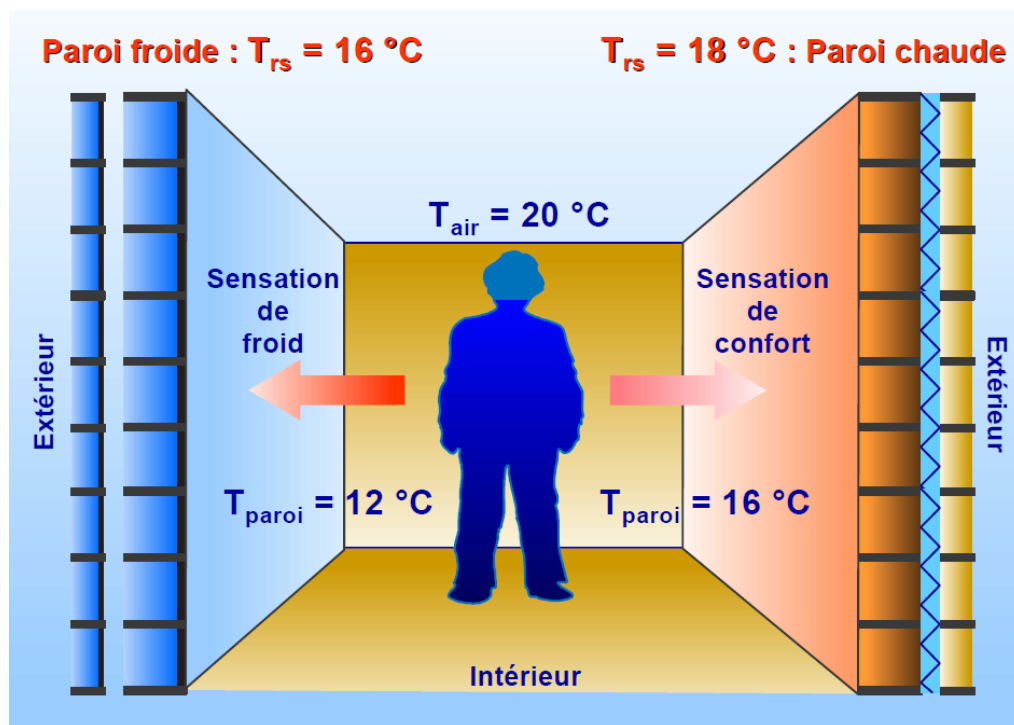


Figure 2. 8 : Sensation de confort et équilibre thermique entre le corps humain

et son environnement (source : Herde et Liébard, 2005).

2.2. Notions d'évaluation du confort thermique dans le bâtiment

Un bâtiment durable doit assurer des ambiances intérieures saines avec une sensation de confort. Cette sensation dépend de plusieurs facteurs environnementaux tels que la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse de l'air et l'intensité du rayonnement

reçu par le corps humain (Givoni, 1979), ainsi que d'autres facteurs physiques, physiologiques, et psychologiques spécifiques à chaque individu, qui ne sont pas identiques pour tous.

L'évaluation du confort thermique ne peut pas être faite au moyen d'un seul facteur environnemental ou physique, mais par un ensemble de facteurs combinés. De nombreux chercheurs ont essayé d'évaluer le confort thermique avec des indices, comme le montrent Olgyay (1970) et Givoni (1978) qui ont exploité le climat, le confort, et l'architecture afin d'évaluer le confort thermique par des solutions technologiques et architecturales.

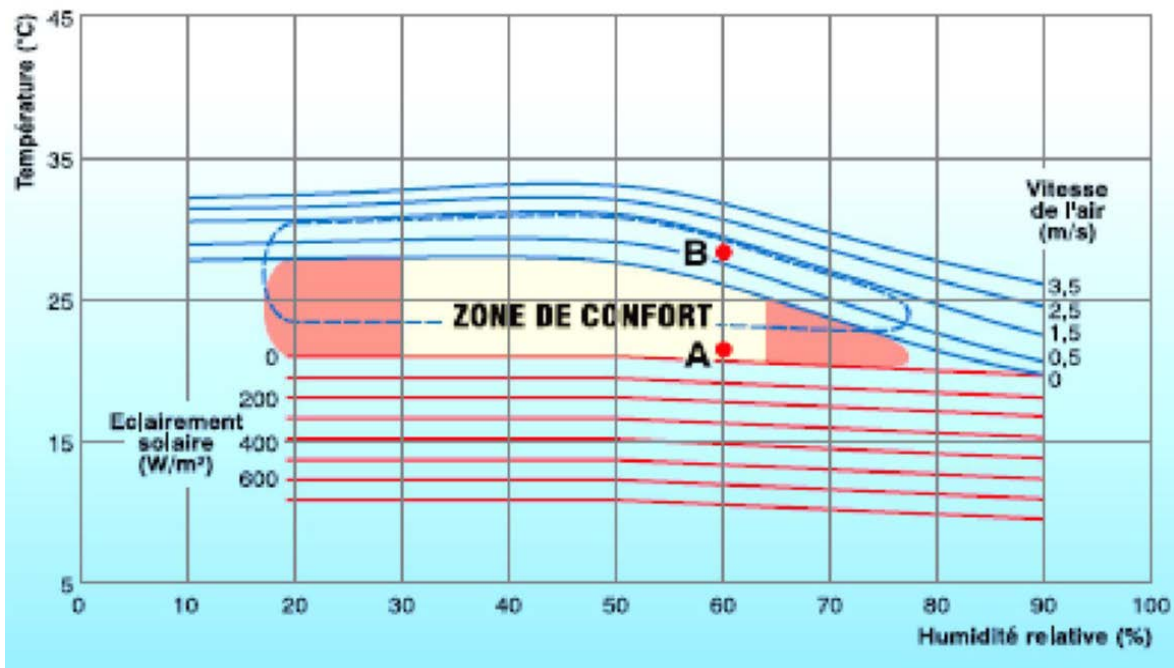


Figure 2. 9 : Zone de confort thermique D'après Olgyay

(source : Herde et Liébard, 2005).

Selon Latini (2010), les indices de confort thermiques sont classés sur la base des facteurs d'impact utilisés dans l'évaluation de confort :

2.2.1. Indices thermiques empirique

Ils entrent dans l'évaluation de quelques paramètres climatiques. Ce type d'indice est généralement élaboré pour des climats spécifiques. Parmi ces indices nous avons l'indice de refroidissement éolien de Siple et Passel (1945) et l'inconfort index de Thom et Bosen (1959).

2.2.2. Indices psycho-socio-climatiques

Ils sont établis sur la base de questionnaires avec les utilisateurs des espaces publics extérieurs. Ce type d'indice indique le rapport entre la sensation subjective et les facteurs climatiques, tel que l'indice ASV (Actual Sensation Vote).

2.2.3. Indices de l'équation du bilan énergétique

Ils reposent sur le modèle simplifié des échanges thermiques du corps humain avec tous les paramètres climatiques environnementaux. Ce type d'indice évalue la sensation du confort à travers la simplification des modèles d'échange de chaleur. Parmi ces indices, le Perceived temperature-PT- qui correspond au modèle de Fanger, ou l'indice COMfort Formula -COMFA- de R. BROWN qui représente un modèle simplifié évaluant la sensation du confort à travers le budget énergétique acquis par le corps humain (Boukhelkhal, 2014).

2.2.4. Indices de l'équation du bilan thermique

Ils sont basés sur des scénarios climatiques assemblés avec des modèles de corps humain suivant différents habillements et différentes activités physiques.

Les recherches ont montrés qu'il existe plusieurs indices de confort thermiques destinés aux conditions intérieures, tels que le vote moyen prévisible (PMV), la température effective standard (SET) et la température opérative (OT). En outre, d'autres indices sont particulièrement conçus pour les ambiances extérieures, tels que la température potentielle (PT), basée sur l'équation de confort de Fanger, et le OUT_SET qui est destiné aux conditions intérieures SET, et qui a été inséré selon les conditions d'utilisation des espaces extérieurs, ou la température équivalente physiologique PET (Boukhelkhal, 2014). Dans le secteur du bâtiment, les indices d'évaluation du confort thermiques les plus utilisées sont :

- **La température effective ET** : élaboré par F. Houghton et C. Yaglou en 1923, cet indice indique la sensation de confort thermique après une exposition aux facteurs climatiques.
- **Le vote moyen prévisible PMV** : élaboré à partir de l'équation d'équilibre thermique de Fanger, cet indice peut évaluer l'ambiance thermique à travers la combinaison des facteurs climatiques tels que la température, l'humidité et la vitesse de l'air, avec les facteurs individuels de chaque personne comme

l'habillement et l'activité physique. Le PMV se mesure sur une échelle de sept niveaux de sensation thermique.

Tableau 2. 1 : Echelle de sensation thermique selon l'indice PMV.

Froid	Fais	Légèrement frais	Neutre	Légèrement tiède	Tiède	chaud
-3	-2	-1	0	+1	+2	+3

- **Le pourcentage prévisible d'insatisfaits PPD :** élaboré par la norme internationale (ISO 7730), c'est un indice qui calcule des données sur l'insatisfaction thermique, en évaluant le pourcentage des êtres humains susceptibles d'avoir chaud ou froid avec des intensités différentes dans une ambiance donnée (ISO 7730, 2005).

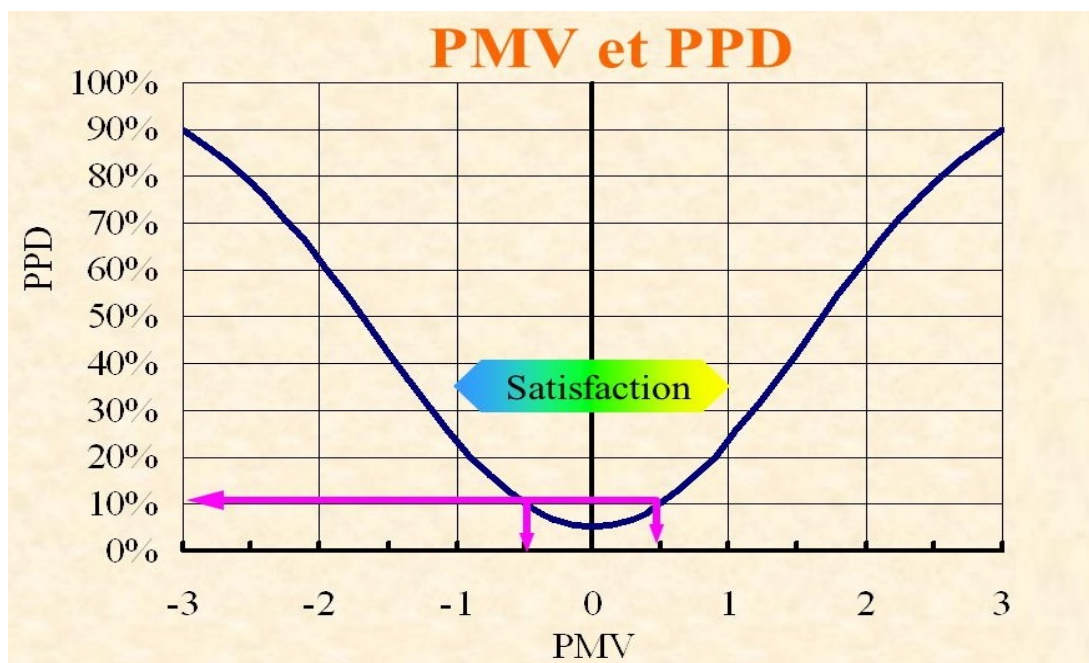


Figure 2. 10 : Graphique du pourcentage de l'indice PPD calculé en fonction du PMV.

(source : Éditée par l'auteur, 2021).

- **La Température Physiologique Équivalente PET :** qui est un indice d'évaluation de sensation thermique, en intégrant la température de la peau, la transpiration, et la vêtue.

- **La température du globe :** appelé aussi l'indice de température au thermomètre-globe, c'est un indice de confort ressentie qui estime les effets de la température moyenne radiante et du rayonnement solaire sur l'homme. Le stress thermique est déterminé en utilisant une sphère de cuivre noir de 15,2 cm de diamètre avec une thermistance à l'intérieur.



Figure 2. 11 : Capteur de la température de globe avec une thermistance à l'intérieur.

(source : Éditée par l'auteur, 2020).

- **La température opérative :** déterminé par la norme ISO 7730 en évaluant la sensation du confort thermique, cet indice combine plusieurs conditions désignées par les facteurs climatiques, l'habillement et l'activité physique.

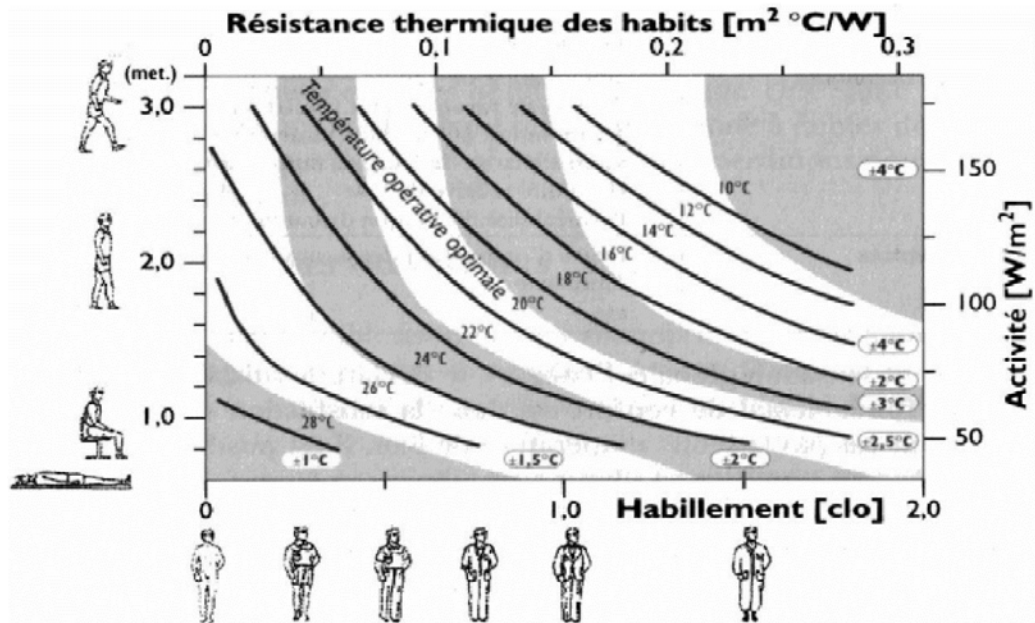


Figure 2. 12 : Température Opérative optimale selon l'habillement et le métabolisme

(source : ader.ch, 2013)

3. Concepts sur le transfert de chaleurs dans le mur

3.1. Les différents modes de transfert de chaleurs dans le mur

Le transfert de chaleur est un mode d'échange énergétique basé sur le principe de la thermodynamique. Le principe de cet échange permet de déplacer un flux de chaleur ou de le transformer sous une autre forme énergétique depuis un corps (ou une ambiance) plus chaude vers une autre plus froid jusqu'à ce que les deux corps se retrouvent à une température égale. Le transfert de chaleur à travers un revêtement extérieur d'une paroi de bâtiment peut être assuré selon trois modes d'échanges thermiques qui sont :

3.1.1. Le transfert par conduction

Ce type de transfert de chaleur est assuré par la diffusion de la chaleur à travers la matière opaque. Dans le cas du revêtement extérieur, les molécules des matériaux de revêtements transportent le flux de chaleur vers les couches intérieures de la paroi ou vers l'espace extérieur.

3.1.2. Le transfert par convection

Ce type de transfert se présente sous forme de propagation de chaleur dans un fluide gazeux ou liquide en mouvement. Dans le cas de transfert au niveau des revêtements extérieurs, la propagation d'énergie peut survenir par convection entre la couche extérieure du revêtement et l'air extérieur qui est en contact avec cette couche. La vitesse de l'air joue un rôle important sur l'augmentation ou la diminution du taux de transfert par convection entre le revêtement et l'air extérieur.

3.1.3. Le transfert par rayonnement

Il s'exprime sous forme d'échange d'énergie électromagnétique entre deux corps de différentes températures, sans intervention de l'espace intermédiaire. Par exemple, dans le cas des revêtements extérieurs du bâtiment, un échange thermique par rayonnement se produit entre le soleil et la surface externe de ce revêtement qui peut acquérir une quantité d'énergie depuis le soleil sans avoir recours à la température de l'atmosphère intermédiaire.

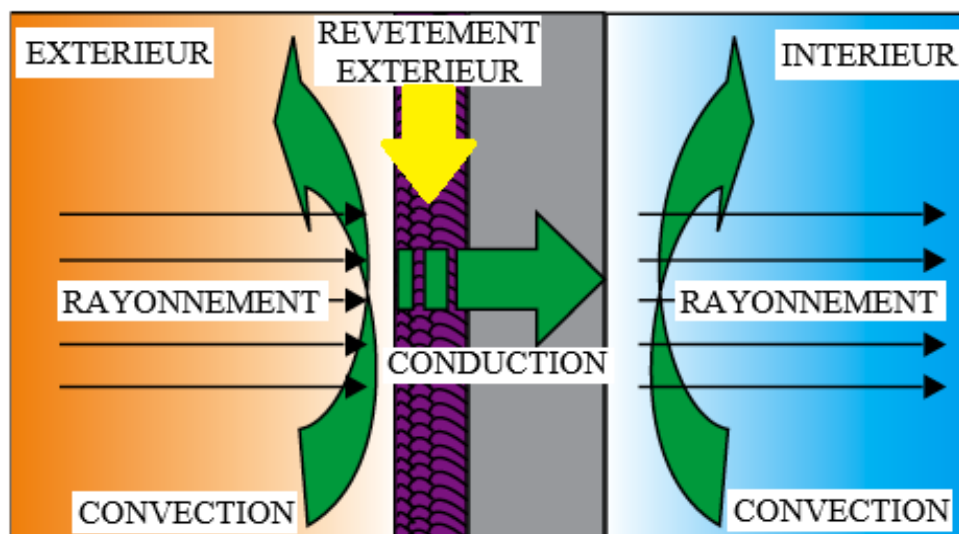


Figure 2. 13 : Différents modes de transfert de chaleur à travers un revêtement extérieur

(source : Éditée par l'auteur, 2021)

D'une manière générale, le flux de chaleur traversant un revêtement extérieur prend souvent la combinaison des trois modes de transfert cités ci-dessus. L'énergie solaire acquise par la surface externe du revêtement par rayonnement ou par convection avec l'air

extérieur sera diffusée en plusieurs parties : Une partie de cette énergie sera réfléchi à l'extérieur, une autre sera absorbée par le revêtement sous forme de chaleur, et la plus grande partie sera transportée à travers les molécules de ce revêtement par conduction vers les couches interne de la paroi extérieure. Ce flux de chaleur continuera cette propagation jusqu'à aboutir à l'air intérieur du bâtiment par convection ou par rayonnement pour les autres surfaces intérieures (Givoni, 1978).

3.2. Le coefficient de transmission thermique (U -value)

Le coefficient de transmission thermique est un facteur qui détermine la quantité de chaleur qui traverse par unité de temps, une paroi d'une surface de 1 m² à condition que la différence entre les deux extrémités de cette paroi soit de 1°C. Ce facteur est exprimé en Watt (W). Dans le cas d'un revêtement extérieur, le coefficient de transmission thermique est la quantité de chaleur traversant la couche du revêtement en régime permanent, depuis la limite extérieure jusqu'à la limite intérieure du revêtement.

3.3. La résistance thermique (R -value)

La résistance thermique est l'une des propriétés les plus importantes à identifier. C'est un facteur qui évalue l'opposition à un flux de chaleur entre deux extrémités entre lesquelles s'effectue un transfert thermique. Ce facteur est exprimé en m². K/W, il est considéré comme l'inverse du coefficient de transmission thermique, étant donné qu'en augmentant sa valeur, la qualité d'isolation augmente davantage. Dans le cas des revêtements extérieurs, la résistance thermique est définie par la résistance au passage d'un flux thermique à travers les deux extrémités de ce revêtement. Elle joue un rôle primordial dans l'isolement et l'augmentation des performances thermiques de l'enveloppe extérieure du bâtiment, et elle dépend de la capacité thermique du matériau et de son épaisseur.

3.4. La densité du flux thermique Q

La densité du flux thermique est considérée comme le taux de transfert de chaleur par unité de surface perpendiculaire à la direction du transfert de chaleur. Ce facteur correspond à une quantité vectorielle qui a une direction et une magnitude, il est exprimé en watts par mètre carré (W/m²) donc :

$$Q = \Phi/S \dots\dots\dots(02)$$

Soit : Φ le flux thermique exprimé en watts, il représente la puissance qui traverse une surface au cours d'un transfert thermique, et S est la surface exprimée en mètre carrés.

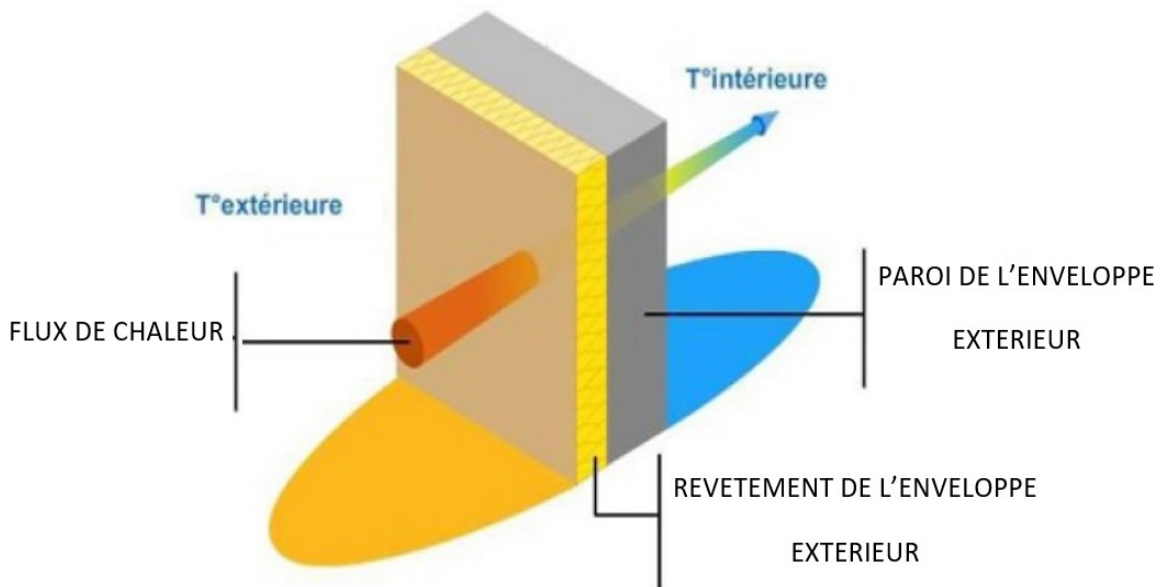


Figure 2. 14 : Densité du flux de chaleur traversant un revêtement extérieur.

(source : Éditée par l'auteur, 2021)

3.5. Le coefficient de transfert thermique par rayonnement h_r

Le coefficient de transfert thermique par rayonnement h_r , détermine la latitude avec laquelle l'énergie thermique se transforme par rayonnement d'un milieu ou d'une surface opaque à une autre. Ce facteur est exprimé par $W/m^2 \cdot K$ et égale à :

$$h_r = 4 \cdot \sigma \cdot T_m^3 \dots\dots\dots(03)$$

Soit :

σ la constante de Stefan-Boltzmann : $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} (W/(m^2 \cdot K^4))$ et $T_m = 1/2(T_r + T_s)$ exprimé en kelvins. Le coefficient de transfert thermique par rayonnement h_r se détermine par l'émittance spatiale qui intègre les facteurs de vue et les émissivités de toutes les surfaces concernées, à cause des couleurs, et des matériaux des surfaces exposées au rayonnement (ISO 9869-1 :2014).

3.6. Le coefficient de transfert thermique par convection h_c

Le coefficient de transfert thermique par convection h_c , détermine la latitude avec laquelle l'énergie thermique se transforme par convection entre un milieu fluide ou gazeux, et une surface opaque. Le coefficient de transfert thermique par convection h_c se détermine par la nature de la texture de la surface opaque s'il s'agit d'une texture lisse ou rugueuse (ISO 9869-1 :2014). Ce coefficient peut être calculé par le modèle de McAdams qui définit h_c extérieur selon la texture lisse ou rugueuse (ISO 9869-1 :2014) :

$$h_c = 5.678 \left[m + n \left(\frac{V_f}{0.3048} \right)^p \right] \dots\dots\dots(04)$$

Avec : m, n, p les paramètres de rugosité des surfaces lisses et rugueuses données dans le (Tableau 2. 2) suivant :

Tableau 2. 2: Paramètres de rugosité des surfaces dans le modèle de McAdams.

Type de surface extérieure	$V_f < 4.88 \text{ m/s}$			$4.88 \text{ m/s} \leq V_f < 30.48 \text{ m/s}$		
	m	n	p	m	n	p
Surface lisse	0.99	0.21	1	0	0.50	0.78
Surface rugueuse	1.09	0.23	1	0	0.53	0.78

Il faut noter que, selon le modèle donné par McAdams, le $h_{c,ext}$ pour les surfaces rugueuses est d'environ 6 à 10% plus élevé que pour les surfaces lisses, pour une vitesse du vent de 0 à 15 m/s.

4. Protocoles de mesure et standards internationaux de transfert de chaleur pour l'enveloppe du bâtiment

La température de surface qui se manifeste dans l'enveloppe du bâtiment peut entraîner une sensation d'inconfort thermique pour l'homme, résultant d'une consommation d'énergie trop élevée. De ce fait, il était nécessaire de procurer des conseils et instructions par les normes internationales afin de contrôler le flux de chaleur traversant cette enveloppe extérieure, et qui ont prouvé un fonctionnement efficace (Kazemi et al. 2020).

Les mesures de transfert de chaleur pour l'enveloppe du bâtiment sont effectuées au moyen de plusieurs méthodes selon des normes internationales, avec de multitude d'instruments scientifiques et professionnels :

4.1. La norme ISO 9869-1

Ce standard international décrit la méthode du débitmètre thermique pour le mesurage des propriétés de transmission thermique des éléments de construction, constitués principalement par rapport au flux thermique de couches opaques perpendiculaires et sans avoir un flux thermique latéral significatif. Dans cette norme, la résistance thermique d'un mur est mesurée à l'aide de deux thermocouples placés l'un en face de l'autre sur les deux côtés du mur, et d'un capteur de flux thermique installé à côté du thermocouple d'un côté. Par conséquent pour assurer une grande stabilité de température, il est préférable de le placer du côté intérieur.

La méthode de mesure par débitmètre thermique convient également aux composants constitués de couches quasi homogènes, perpendiculaires au flux thermique, à condition que les dimensions de toute inhomogénéité à proximité immédiate du débitmètre thermique (HFS) soient suffisamment inférieures à ses dimensions latérales, sans avoir de ponts thermiques détectables par thermographie infrarouge (ISO 9869-1 :2014).

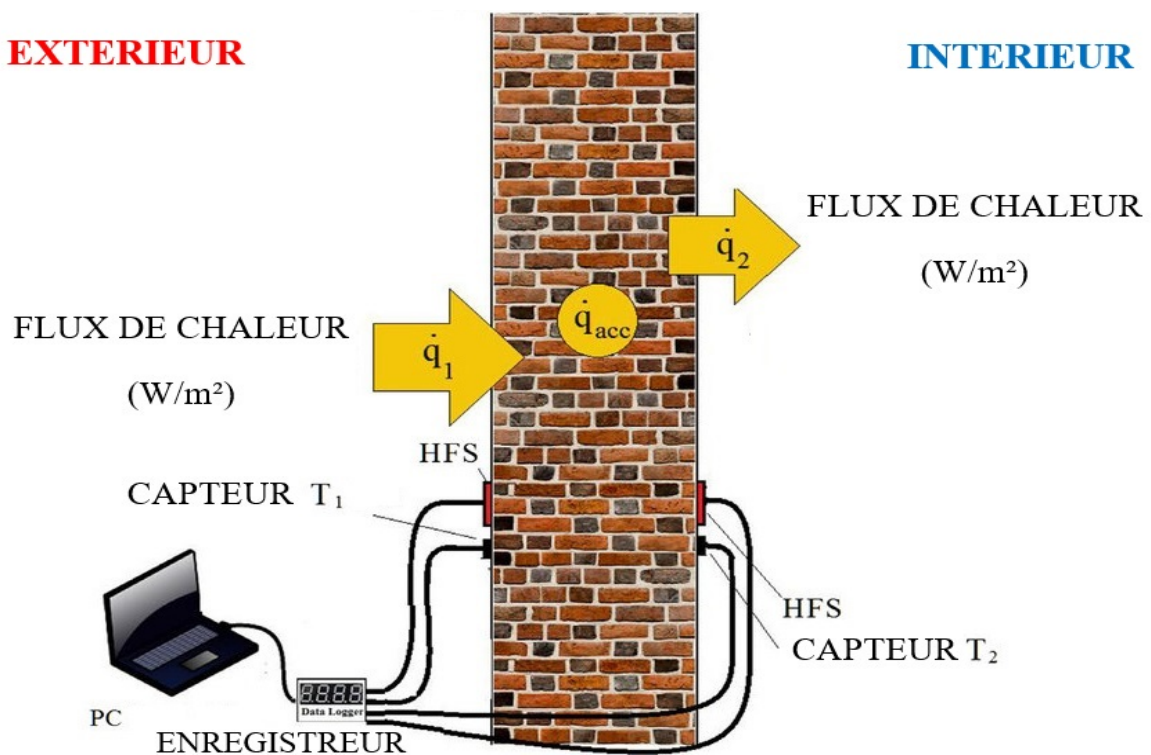


Figure 2. 15 : Principe de fonctionnement de la méthode du débitmètre thermique.

(source : Éditée par l'auteur, 2021)

Ce standard décrit l'appareil à utiliser, la procédure d'étalonnage de l'appareil, l'installation et les procédures de mesure, l'analyse des données, y compris la correction des erreurs systématiques. Cette norme présente deux méthodes pour mesurer la valeur de la résistance thermique R_c -value : la méthode moyenne et la méthode dynamique, comme décrit ci-dessous :

4.1.1. Méthode moyenne

La méthode moyenne de la norme ISO 9869-Partie 1: 2014 est généralement suivie dans la mesure in situ de la résistance thermique R_c -value et la transmittance thermique U-value des composants de l'enveloppe du bâtiment. Dans cette méthode, le R_c -value d'un mur est basée sur les mesures de ΔT (le gradient de température de surface), q (le flux de chaleur) et t (l'intervalle de temps). Elle peut être dérivée comme suit (ISO 9869-1 :2014) :

$$R_c = \frac{\sum_{t=0}^m \Delta T^t}{\sum_{t=0}^m q^t} \dots\dots\dots(05)$$

Pour rapporter une valeur R_c -value acceptable basée sur la méthode moyenne, les principaux critères à remplir afin d'arrêter la mesure sont les suivants :

- La période de mesure doit durer au moins 72 h
- La valeur calculée à la fin de l'ensemble de mesures ne doit pas s'écarter de plus de $\pm 5\%$ de la valeur respective obtenue 24 h auparavant.
- La valeur résultante lors de l'application de la méthode aux premiers 67% des données ne doit pas s'écarter de plus de $\pm 5\%$ de la valeur respective lors de l'analyse des derniers 67% des données.
- La variation de la chaleur emmagasinée dans le mur ne doit pas dépasser 5 % de la chaleur traversant le mur sur la période de mesures.

Pour plus de détail, voir Standard ISO 9869-1 :2014 qui fournit plus d'explication et de détail. Ainsi, les recommandations conformément à la norme ISO 9869-Partie 1: 2014 doivent être respectées pour le placement des capteurs et des appareils utilisés, la procédure d'étalonnage des appareils, la durée de mesure, la localisation et la précision des capteurs, l'enregistrement des données et l'intervalle d'enregistrement.

Selon cette méthode, si les paramètres environnementaux des deux côtés sont convenablement définis, la résistance thermique R_c -value sera calculée selon les formules suivantes :

$$R = \frac{\sum_{j=1}^n (T_{sij} - T_{sej})}{\sum_{j=1}^n q_j} \dots\dots\dots(05)$$

Lorsque la température moyenne radiante vue par la surface peut être définie, la densité du débit de chaleur q peut être définie par :

$$q = E \cdot h_r \cdot (T_r - T_s) + h_c \cdot (T_a - T_s) \dots\dots\dots(06)$$

Soit :

T_r : la température moyenne radiante vue par la surface (C° ou K).

T_a : la température de l'air à proximité de la surface (C° ou K).

T_s : la température de surface (C° ou K).

E : l'émittance spatiale, qui intègre les facteurs de vue et les émissivités de toutes les surfaces concernées. Par exemple pour le polystyrène $E = 0.97$

h_r : est le coefficient de transfert de rayonnement.

4.1.2. Méthode dynamique :

Dans la méthode dynamique, le flux thermique de la paroi interne q_i (W/m^2) à chaque intervalle de temps t_i est calculé par l'équation suivante :

$$q_i = \frac{1}{R} (T_{si} - T_{se}) + K_1 \dot{T}_{si} + K_2 \dot{T}_{se} + \sum_n P_n \sum_{j=i-p}^{i-1} \dot{T}_{sj} (1 - \beta_n) \beta_n (i-j) + \sum_n Q_n \sum_{j=i-p}^{i-1} \dot{T}_{sej} (1 - \beta_n) \beta_n (i-j) \dots\dots\dots(07)$$

Un système linéaire d'équations est créé et exprimé sous forme matricielle comme :

$$\vec{q} = X \cdot \vec{Z} \dots\dots\dots(08)$$

Avec:

\vec{Z} : un tableau comprenant tous les paramètres inconnus, y compris les valeurs R et X qui sont la matrice contenant les températures mesurées avec leurs dérivées.

La solution qui minimise la somme des différences $S^2 = (\mathbf{q}_{i,calc} - \mathbf{q}_i)^2$ entre les flux thermiques calculés et expérimentaux est calculée en résolvant l'équation suivante :

$$\vec{Z} = [(X)'(X)]^{-1}(X)'\vec{q} \dots\dots\dots(09)$$

Pour obtenir R_c -value acceptable basée sur la méthode dynamique, les principaux critères à remplir pour mesurer sont les suivants:

- La qualité de l'ajustement entre les taux et les valeurs expérimentales et calculées du flux de chaleur indique la précision du résultat.
- L'incertitude (telle qu'elle est définie par la norme) doit être inférieure à 10 % pour une probabilité de 0, 90 (Voir Standard ISO 9869-1 :2014).

4.2. La norme ASTM C 1155-95

Ce standard international décrit la manière pour obtenir et utiliser les données de mesures in situ des températures et des flux de chaleur sur les enveloppes extérieures des bâtiments afin de calculer la résistance thermique R_c -value. Cette norme fournit une estimation de cette valeur pour la plage des températures rencontrées lors de la mesure des températures et du flux de chaleur. Les équipements de mesure peuvent être installés selon la norme ASTM C 1046-91 (2001) qui introduit les méthodes de sommation et de somme des moindres carrés (Kazemi et al. 2020). Ces méthodes nécessitent la mesure de la température de surface interne et externe et du flux de chaleur interne pendant au moins trois jours telles que décrites dans les deux méthodes ci-dessous :

4.2.1. Méthode de sommation

Dans la méthode de sommation, la R_c -value d'un mur qui est basée sur les mesures de ΔT (le gradient de température de surface), q (le flux de chaleur) et t (l'intervalle de temps), peut être dérivée comme suit :

$$R_c = \frac{\sum_{t=0}^m \Delta T^t}{\sum_{t=0}^m q^t} \dots\dots\dots(05)$$

Afin d'avoir des résultats de la résistance thermique R_c -value, un facteur de convergence (CR_n) est défini comme :

$$CR_n = \frac{R(t) - R(t-n)}{R(t)} \dots\dots\dots(10)$$

Avec:

- La valeur n qui est un intervalle de temps choisi par l'utilisateur et qui varie entre 6 et 48 h.
- Le facteur CR_n doit rester inférieur à 0,10 pendant au moins 3 périodes de n.
- Le coefficient de variation des résultats doit être inférieur à 10 %.

4.2.2 Méthode de la somme des moindres carrés

Selon la méthode qui définit la somme des moindres carrés, pour estimer R_c -value, la maçonnerie est supposée être thermiquement équivalente à un mur homogène, une couche avec l'épaisseur réelle d, et des propriétés thermiques inconnues.

L'équation régissant le transfert de chaleur par conduction dans la paroi supposée est:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{eq} \frac{\partial T}{\partial x} \right) = (\rho C_p)_{eq} \frac{\partial T}{\partial t} \dots\dots\dots(11)$$

Avec :

k_{eq} et $(C_p)_{eq}$ respectivement la conductivité thermique et la capacité thermique de la paroi équivalente.

L'équation peut être résolue avec la méthode de Crank-Nicholson, en supposant les propriétés thermiques k_{eq} et $(C_p)_{eq}$, et en définissant les données de mesure comme conditions aux limites. Les valeurs calculées du flux de chaleur ou de la température sont comparées aux valeurs expérimentales.

Pour rapporter une valeur de R_c -value acceptable basée sur la méthode dynamique, le critère principal pour remplir la mesure est le suivant :

- La qualité de l'ajustement entre les valeurs et taux expérimentaux et calculée du flux de chaleur, indique la précision du résultat.
- L'incertitude reste dans les 10% à un intervalle de confiance de 95%.

4.3. Dispositifs de mesure du transfert de chaleur pour l'enveloppe du bâtiment

Afin de calculer la résistance et la transmittance thermique à travers l'enveloppe extérieure du bâtiment, deux dispositifs d'instruments sont disponibles :

Le premier est le débitmètre de chaleur qui est considéré comme un instrument mobile utilisé directement sur la paroi extérieure du bâtiment. C'est un instrument avec des capteurs permettant de mesurer directement le flux de chaleur. L'opération consiste à détecter la différence de température des deux extrémités de la paroi quand l'énergie thermique la traverse. Cet appareil permet de mesurer R_c -value et U-value avec une précision supérieure, et il convient à une utilisation à long terme sur un seul emplacement, ainsi qu'à une installation répétée lorsqu'un système de mesure est utilisé à plusieurs endroits. Les capteurs de flux thermique de cet instrument calculent directement le flux de chaleur en Km^2/W qu'il soit du côté extérieur du mur, ou à la fois des deux côtés extérieur et intérieur pour donner une moyenne de la convergence. Ce calcul peut être obtenu aussi par la méthode moyenne, à travers l'utilisation des capteurs de température surfacique et de température de l'air sur les deux côtés de la paroi, ainsi qu'avec des capteurs de globe noir afin de calculer la température du globe noir et la température moyenne radiante T_{mrt} de part et d'autres. Après avoir obtenu ces paramètres, le calcul de la convergence de R_c -value peut être évalué à l'aide de la méthode moyenne donnée par la norme ISO 9869-1 (2014).



Figure 2. 16 : Dispositifs de mesure du transfert de chaleur dans le mur.

(source : GreenTEG et Hukseflux, 2020)

Le deuxième dispositif est le débitmètre de chaleur fixe au niveau des laboratoires. Cet appareil sert d'outil pour mesurer le coefficient de conductivité thermique des matériaux de construction. Dans ce dispositif, l'échantillon du matériau de la paroi peut être placé entre les deux côtés froid et chaud afin de l'exposer au changement des températures. Ce dispositif thermique est capable de mesurer la conductivité thermique de l'échantillon à l'aide d'un capteur installé dans son fond (Kazemi et al. 2020). Par conséquent, cet appareil permet de mesurer la conductivité thermique des matériaux, qui peut être convertie en flux de chaleur.



Figure 2. 17 : Dispositifs de mesure du transfert d'humidité dans le mur.

(source : Éditée par l'auteur, 2020)

5. Protocoles de mesures du transfert d'humidité pour l'enveloppe du bâtiment

Le taux d'humidité qui s'accumule dans le bâtiment peut engendrer des dégradations aux matériaux de construction de la paroi, la sensation d'inconfort, et des conséquences néfastes sur la santé humaine. Les mesures de transfert d'humidité dans les murs sont effectuées au moyen de plusieurs méthodes telles que :

5.1. La méthode gravimétrique

La « méthode gravimétrique » est généralement considérée comme la plus fiable lors de l'évaluation de la teneur en humidité des murs. Le terme Gravimétrique signifie "relatif à la mesure du poids", Cette méthode consiste à prélever de la poudre ou des morceaux solides de la maçonnerie, suivi d'une détermination gravimétrique du taux d'humidité de l'échantillon après séchage (Kazemi et al. 2020). En raison de la taille des échantillons nécessaires, cette méthode peut être considérée comme peu invasive.

Cette procédure consiste à extraire un échantillonnage du matériau de la paroi au moyen d'un forage à sec. Un forage plein ou un forage creux (carottage) peut être utilisé. La recommandation italienne NORMAL 40/93 rapporte « l'utilisation d'un forage à basse

vitesse pour l'échantillonnage des matériaux est recommandée afin d'éviter l'échauffement des échantillons et la perte d'humidité par évaporation, ainsi qu'un choix judicieux des points d'échantillonnage et une normalisation appropriée de l'ensemble de la procédure de mesure ». Le forage doit être effectué à différentes hauteurs (par exemple 0,2, 0,5, 1, 1,5 m jusqu'à la zone non endommagée) et profondeurs (0-20 mm, 20-50 mm, 50-100 cm jusqu'au milieu du mur) le long d'un profil vertical. Puisque le taux d'humidité dépend également du type de matériau, il est recommandé de prélever des échantillons dans le même type de matériau (brique, pierre ou mortier) à différentes hauteurs. Les échantillons, qui doivent avoir un poids d'au moins 1-2 g, sont collectés dans des bouteilles ou des sacs en plastique, qui sont hermétiquement fermés et transportés au laboratoire.

Lorsque le prélèvement est répété après une intervention contre les remontées d'humidité dans le but d'évaluer son efficacité, il est important qu'il se fasse sur le même ensemble percé avant l'intervention, car l'hétérogénéité des matériaux de construction peut conduire à des différences significatives dans leur teneur en humidité.

Le Comité Européen de Normalisation (CEN) dans les normes établies axées sur la mesure de la teneur en humidité dans les matériaux du patrimoine culturel, recommandent d'évaluer la teneur en humidité dans les murs avec une description détaillée de l'échantillonnage et de l'interprétation des données afin de fournir plus d'informations sur cette méthode (Walker et al. 2016). Par conséquent, des informations sur le type de matériau et sur la présence de dommages doivent également être rapportées, afin d'interpréter correctement les résultats.



Figure 2. 18 : Exemple de prélèvement d'un échantillon de paroi
(source : Éditée par l'auteur, 2020)

5.2. Dispositifs de mesure du transfert d'humidité dans le mur

Afin de mesurer la teneur en humidité dans la paroi par la méthode gravimétrique, un appareil est utilisé au niveau du laboratoire sous forme de four pour le séchage après extraction des échantillons au moyen de forage à froid. Cet appareil permet de sécher les échantillons à l'étuve à 105°C pendant 24 heures. La teneur en humidité (MC) sera donc mesurée selon l'équation suivante (Kazemi et al. 2020) :

$$MC = [(\text{poids humide} - \text{poids sec}) / \text{poids sec}] \times 100 \% \quad \dots\dots\dots(12)$$



Figure 2. 19 : Four pour le séchage des échantillons de la paroi à 105 °c.

(source : Éditée par l'auteur, 2020)

Conclusion

En été, l'habitant des régions sahariennes en Algérie passe la majorité de sa journée au sein des espaces intérieurs des bâtiments, dont les ambiances jouent un rôle primordial sur la sensation thermique du corps. Il est donc important d'adapter convenablement l'enveloppe extérieure de ces bâtiments qui assurent un rôle prépondérant dans la détermination du confort thermique.

La première partie de ce chapitre constitue une approche sommaire sur les concepts du climat et du confort thermique dans les régions du Sud de l'Algérie. Il expose aussi une

approche analytique sur les différentes caractéristiques climatiques de la région, telles que Béchar, Ghardaïa, et Boussaâda, où le climat se présente comme désertique, considérablement austère et dur à cause du rayonnement solaire, des températures extrêmement élevées, avec un taux d'humidité et des précipitations insuffisantes. L'efficacité énergétique des bâtiments de ces régions reste défectueuse, la plupart entre eux sont largement consommateurs en matière d'énergie. Cependant, faire face à ces défis nécessite un savoir-faire et des techniques bioclimatiques qui contrôlent et protègent l'enveloppe extérieure à l'égard d'une utilisation efficace des énergies renouvelables susceptibles de créer des conditions de confort. Cette démarche devra être également accompagnée par la volonté de l'Etat d'admettre ces stratégies et techniques utilisées, et d'approuver des textes et des lois relatives à la réglementation thermique qui, malgré leur cadre légal, restent insuffisantes et inefficaces.

La première partie de ce chapitre permet d'apercevoir les règles de l'art et les méthodes utilisées dans les standards internationaux afin de mesurer les différents transferts de chaleur et d'humidité à travers l'enveloppe extérieure du bâtiment, qui détiennent un effet primordial sur l'efficacité énergétique et la sensation du confort thermique.

Dans le but d'évaluer l'effet de la texture du revêtement extérieur sur le transfert thermique dans le bâtiment, le chapitre suivant procédera à un état de l'art, d'abord sur l'impact de l'enveloppe extérieure du bâtiment et son effet sur l'ambiance thermique intérieure, d'une manière générale, et ensuite sur l'effet du revêtement extérieur considéré comme la partie exposée davantage aux conditions climatiques de l'enveloppe du bâtiment et son effet sur le confort thermique ainsi que l'efficacité énergétique du bâtiment.

CHAPITRE III

ETUDES EXPERIMENTALES ET NUMERIQUES

SUR L'ENVELOPPE EXTERIEUR DU BATIMENT

(ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE)

Introduction

Nombreuses sont les défauts liés aux bâtiments à cause de leur enveloppe extérieure, et plus précisément à cause de leur revêtement extérieur, s'il s'agit des problèmes liés au confort ou à l'aspect esthétique du bâtiment. Cette problématique ouvre une brèche pour des thèmes de recherche pertinents pour les spécialistes dans le secteur de bâtiment. L'objectif des architectes et des chercheurs en matière de thermique des bâtiments consisté à régler les problèmes liés à l'enveloppe extérieure vis-à-vis du confort thermique et du développement durable, tout en réduisant la consommation énergétique.

L'état de l'art à venir est consacré aux problèmes liés à l'utilisation du revêtement extérieur et son effet sur le comportement thermique du bâtiment. Il met en lumière les méthodologies appliquées dans les différentes études de l'enveloppe extérieure des bâtiments. Toutefois, avant d'entreprendre cette analyse bibliographique, il est important de préciser que les études portées directement sur le revêtement extérieur des bâtiments et son effet sur la performance énergétique sont quasiment inexistantes par rapport à la disponibilité des documents concernant l'effet de l'enveloppe extérieure d'une manière générale et son effet sur la performance énergétique et le confort thermique du bâtiment. Il faut citer de ce fait les études portées sur l'effet de refroidissement de l'enveloppe à travers plusieurs mécanismes à savoir : l'effet d'auto-ombrage, la couleur, le comportement intelligent contre les rayons solaires, les matériaux et les particules, ainsi que la couverture végétale. Tous ces paramètres ont fait l'objet d'un nombre d'études expérimentales et numériques, afin d'évaluer leur impact sur le confort thermique intérieur et la performance énergétique des bâtiments. Par ailleurs, beaucoup de recherches sont déjà menées sur les protocoles de mesures et les normes de transfert de chaleur et d'humidité à travers l'enveloppe extérieure du bâtiment.

S'appuyant sur un état de l'art des paramètres cités ci-dessus, le présent chapitre a pour objectif d'évaluer la performance énergétique du revêtement extérieur du bâtiment et son effet sur le confort thermique intérieur. Il s'agit donc de faire ressortir les avantages et les inconvénients de la texture de revêtement extérieur, ainsi que les différentes méthodes de mesure développées dans les études précédentes, afin de répertorier les éléments intéressants dans la description de la méthodologie et l'évaluation des résultats de cette étude dans les prochains chapitres.

1. Les revêtements extérieurs

La détermination appropriée du revêtement extérieur peut se présenter sous différentes formes et textures. Ces éléments sont utilisés pour recouvrir, consolider, protéger ou décorer l'enveloppe extérieure. Ils peuvent également influencer la consommation d'énergie et améliorer le confort thermique intérieur. De multiples recherches ont abordé la question du rôle du revêtement extérieur dans le bâtiment afin de faire ressortir ses avantages et ses inconvénients. Parmi ces études, celle de Peeks et Badarnah (2021) qui ont étudié la texture du revêtement de la façade à travers des adaptations morphologiques trouvées dans la nature pour le refroidissement par évaporation. L'étude est basée sur une approche biomimétique afin de développer une solution de conception. L'objectif de cette recherche est d'étudier l'impact de la texture de la surface extérieure de la façade sur les capacités de perte de chaleur par évaporation. Les résultats ont montré que le changement des variables morphologiques de la texture de revêtement tel que l'assemblage et la profondeur, possèdent un impact sur le comportement thermique du bâtiment, en même temps que le rapport entre la surface et le volume a un effet sur les capacités de perte de chaleur selon le degré de rugosité de cette surface. Cette étude démontre l'exploitation potentielle de l'adaptation morphologique de l'enveloppe extérieure du bâtiment, qui pourrait contribuer à son refroidissement passif et réduire les besoins énergétiques en se basant sur de nouvelles solutions thermiques inspirées de la nature.

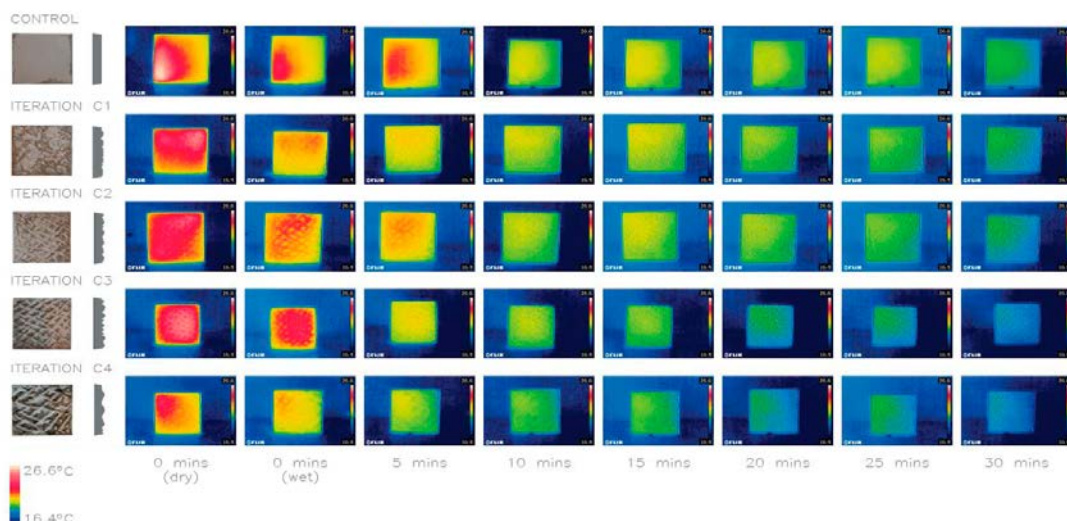


Figure 3. 1 : Images thermiques élaborée par Peeks et Badarnah sur des textures de revêtement de différentes profondeurs et rugosités (source : Peeks et Badarnah, 2021)

(Ascione et al. 2020) ont présenté une étude sur le revêtement extérieur de l'enveloppe du bâtiment pour deux villes différentes, Naples et Istanbul, caractérisées par des climats méditerranéens. Cette étude expose une méthodologie d'optimisation des propriétés thermo-physiques des revêtements extérieurs en termes de résistance thermique et de caractéristiques radiatives des surfaces exposées, en se basant sur une simulation énergétique par le couplage de deux logiciels MATLAB et EnergyPlus. L'objectif était de minimiser la demande énergétique annuelle et de maximiser le confort intérieur dans le bâtiment. La recherche a exploré différentes propriétés thermiques du revêtement, telles que leur aptitude à absorber ou à réfléchir le rayonnement solaire, l'émission infrarouge de l'isolation du revêtement, ainsi que la densité des couches de maçonnerie. Les résultats ont montré que le revêtement avec des matériaux froids ainsi que les revêtements hautement réfléchissant étaient toujours adaptés aux climats chauds, aussi l'isolation des murs devait être élevée, néanmoins sans exagération.

De même, Yuxuan et al. (2020) ont traité les performances d'économie d'énergie des revêtements extérieurs thermo-chromiques pour les bâtiments de Shanghai en Chine. Le constat indique que la température de surface des revêtements thermo-chromiques était inférieure à celle du revêtement ordinaire pendant la période de refroidissement, et est supérieure à celle du revêtement ordinaire pendant la période de chauffage. Les résultats de cette recherche révèlent que la consommation énergétique annuelle pour un immeuble avec un revêtement thermo-chromique est réduite de 5,02 kWh/m² par rapport à celle d'immeuble avec un revêtement ordinaire. Cette consommation conduit à éviter des pénalités d'augmentation de la charge de chauffage par rapport aux autres types de revêtement extérieur. Ces résultats montrent que les revêtements thermo-chromiques ont de meilleurs effets d'économie d'énergie, en particulier pour les régions chaudes en été et froides en hiver.

Ibrahim et al. (2014) ont étudié les performances thermiques de murs extérieurs recouverts d'un revêtement à base d'aérogel de silice, considéré comme un matériau super isolant. L'étude est basée sur la comparaison entre un modèle numérique de transfert de chaleur d'une paroi extérieure multicouche, avec des mesures expérimentales sur site en même temps qu'une paroi extérieure dotée d'un revêtement à base d'aérogel. L'objectif de cette recherche est de découvrir la meilleure composition du revêtement extérieur afin de l'utiliser en tant qu'isolation dans l'enveloppe du bâtiment. Les résultats ont dévoilé que,

pour la plupart des cas étudiés, le revêtement à base d'aérogel présente de meilleures performances par rapport aux autres types de revêtement extérieur.

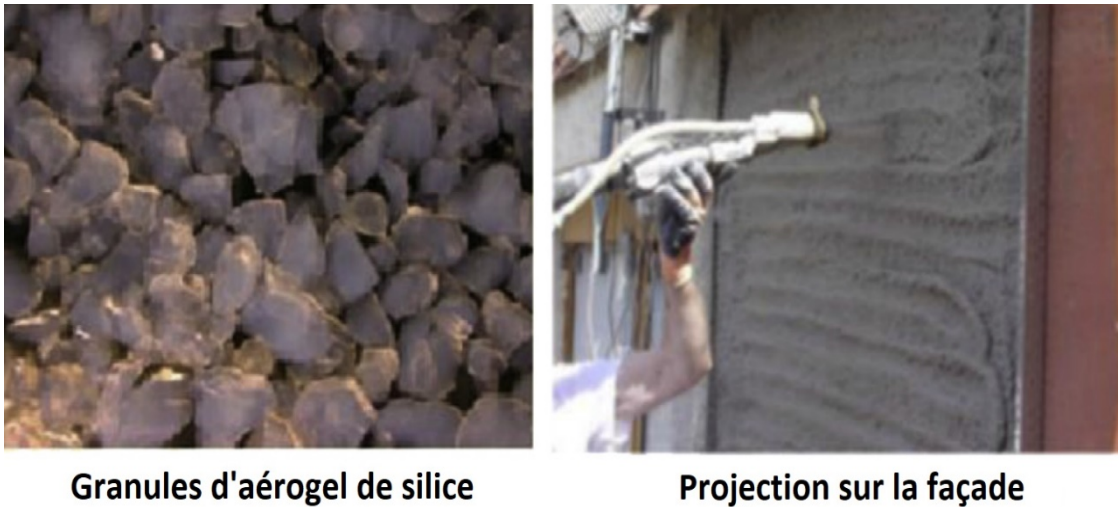


Figure 3. 2 : Le nouveau revêtement à base d'aérogel proposé par Ibrahim et al

(Source : Ibrahim et al. 2014)

Joudi et al. (2013), à leur tour, s'intéressent à l'utilisation de revêtements extérieurs réfléchissants pour améliorer les performances thermiques des bâtiments à travers différents scénarios avec des revêtements réfléchissants. Cette recherche examine le comportement thermique de petites cabines expérimentales avec des revêtements extérieurs réfléchissants à base d'acier avec des performances thermiques améliorées.

L'objectif de cette recherche est de clarifier les économies d'énergie potentielles grâce à des choix intelligents de revêtements. Les résultats ont montré une corrélation entre l'efficacité énergétique du bâtiment et les revêtements utilisés sur les cabines expérimentales.

Khadraoui et al. (2016) ont évalué l'impact d'un revêtement ventilé sur le confort thermique intérieur dans un climat chaud et aride, à Biskra, en Algérie. Cette étude est basée, premièrement sur des mesures in situ sur un cas réel, ensuite sur l'élaboration d'une cellule expérimentale réduite, ainsi qu'une simulation effectuée par le logiciel EnergyPlus ; enfin, par une vérification sous forme de questionnaires afin d'estimer la qualité esthétique de ce type de revêtement de façade. Les résultats ont montré que le bâtiment avec ce système de revêtement était plus performant qu'un bâtiment de référence.

La disposition des éléments de revêtement en terre cuite semble être très efficace. Comme un revêtement multifonctionnel, il sert à protéger le bâtiment, à augmenter ses performances énergétiques et à améliorer son aspect esthétique.

2. Auto-ombrage du revêtement extérieur

Dans un climat chaud et sec, la protection contre les rayons solaires est un moyen indispensable afin d'assurer un confort thermique intérieur ou extérieur. Cette protection peut être assurée par une conception thermique de l'enveloppe du bâtiment afin de poursuivre deux objectifs : la minimisation de la demande en énergie primaire pour le conditionnement annuel de l'espace, et la minimisation des heures d'inconfort thermique (Benbacha & Bourbia, 2016). Afin d'atteindre ces objectifs, l'enveloppe du bâtiment peut être protégée par des éléments de protection tels que les auvents et les stores, ou directement par un auto-ombrage de l'enveloppe extérieure, qui peut mieux aider à diminuer la quantité de flux de chaleur acquise par l'enveloppe extérieure, qui est l'élément le plus exposé aux radiations solaires et le responsable de la plus grande partie du flux de chaleur transféré au bâtiment. L'effet d'auto-ombrage de l'enveloppe extérieure du bâtiment a été largement traité. Il existe quelques études qui ont exprimé son effet sur le microclimat extérieur sous des climats variés. Cependant, de nombreuses études, expérimentales ou numériques, ont abordé la performance thermique des revêtements extérieurs à travers l'enveloppe auto-ombragée.

À titre d'exemple, Merhan (2020) a analysé les murs auto-ombragés pour améliorer les performances environnementales dans les bâtiments du désert. L'étude visait à présenter des propositions pour créer des ombres sur des murs solides opaques afin d'améliorer les performances thermiques à l'intérieur des bâtiments. L'étude est divisée en trois parties. Premièrement : analyser le principe de l'auto-ombrage dans la nature. Deuxièmement : concevoir une idée pour réaliser l'auto-ombrage des murs avec des coûts économiques et des matériaux abordables pour faciliter l'application de l'idée dans les pays en développement. Troisièmement : proposer des alternatives d'auto-ombrage inspirées de la nature dans les climats chauds afin de les évaluer en utilisant le logiciel de simulation numérique DesignBuilder. Les résultats ont révélé que la stratégie du mur auto-ombragé a réussi à réduire la température de surface extérieure et le rayonnement solaire incident par rapport au cas de base.

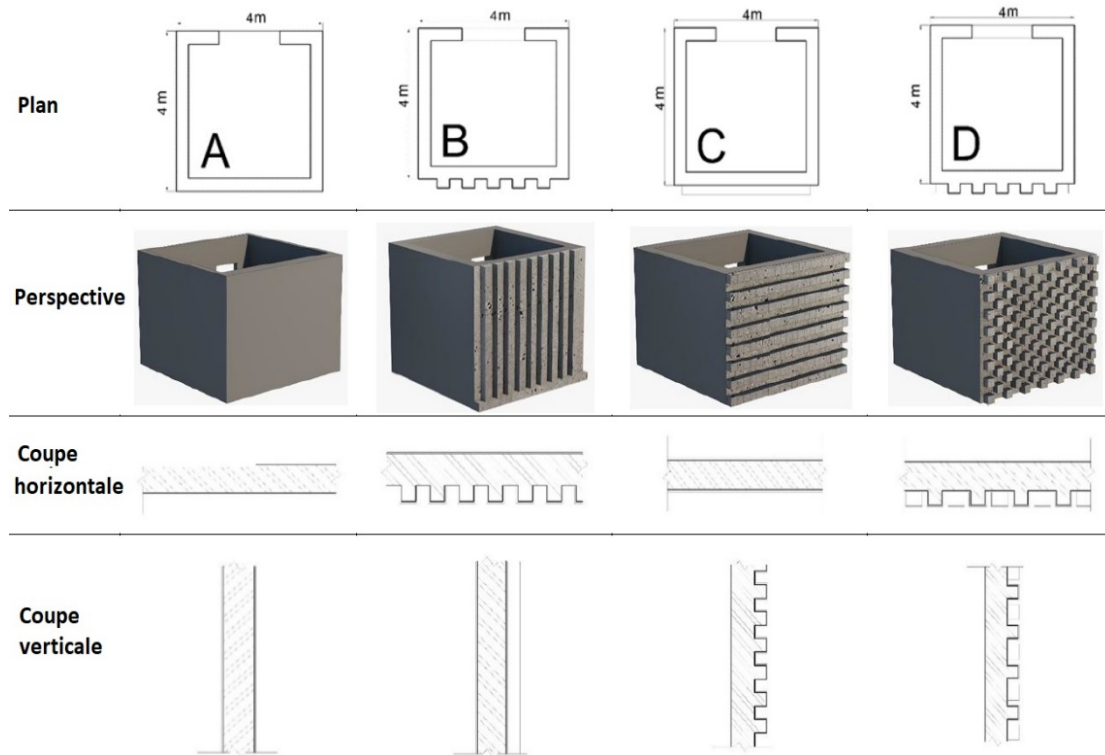


Figure 3. 3 : Les motifs géométriques inspirés de la nature, proposés par Merhan

(source : Merhan, 2020, Édité par l'auteur)

A son tour, Capeluto (2003) a étudié la performance énergétique d'une enveloppe de bâtiment auto-ombragée en Israël. Cette recherche visait à évaluer l'influence de la géométrie de l'enveloppe extérieure sur la performance énergétique du bâtiment proposé, basée sur une comparaison avec un bâtiment traditionnel à façade verticale. Le modèle informatique appliqué dans cette simulation numérique est SustArc, modèle qui permet de créer le nomogramme de l'enveloppe afin de générer la forme du bâtiment de manière que les façades soient auto-ombragées pendant une période requise déterminée par le concepteur. La méthode présentée est limitée aux bâtiments auto-ombragés et l'utilisation de dispositifs d'ombrage supplémentaires doit être envisagée par le concepteur pour éviter les murs très inclinés. Les résultats ont démontré que, pour toutes les orientations, il y avait une amélioration importante de la performance énergétique du bâtiment, particulièrement pour les orientations Est et Ouest. Cette étude a montré aussi que la combinaison de la géométrie du mécanisme de l'auto-ombrage du bâtiment avec des stores intérieurs offre une solution adéquate, en particulier pour les orientations Est et Ouest.

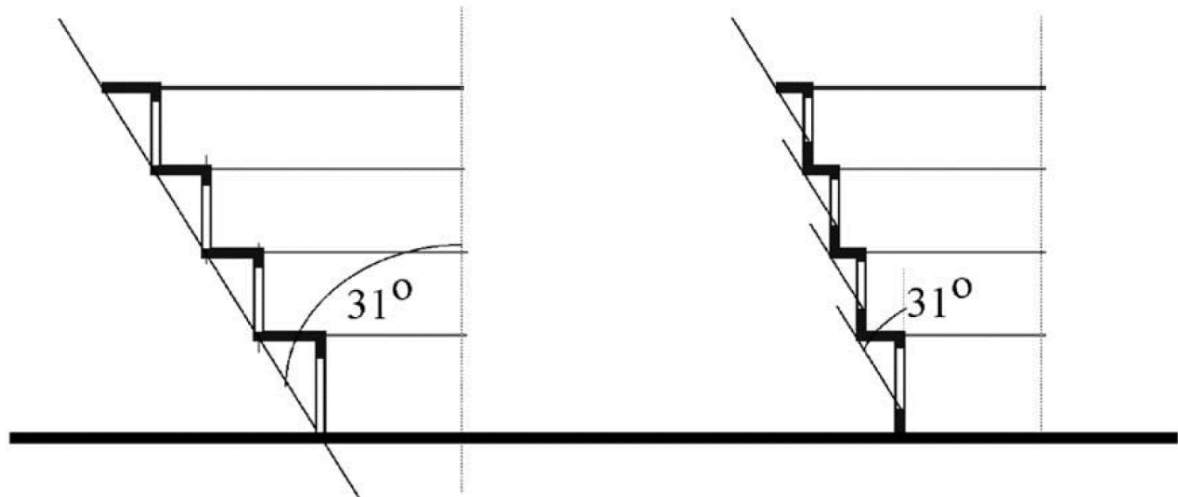


Figure 3. 4 : Deux variantes de conception proposées par Capeluto pour la façade sud

(source : Capeluto, 2003)

D'autres recherches menées par Alhuwayil et al. (2019) en Arabie Saoudite, ont travaillé sur l'impact de la stratégie de l'auto-ombrage extérieur sur la performance énergétique et l'économie d'énergie des bâtiments en climat chaud-humide. La modélisation et la simulation énergétique ont été réalisées par le logiciel DesignBuilder (Version 4.5.0.148). Selon la géométrie de l'enveloppe extérieure du bâtiment, des stratégies appropriées d'auto-ombrage ont été proposées pour les façades nord, sud, nord-est, nord-ouest, sud-est, ainsi que la façade sud-ouest. Les résultats ont démontré que l'ombrage proposé sur l'enveloppe extérieure pouvait économiser une consommation énergétique annuelle de 20,5% par rapport au cas de base. La période nécessaire afin de rembourser l'investissement supplémentaire pour intégrer la stratégie d'auto-ombrage est estimée à 2 ans.

Liu et al. (2019) ont abordé l'impact de l'auto-ombrage sur les bâtiments à Hong Kong. Sur la base des simulations énergétiques, ils proposent l'adoption de dispositifs d'ombrage sur les façades opaques afin d'évaluer leurs potentiels d'économie d'énergie dans des conditions estivales extrêmes. Les résultats ont exprimé qu'avec des configurations optimales de variables, telles que la longueur, le nombre et l'angle d'inclinaison des panneaux d'ombrage sur les façades orientées à l'ouest, un potentiel d'économie d'énergie jusqu'à 8,0% était possible.

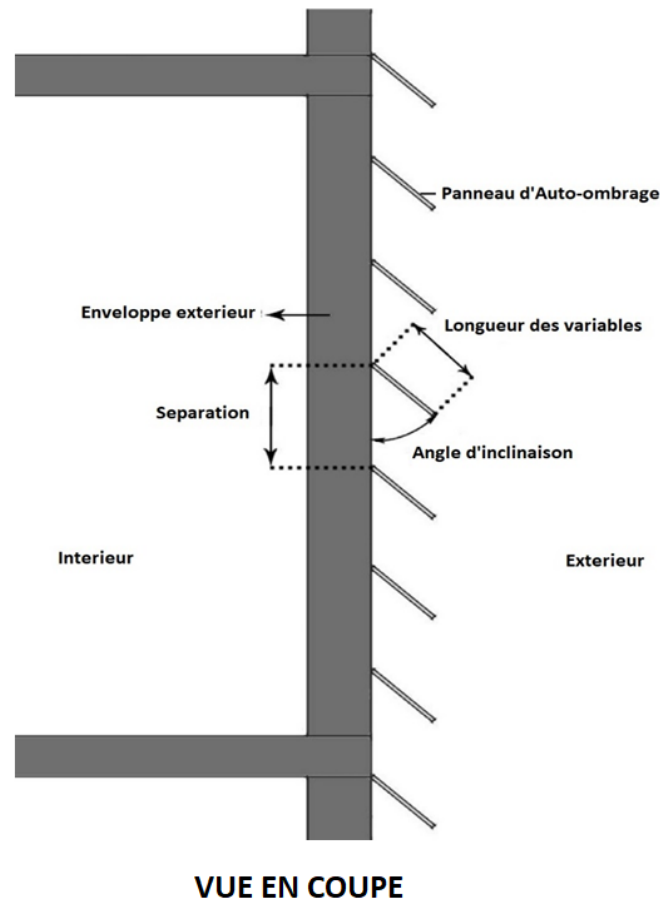


Figure 3. 5 : Configuration des variables du modèle d’auto-ombrage proposé par Liu et al.
(Source : Liu et al. 2019)

Dans d'autres recherches en Malaisie. Kandar et al. (2019) ont étudié l'influence de la stratégie d'auto-ombrage des murs inclinés sur la performance énergétique des bâtiments en climat chaud et humide. La configuration de la projection d'auto-ombrage de la paroi inclinée est modélisée et expérimentée à l'aide du logiciel ApacheSim. Les mesures sur terrain des variables environnementales telles que la température ambiante, l'humidité relative, le point de rosée et la température du bulbe humide étaient effectuées et comparés avec les résultats de la simulation numérique du logiciel ApacheSim et ont donné une fiabilité significative avec une corrélation de 0,90. Les résultats ont révélé que les gains de chaleur ont tendance à diminuer avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison. La projection d'auto-ombrage avec un angle de plus de 45° pourrait réduire considérablement les gains de chaleur de l'enveloppe du bâtiment, et une optimisation avec un angle de 65° par rapport au plan horizontal a donné les meilleurs résultats de performance, ce qui a conduit à une diminution de la consommation d'énergie.

3. Albédo du revêtement extérieur

L'albédo des revêtements extérieurs du bâtiment, déterminé par sa couleur, participe considérablement dans le comportement thermique et la distribution du rayonnement solaire dans le bâtiment. En effet, le pourcentage d'absorption, de transmission et de réflexion de l'énergie solaire qui atteint le bâtiment est largement affecté par le coefficient de l'albédo, et donc sur les gains de chaleur et la température intérieure (Givoni, 1998). Cette problématique a été largement étudiée par B. Givoni et M.E.Hoffman qui ont fait plusieurs études expérimentales sur des bâtiments de différentes couleurs extérieures en Israël. La synthèse de leurs recherches révèle que les bâtiments d'une couleur extérieure totalement blanche étaient supérieurement plus frais que ceux avec une couleur sombre, avec une différence atteignant 3°C. Plusieurs chercheurs ont étudié aussi l'effet de l'albédo et l'impact de la couleur du revêtement sur la température de surface externe, tout en négligeant la texture de cette face colorée. Parmi ces chercheurs, Mansouri et al. (2018) dans le climat méditerranéen de Skikda en Algérie, ont évalué l'effet de l'albédo des revêtements extérieurs sur la réduction des besoins énergétiques des bâtiments et l'amélioration du confort thermique intérieur, tout en variant la couleur du revêtement. Les résultats dévoilent que le revêtement extérieur avec un albédo élevé de 0,9 enregistre des valeurs largement plus faibles par rapport au bâtiment de référence avec un albédo de 0,5. Ces résultats ont montré aussi que la combinaison de cette stratégie avec l'isolation thermique amène à un niveau de confort thermique très acceptable et diminue considérablement les charges énergétiques du bâtiment.

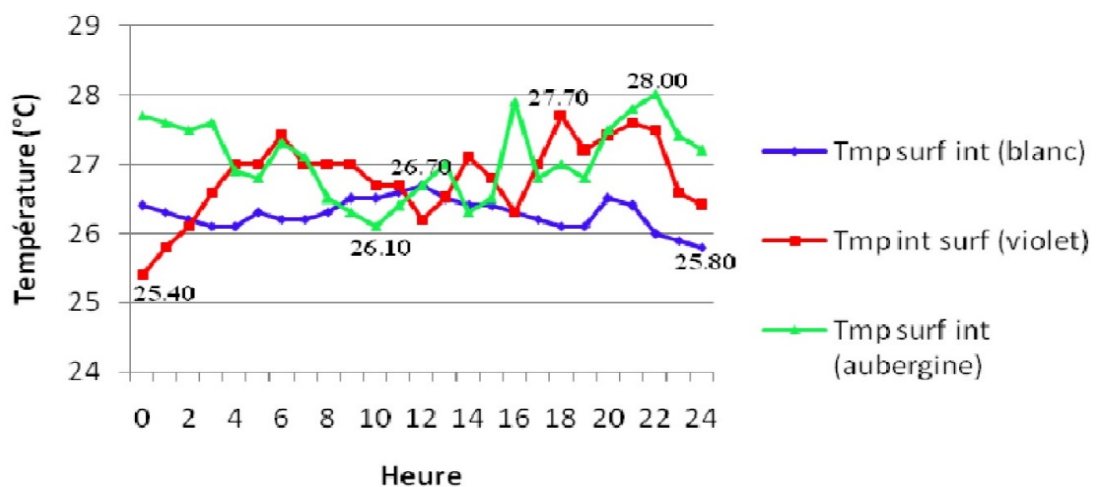


Figure 3. 6 : Comparaison entre les températures surfaciques intérieures des trois couleurs du revêtement extérieur appliquées par Mansouri et al. (source : Mansouri et al. 2018)

Dans d'autres recherches à Shanghai en Chine, et sur la base d'une étude expérimentale sur un bâtiment, Shen et al. (2011) ont traité l'effet de l'albédo par des revêtements extérieurs réfléchissants sur la consommation énergétique et le confort thermique. Sur la base des revêtements de différents coefficients d'Albédo, les mesures in situ ont montré une réduction de la température surfacique extérieure de l'ordre de 20°C, avec une réduction de 4,7°C pour la température surfacique intérieure, de 2,3°C pour la température du globe et de 3,7°C pour la température moyenne radiante. Cette réduction indique le résultat de l'augmentation de la réflectivité au niveau des revêtements extérieurs.

Une autre étude dans un climat chaud et humide à l'université de Hong Kong en Chine, Cheng et al. (2005) a analysé l'effet de la couleur de l'enveloppe extérieure sur la température de l'air intérieur, à travers une étude sur des cellules expérimentales non ventilées et sans ouverture. L'étude a enregistré une différence maximale de la température de l'air intérieur, de 12°C entre une cellule de couleur noire et une autre de couleur blanche. Ces résultats montrent que l'albédo possède un effet considérable sur le changement de la température ambiante intérieure. Cette étude a indiqué également que la combinaison de la stratégie du changement de couleur, avec la masse thermique dans l'enveloppe extérieure participe à la réduction de la température de l'air intérieur, et retarde considérablement le pic de température pendant plusieurs heures.

A leur tour, Taha et al. (1992) ont réalisé en Californie une étude sur des revêtements extérieurs caractérisés par un albédo élevé afin d'évaluer les températures surfaciques du revêtement extérieur à travers la couleur des matériaux. Les résultats ont montré qu'en été, les revêtements élastomères blancs étaient aussi froids que les revêtements élastomères noirs, ce qui signifie que les revêtements à albédo élevé dans les climats chauds peuvent réduire la quantité du rayonnement solaire absorbé par le revêtement et maintenir la fraîcheur des surfaces externes des bâtiments.

D'autres recherches menées par Bansal et al. (1992) à Delhi, en Inde, sur l'effet de la couleur externe sur le comportement thermique du bâtiment, en se basant sur une comparaison entre une étude expérimentale et une étude par simulation numérique, ont découvert qu'un mur noir enregistre une température de surface de 7°C supérieure par rapport à un mur blanc pendant la période diurne, tandis que pendant la période nocturne les températures surfacique semblent être les mêmes. Les résultats obtenus par simulation numérique étaient conformes aux résultats expérimentaux, ce qui signifie que l'albédo joue

un rôle primordial dans l'absorption des rayons solaires et la détermination de la température de surface.

Dans une autre étude expérimentale sur les revêtements extérieurs réfléchissants, Synnefa et al. (2006) ont évalué à travers des mesures in situ l'impact des matériaux frais caractérisés par un albédo extrêmement élevé appliqué sur des revêtements de bâtiments. Les mesures in situ sont appliquées sur un béton blanc sans peinture comme référence, et un béton blanc peint avec des revêtements enduits réfléchissants. Les résultats démontrent une réduction de la température surfacique extérieure de l'ordre de 4°C pour le béton blanc peint avec des revêtements enduits réfléchissants. Cette étude montre que le coefficient de l'albédo influence considérablement la réflectivité du revêtement et, par conséquent, participe à la réduction du stress thermique.

4. Enveloppe intelligente

Dans les régions Sud de l'Algérie, les rayons solaires extrêmes provoquent une sensation de stress thermique ainsi qu'une augmentation de la consommation énergétique. Aujourd'hui, pour faire face à ce problème, les stratégies de conception de l'enveloppe extérieure du bâtiment nécessitent des moyens technologiques afin de créer des enveloppes innovantes et plus adaptatives, permettant de réagir avec la trajectoire solaire en se basant sur la taille, le nombre et le dynamisme des éléments d'ombrage. Cette stratégie permet de minimiser considérablement l'apport solaire sur l'enveloppe extérieure. Plusieurs chercheurs ont tenté d'évaluer l'enveloppe extérieure du bâtiment à travers des technologies révolutionnaires intelligentes telles que les matériaux à changement de phase, les enveloppes intelligentes et cinétiques. Ces stratégies présentent un défi auquel les architectes et ingénieurs sont aujourd'hui confrontés. A titre d'exemple, Ben Bacha et al. (2016) à Biskra qui est caractérisée par un climat chaud et sec, ont simulé l'effet des dispositifs d'ombrage sur l'enveloppe du bâtiment avec un système cinétique qui réagit activement aux conditions météorologiques. Ces paramètres sont obtenus en contrôlant les niveaux de rayonnement solaire et en calculant les tailles des éléments d'ombrage pour le contrôle du soleil en réponse aux changements environnementaux. Cette recherche est basée sur une modélisation numérique paramétrique à l'aide de GECO-Grashopper qui est un plugin du logiciel Rhinocéros. Les résultats obtenus ont montré que l'enveloppe cinétique peut réduire fortement le rayonnement solaire direct de 17,9 %, ce qui contribue à une diminution de la température de l'air intérieur comprise entre 4,0 °C et 4,8 °C. Cette

étude démontre que l'enveloppe extérieure du bâtiment participe d'une manière intelligente dans le confort thermique et la performance énergétique du bâtiment, au lieu d'être uniquement un élément séparateur entre l'intérieur et l'extérieur.

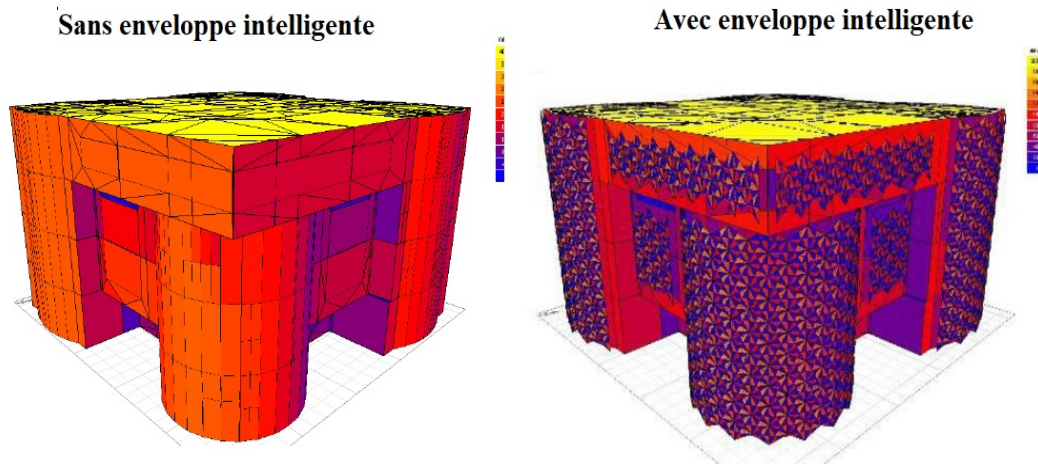


Figure 3. 7 : Température surfacique du cas d'étude simulé par Benbacha et al. avant et après intégration de l'enveloppe dynamique (source : Benbacha et al. 2016)

Tarabieh et al. (2017) ont exploré l'impact des différents types de liaison de brique de la façade sud sur l'énergie du bâtiment. Cette recherche est menée en deux phases : la première est une étude sur des murs de briques qui sont classés en trois catégories d'extrusion (sans extrusion, extrusion de $\frac{1}{4}$ de brique, et extrusion de $\frac{1}{2}$ brique) pour chaque type de liaison (running, anglais et flamand). La deuxième phase implique des simulations paramétriques par le logiciel Rhinocéros – grasshopper afin d'évaluer les consommations d'énergie pour les trois formes d'extrusion. Les résultats ont démontré que la liaison de brique de type flamande est la mieux performante, suivie par la liaison anglaise. Le pourcentage d'extrusion qui donne la rugosité de l'enveloppe extérieure semble jouer un rôle très important dans les résultats.

D'autres recherches, menées par Ercan et al. (2015) ont présenté une étude par simulation numérique paramétrique. La méthodologie suivie dans cette étude a généré des dispositifs d'ombrage dans l'enveloppe du bâtiment dans des climats chauds et humides qui pourraient optimiser la lumière du jour tout en bloquant les apports excessifs de chaleur solaire. Les alternatives de conception ont été générées par des algorithmes évolutifs conformément aux exigences de performance de la lumière du jour afin d'évaluer leurs efficacités d'ombrage. Cette recherche a conclu que l'étude de l'enveloppe extérieure assistée par des

logiciels avancés de simulation des performances énergétique du bâtiment permet aux architectes d'effectuer des explorations énormes sur l'optimisation de la conception de l'enveloppe extérieure.

Les travaux menés par Nocera et al. (2018) ont abordé l'adaptation des bâtiments historiques réutilisés en bâtiments scolaires afin d'optimiser la lumière du jour. Cette étude est basée sur une modélisation numérique par le logiciel Radiance, validée par rapport à une campagne de mesures, puis utilisée pour effectuer des simulations dynamiques détaillées. Les résultats de cette étude proposent différentes solutions technologiques et de modernisation intelligente au niveau du revêtement, afin d'améliorer le confort visuel tout en respectant la valeur culturelle et historique du patrimoine bâti. En conséquence, ces interventions peuvent également être utilisées dans d'autres régions d'Europe avec des conditions climatiques similaires.

Rodonò et al. (2019), à leur tour, ont présenté une méthode de production d'un revêtement qui s'adapte d'une manière intelligente avec l'environnement extérieur au moyen des matériaux composites et de leur caractérisation mécanique et physique. Leur objectif était de créer un nouveau matériau qui pourrait être plié et déplié facilement afin de donner des solutions légères et intelligentes pour le revêtement extérieur des bâtiments, mais avec des performances mécaniques supérieures. Ils ont alors proposé un revêtement pliable fabriqué avec de l'élastomère thermoplastique SEBS (styrène-éthylène-butylène-styrène) et qui peut être renforcé en tissu.



Figure 3. 8 : Revêtement composite à base de SEBS avec un tissu de fibres de carbone, proposé par Rodonò et al. (source : Rodonò et al. 2019)

5. Particules des matériaux

Actuellement, les matériaux composites sont largement utilisés dans le secteur du bâtiment. Ce type de matériaux se caractérise par un large champ d'application. L'utilisation des matériaux composites au niveau de l'enveloppe extérieure du bâtiment joue un rôle primordial à cause de leurs propriétés physiques et thermiques qui deviennent compétitives avec celles des autres matériaux isolants appliqués dans l'enveloppe extérieure du bâtiment (Chikhi et al. 2011). C'est pourquoi de nombreux chercheurs ont étudié, leurs performances thermiques avec des essais expérimentaux, en utilisant des composantes écologiques, organiques ou recyclables dans l'enveloppe du bâtiment. L'utilisation des composants végétaux tels que les particules de palmier a été largement étudiée, en raison de leur durabilité et de leurs caractéristiques thermiques et volumiques.

A titre d'exemple, Benmansour et al. (2014) ont présenté une étude sur l'utilisation d'un nouveau matériau composé de ciment naturel, de sable et de fibres de palmier dattier. L'objectif de cette étude était d'évaluer avec des mesures in situ, les caractéristiques d'absorption d'eau, de conductivité thermique et de résistance à la compression de ce nouveau matériau dans l'enveloppe extérieure du bâtiment. Plusieurs composites ont été préparés pour différentes concentrations volumique (de 0% à 30%). Les résultats révèlent que l'incorporation des particules de palmier dattier dans le mortier de ciment a un effet positif sur le comportement thermique. Ainsi, l'utilisation de ces particules dans le mortier de l'enveloppe extérieure à charge inférieure à 15 %, satisfait aux exigences thermiques et mécaniques et peut être utilisée aussi dans le mortier de l'enduit extérieur considéré comme une option très prometteuse permettant d'être appliquée comme matériaux d'isolation thermique dans les bâtiments.



Figure 3. 9 : Particules de palmier de différentes tailles, proposé par Benmansour et al.

(source : Benmansour et al. 2014)

D'autres travaux effectués par Oushabi et al. (2014) ont traité les propriétés morphologiques et thermiques des composites de polyuréthane renforcés de particules de palmier dattier en tant que nouveaux matériaux d'isolation thermique écologique dans l'enveloppe extérieure du bâtiment. Ces composites sont préparés avec des charges différentes (5%, 10% et 20%). L'objectif de cette étude était de réduire le coût et les impacts environnementaux du polyuréthane à base de pétrole, en obtenant un mélange de composites de polyuréthane et de particules de palmier dattier, avec des propriétés d'isolation thermiques et mécaniques similaires ou meilleures que dans le cas de référence. Les résultats ont montré que les performances mécaniques et thermiques de ce nouveau matériau étaient compétitives avec celles des autres isolants disponibles sur le marché. Cette enquête a déduit que les particules de palmier réduisaient la conductivité thermique du composite tout en réduisant son poids. Ainsi, son utilisation comme enduit avec le mortier de ciment semble être une option très prometteuse à cause de son prix économique et sa durabilité, ce qui lui permet d'être appliqué comme matériau d'isolation thermique.

Dans une autre approche similaire, Záleská et al. (2019) ont étudié le recyclage des déchets pneumatiques (pneu) mélangés au béton de ciment. Cette recherche était basée sur une analyse détaillée du mortier de ciment mélangé avec des agrégats de différentes tailles à base de particules de caoutchouc de pneus usagés, et impliquaient des tests de propriétés mécaniques, physiques, hydriques, thermiques, et de comportement après exposition à des températures élevées. Les tests de performance mécanique comprenaient la mesure de la résistance à la compression et la flexion. Une attention particulière a été portée à la conductivité thermique, qui est déterminée en fonction de la teneur en humidité, de l'état sec à l'état complètement saturé en eau.



Figure 3.10 : Agrégats naturels et à base de caoutchouc proposés par Záleská et al.

(source : Záleská et al. 2019)

Les résultats indiquent que l'ajout de granulats en caoutchouc entraîne une diminution du poids, une réduction significative de la conductivité thermique, mais avec quelques détériorations des caractéristiques mécaniques. Cependant, cette composante peut être utilisée au niveau de l'enveloppe extérieure du bâtiment à cause de sa légèreté, ainsi que des avantages qu'elle peut apporter à l'environnement, car elle est produite à partir de déchets disponibles en grande quantité avec un coût négligeable.

6. Couvert végétal de l'enveloppe du bâtiment

Le couvert végétal du bâtiment est l'une des techniques les plus prometteuses pour contribuer à améliorer l'aspect visuel et spatial des paysages urbains, et offrir un sentiment d'intégration avec la nature. Il possède également un effet sur la réduction de la poussière et du bruit (Benhalilou, 2021). En plus de ces caractéristiques essentielles, cette couverture peut se présenter comme un revêtement extérieur qui offre un potentiel de rafraîchissement passif en réduisant la consommation énergétique des bâtiments (Benhalilou, 2021). L'enveloppe du bâtiment végétalisé, tout comme le rôle du revêtement extérieur, peuvent contribuer à des conséquences économiques de l'énergie du bâtiment, ceci à travers différents mécanismes de protection contre le rayonnement solaire tels que l'effet d'ombre, la rugosité et la densité de la couverture végétale. En conséquence, l'effet d'évapotranspiration par la chaleur latente de la végétation peut donner plus de refroidissement et de fraîcheur. Cette stratégie peut autant aider à réduire le rayonnement solaire intra-urbain qui aura un impact sur le confort thermique intérieur des bâtiments.

De nombreux chercheurs ont évalué le comportement thermique de la couverture végétale sur le confort thermique et la performance énergétique du bâtiment par l'effet d'ombrage, l'effet de rugosité et de la densité végétale. Peck et al. (1999) ont essayé de comparer deux enveloppes de bâtiment avec et sans végétation. Les résultats indiquent que l'enveloppe extérieure de référence (nue) a enregistré une différence de pic de température surfacique (entre le plus chaud et le plus froid) de l'ordre de 50 °c, tandis qu'avec l'effet du couvert végétal, la différence était de 25 °c. Cette réduction des pics de température indique clairement l'effet du couvert végétal qui réduit l'intensité du rayonnement solaire par sa densité et par l'auto-ombrage.

Blanco et al. (2019) ont comparé, dans une étude expérimentale sur des Box de mesures, un mur extérieur de référence et d'autres murs couverts de végétation avec différentes densités végétales. Un modèle de régression numérique simulait la différence de température surfacique externe et était ajusté et validé sur la base des données expérimentales. Ils ont trouvé que les murs végétalisés avaient enregistré des températures surfaciques extérieures inférieures à la paroi de référence avec une différence maximale de 7,7 C°.



Figure 3. 11 : Box de mesures avec différentes densités végétales,
proposé par Blanco et al. (source : Blanco et al. 2019)

À Singapour, Wong et al. (2010) ont effectué une étude expérimentale sur des couvertures extérieures de différents types végétaux, selon les caractéristiques de rugosité, de densité végétale et les capacités d'ombrage et d'absorption des rayons solaires. L'objectif de cette étude était d'évaluer les impacts thermiques des différentes couvertures végétales sur la réduction du transfert de chaleur et l'amélioration du confort thermique intérieure. Le dispositif de mesure était composé de 7 types des couverts végétaux classés selon la densité, la rugosité et la capacité d'ombrage de chaque type, avec une cellule de référence sans couvert végétal. Cette étude a montré une variété entre les résultats, la réduction de la température surfacique pouvant aller jusqu'à 4,36°C par rapport à la cellule de référence. Ces couvertures végétales ont également présenté l'effet de la réduction de température de l'air à proximité de la façade, à cause de l'évapotranspiration.

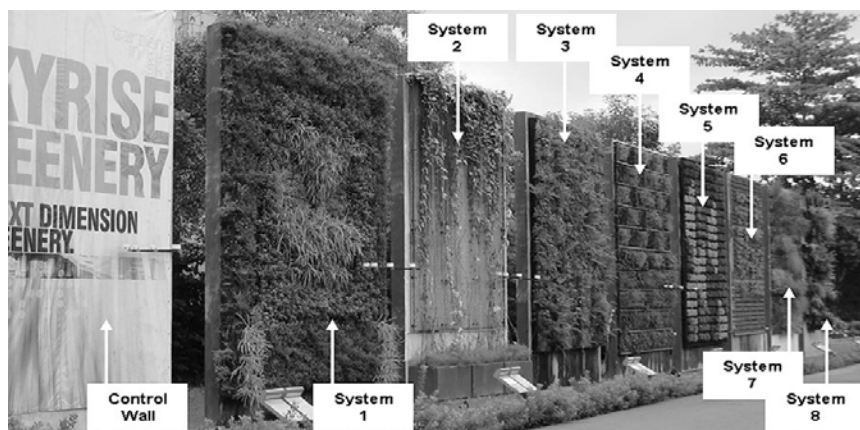


Figure 3. 12 : Huit couverts végétaux testés par Wong et al. (source : Wong et al. 2010)

A Guangzhou, en Chine, Zhang et al. (2019) ont effectué des mesures sur des cellules expérimentales avec et sans couverture végétale pendant les journées chaudes de l'année. Les paramètres mesurés dans cette étude sont la température opérative (OT) et la température du globe (Tg), afin d'évaluer les effets du rayonnement solaire sur le couvert végétal des cellules expérimentales. Les résultats indiquent qu'avec l'effet de l'auto-ombrage davantage causé par la densité et la rugosité végétale, elle pourraient ainsi absorber environ 50% du rayonnement solaire par transpiration de la végétation, ce qui provoque une baisse de température opérative maximale de 3,6 °c.

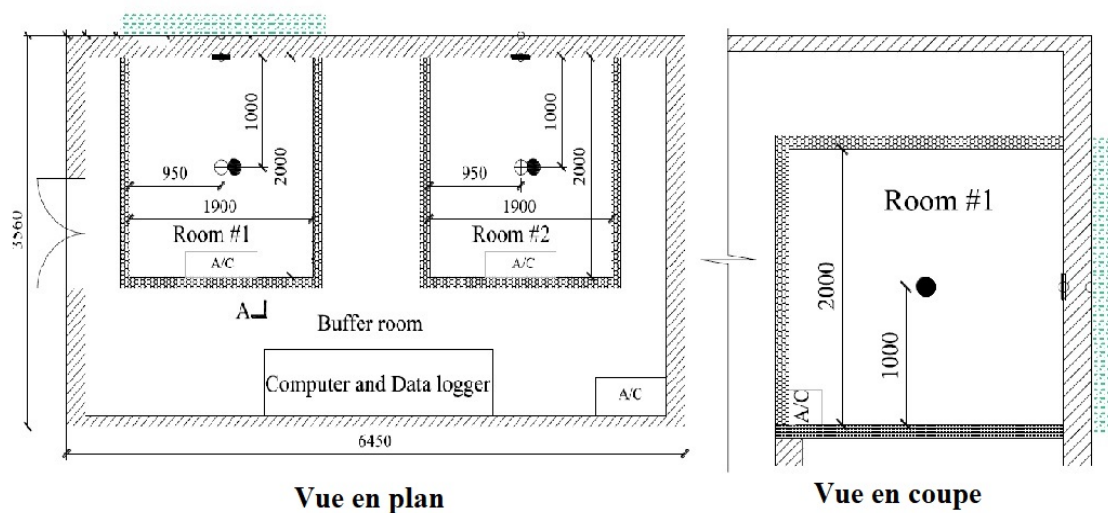
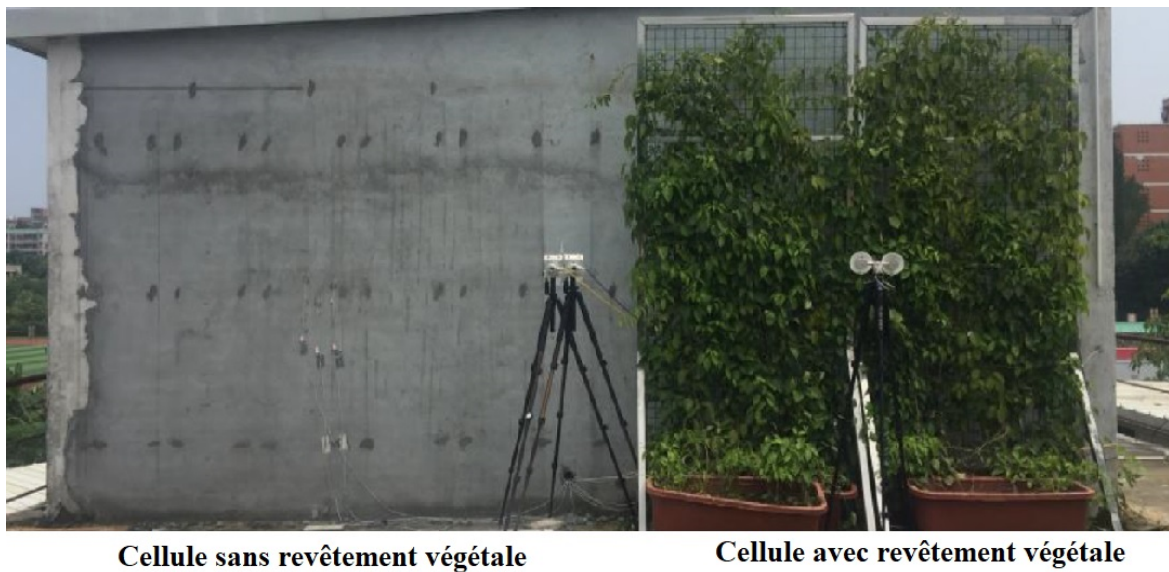


Figure 3. 13 : Protocole de mesure des cellules expérimentales proposé par Zhang et al.

(source : Zhang et al. 2019)

Sous un climat désertique, Ganji et al. (2013) ont évalué l'effet de la couverture végétale sur la consommation énergétique du bâtiment, en se basant sur le paramètre de la densité végétale. Cette étude a abordé des simulations numériques par le logiciel Energyplus. Les résultats de cette simulation étaient validés par des mesures expérimentales à l'aide d'une caméra infrarouge. Les résultats dévoilent que les couverts végétaux moyennement denses et très denses ont suffisamment réduit la consommation énergétique, et que l'effet du couvert végétal est plus efficace que l'isolation thermique sur l'enveloppe extérieure. Ils ont conclu ainsi que, plus le climat est sec et chaud, plus le coût de refroidissement sera stimulé par l'enveloppe extérieure à cause de sa densité végétale et de l'effet d'ombrage. Par conséquent, la corrélation suivante est que, plus l'indice de densité végétale est grand, moins le rayonnement solaire peut pénétrer cette végétation, et plus les charges énergétiques du bâtiment ont tendance à réduire.

Dans une autre recherche, Tsoumarakis (2008) a réalisé des mesures in-situ pendant quatre mois en Grèce, sur des cellules expérimentales isolées couvertes par la végétation grimpante. Les résultats de la température surfacique ont révélé que la couverture végétale a contribué énormément à réduire les pics des températures surfaciques et a gardé leur valeur plus basse que celles de la cellule de référence durant toute la journée. Il a conclu de ce fait que la couverture végétale détient un effet positif sur l'amélioration du comportement thermique de l'enveloppe extérieure.

7. Synthèse récapitulative

Les recherches présentées ci-dessus ont ciblé les stratégies de l'enveloppe extérieure et son impact sur le comportement thermique. Toutefois, il manque des études relatives directement aux revêtements extérieurs du bâtiment. Bien que les résultats obtenus varient d'une étude à l'autre, ils partagent entre eux les variables morphologiques de protection telles que l'auto-ombrage, la rugosité, la densité, l'assemblage et la profondeur des dispositifs d'ombrage, dont l'objectif est de savoir les réutiliser dans la conception du revêtement extérieur. Les résultats de toutes les recherches présentées confirment l'impact des paramètres étudiés sur la performance thermique de l'enveloppe des bâtiments, due essentiellement aux effets des variables morphologiques citées plus haut, qui ont joué un rôle primordial dans la détermination des résultats. Par conséquent, elles doivent être prises en compte lors de la sélection de l'enveloppe extérieure afin de maximiser au mieux la performance thermique de ce dernier. Le (Tableau 3. 1) présente une récapitulation de

l'état de l'art approché dans ce chapitre, en présentant des solutions auxquelles on peut recourir afin d'optimiser le comportement thermique du revêtement extérieur du bâtiment.

Tableau 3. 1 : Récapitulatif d'état de l'art des stratégies étudiées (source : Éditée par l'auteur, 2021)

Type de revêtement proposé	Effet d'auto-ombrage	Effet d'isolation thermique	Effet de réflexion des rayons solaires	Effet sur le transfert de chaleur	Effet d'évapotranspiration	Effet sur la température surfacique de	Effet esthétique
Revêtements extérieurs avec texture biomimétique	X			X	X	X	X
Revêtements extérieurs thermo-chromiques			X			X	
Revêtement extérieur à base d'aérogel de silice		X				X	
Revêtement extérieur à base de particules de palmier		X		X		X	X
Revêtement extérieur ventilé	X	X				X	X
Revêtements extérieurs clairs réfléchissants			X			X	X
Revêtements extérieurs blancs			X			X	
Revêtements extérieurs intelligents	X		X	X		X	
Revêtement extérieur avec dispositifs denses et rugueux	X	X		X		X	X

8. Mesures in-situ et normes de transfert de chaleur dans l'enveloppe extérieure

Deux normes internationales sont actuellement disponibles pour l'estimation de la résistance thermique des composants de l'enveloppe du bâtiment à l'aide de données de mesure in situ - ISO 9869-1994, ASTM C 1155-2001 et ASTM C 1046-2001 (Kazemi et al. 2020). La norme mise à jour ISO 9869-1:2014 introduit la méthode moyenne et dynamique, tandis que la norme ASTM C 1155-2001 introduit la méthode de sommation et de somme des moindres carrés. Toutes les méthodes nécessitent la mesure de la température de surface interne et externe pendant au moins trois jours. Les deux méthodes de moyenne et sommation sont similaires, leurs principaux avantages étant la simplicité d'utilisation et l'exploration rapide des résultats, ce qui les rend les plus utilisées. Cependant, leur précision dépend fortement des conditions de mesure (voir Standard ISO 9869-1:2014).

D'autre part, la somme des moindres carrés et la méthode dynamique, sont plus susceptibles de fournir des résultats fiables quelles que soient les conditions de mesure (ASTM C 1155-95, 2001) (ISO 9869-1, 2014). Néanmoins elles nécessitent le développement de méthodes complexes avec des algorithmes et outils de calcul pour l'analyse des données chronologiques. Pour cette raison, elles sont modérément utilisées. La principale limitation de toutes les méthodes standardisées est que la précision de la mesure de Rc-value dépend des conditions de mesure et de la durée de la période de mesure. Beaucoup de chercheurs ont essayé d'utiliser ces normes internationales dans des études expérimentales afin d'évaluer le transfert de chaleur dans l'enveloppe extérieure. Par exemple, Flandre et al. (1995) ont analysé les estimations de Rc-value à l'aide des deux méthodes de la norme ASTM, de la méthode de la sommation et de la somme des moindres carrés, et ont conclu que l'accord entre les deux méthodes est compris entre 1 et 13 % pour les cas avec une différence de température de surface interne et externe élevée. Deconinch et Roels (2016) et Gaspar et al. (2016) ont comparé les deux méthodes de la norme ISO (la méthode moyenne et la méthode dynamique) en termes de conditions de mesures différentes et ils en ont déduit que la méthode moyenne fonctionne aussi bien que la méthode dynamique lorsque les conditions de mesure sont optimales. En cas de faible différence de température, seule la méthode dynamique conduit à des résultats fiables. Gaspar et al. (2018) ont essayé d'améliorer la précision de la mesure in situ des façades à faible valeur de U-value, en utilisant la méthode ISO 9869-1:2014 largement utilisée, et en explorant les limites de ses conditions. Les résultats ont démontré que des différences de

température entre l'intérieur et l'extérieur supérieures à 19 °c nécessitent une durée d'essai de 72 h, tandis que pour des différences de température inférieures à 19 °c, la durée d'essai doit être prolongée.

La précision des capteurs de température surfacique possédait un impact plus important sur la précision de la mesure dans les cycles initiaux du test. De même, la précision des capteurs de température ambiante s'est avérée avoir une influence considérable sur l'incertitude des mesures. Roulet et al. (1987) ont comparé les deux mêmes méthodes concernant l'influence de la différence de température intérieure et extérieure. Cette recherche révèle que les résultats des deux méthodes ISO étaient stables lorsque la température intérieure était constante avant et pendant la période de mesure.

Desogus et al. (2011) ont étudié les résultats de la méthode moyenne pour deux conditions de mesure différentes. Ils ont conclu que les conditions de mesure, et en particulier la différence de température surfacique, influencent grandement les résultats des mesures. Plus la différence de température était petite, moins les résultats étaient précis.

Le deuxième paramètre de mesure critique est la durée requise des mesures. Elle peut être définie comme la durée minimale requise par la méthode pour fournir des résultats fiables. Cette durée de mesures peut aller de 72 h à plus de 7 jours, selon la méthode utilisée, les conditions de mesure et le type de mur testé. Dans le cas des méthodes moyennes et de sommation, il est appelé temps de convergence comme il est déterminé par différents critères pour chaque méthode. Cependant, dans le cas des méthodes dynamique et de la somme des moindres carrés, elle n'est pas clairement définie. Dans une autre recherche, Gaspar et al. (2016) ont montré que la précision de la méthode dynamique était considérablement améliorée en allongeant la période de mesures.

À partir de la brève revue de la littérature ci-dessus, il devient clair que les principales faiblesses des méthodes de mesure standardisées de Rc-value, à savoir l'effet des conditions de mesure et la durée de la période de mesure, limitent la facilité d'utilisation des méthodes et peuvent potentiellement augmenter l'incertitude. Une autre recherche menée par Gaspare et al. (2016) ont suggéré qu'une recherche plus approfondie concernant la période de mesure optimale est nécessaire afin d'améliorer la fiabilité des résultats. De plus, Desogus et al. (2011) ont conclu qu'il est difficile d'obtenir des conditions de mesure environnementales idéales, en particulier dans les climats doux, et la solution à cela

pourrait être la sélection de la méthode appropriée parmi les techniques standardisées disponibles.

Atsonios et al. (2017) ont comparé différentes méthodes données par ISO 9869 (1994) et ASTM C 1155 (2001) pour le transfert de chaleur. Toutes les méthodes sont utilisées pour la mesure de Rc-value de trois enveloppes de bâtiments différents (une construction légère en cloison sèche, un mur en moellons et un mur en briques). D'après les résultats de cette recherche, la différence de température moyenne entre les surfaces du mur et la direction du flux de chaleur au cours de la journée influence fortement la durée de la période de mesure requise et la variabilité des résultats. En particulier, les méthodes de moyenne et de sommation nécessitent une différence de température élevée et, par conséquent, une direction stable du flux de chaleur afin de fournir des résultats acceptables et fiables durant une courte période de mesure. Dans les cas où la différence de température est inférieure à 3 °c, les résultats des deux méthodes de moyenne et de sommation ont respectivement des coefficients de variation élevés et inacceptables. Par conséquent, elles ne doivent pas être utilisées lorsque la différence de température surfacique est trop faible ou que leurs critères doivent être plus stricts.

Une autre recherche en Arabie Saoudite, menée par Ahmad et al. (2014), a traité l'effet de l'orientation de l'enveloppe extérieure composée de panneaux creux en béton armé préfabriqué sur le transfert de chaleur. Cette étude était basée sur les normes ASTM C 1155-95 (2001), ASTM C 1046-95 (2001) et ISO 9869 (1994), avec des mesures in-situ d'une durée de 6 jours successifs. Ils ont conclu que dans un climat chaud et sec comme celui de l'Arabie Saoudite, et afin de satisfaire aux critères de convergence, une période courte de moins 6 jours est généralement insuffisante pour obtenir des résultats (ASTM C 1155-95, 2001) (ISO 9869-1, 2014).

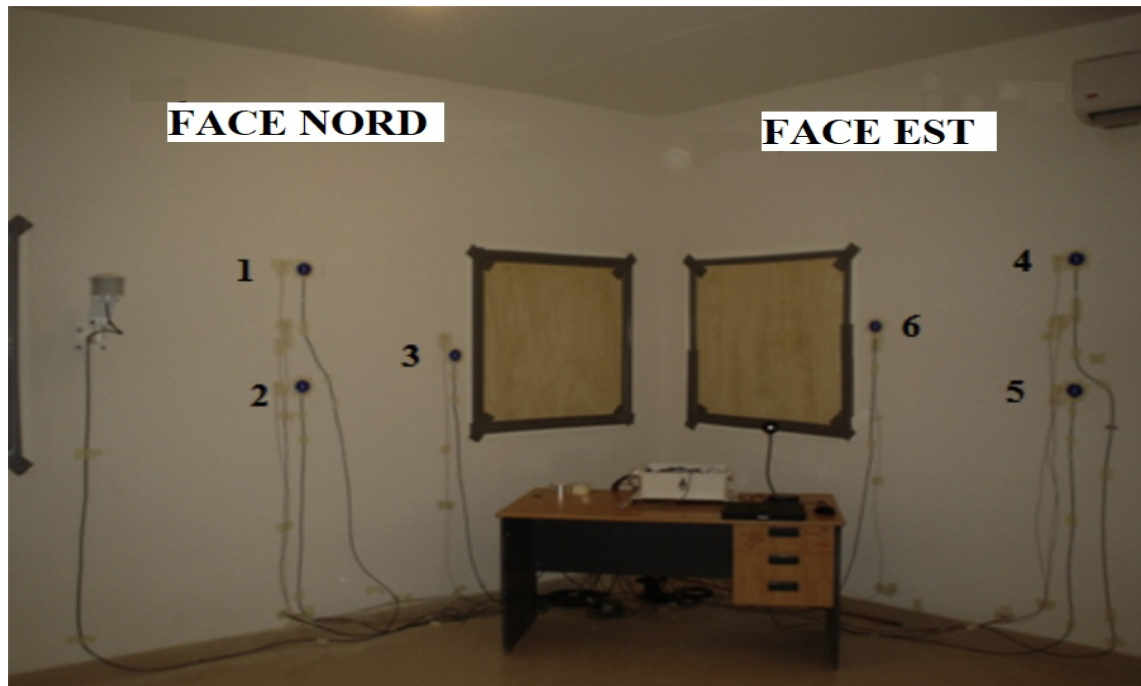


Figure 3. 14 : Mesures in-situ basées sur la norme ISO 9869 pour les côtés Nord et Est testés par Ahmad et al. (Source : Ahmad et al. 2014).

Dans une autre étude, en Écosse, sur une période de mesure de 17 jours, Baker (2008) a comparé les résultats de mesures in-situ basées sur la norme ISO 9869 (1994) avec ceux obtenus en laboratoire. La corrélation et la comparaison des deux méthodes ont abouti à un accord parfait entre les résultats. Cette étude a été approfondie par Baker (2011) en évaluant un plus grand nombre de cas. Elle a montré la nécessité d'une période plus longue de mesures in-situ pour obtenir des résultats satisfaisants.

D'après les différentes recherches sur les normes de transfert de chaleur citées ci-dessus, il existe deux problèmes principaux auxquels la méthode moyenne peut être associée : Premièrement, la longue durée des mesures due à des conditions aux limites instables, deuxièmement, le problème de la précision de R_c -value. La durée requise pour que cette valeur soit rapportée et réponde aux critères de la norme ISO 9869 (1994), peut être très longue. Cela devient un obstacle et, par conséquent, rend difficile l'application fréquente de la méthode dans la pratique. Pour résoudre ce problème, Rasooli et al. (2016 et 2018) sur la base de la norme ISO 9869, ont évalué l'avantage d'utiliser des séries temporelles de flux de chaleur différentes des deux côtés dans les mesures de R_c -value pour des murs soit hétérogènes, soit homogènes. Dans le cas d'un mur hétérogène, l'isolation de la surface extérieure rend le graphique de R_c -value extérieur suffisamment stable et converge très

rapidement, alors qu'avec l'isolation du côté intérieur, celui du côté intérieur est plus stable et converge plus rapidement. De plus, lorsque la couche d'isolation se trouve au milieu du mur entre les deux couches de briques, le R_c -value intérieure a convergé plus rapidement que celui de l'extérieur, en raison d'une plus grande stabilité de la température intérieure par rapport à la température extérieure. Dans le cas d'un mur homogène, le R_c -value moyen s'est avéré converger aussi rapidement (jusqu'à 10 fois plus rapide) vers la valeur réelle que le R_c -value intérieure et extérieure. Cette méthode permet de gagner du temps et de la précision de mesure.

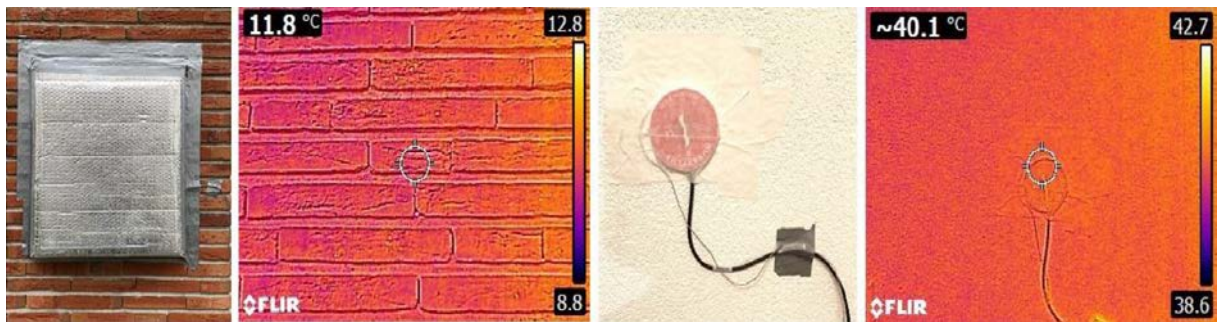


Figure 3. 15 : Méthode de mesure de deux côtés intérieur-extérieur, proposée par Rasooli pour la température surfacique et le flux de chaleur (source : Rasooli et al. 2018).

9. Mesures in-situ de transfert d'humidité dans l'enveloppe extérieure

L'humidité traversant l'enveloppe extérieure peut avoir de graves conséquences sur les bâtiments et nuire à leur durabilité et à leur intégrité à long terme. Elle favorise la biodégradation et contribue à des problèmes tels que la croissance de moisissures, les taches et un environnement interne médiocre. De plus, l'humidité peut réduire les performances thermiques et détériorer les matériaux isolants (Walker et al. 2016).

La teneur en humidité peut être mesurée à l'aide de diverses méthodes. Plusieurs recherches ont essayé d'évaluer le transfert de ce paramètre au niveau de l'enveloppe extérieure du bâtiment en se basant sur des mesures in-situ. Said (2004) a passé en revue les méthodes de mesure de l'humidité à travers le mur. Cette recherche était basée sur un classement d'évaluation selon le principe de résistance, de tension et de capacité selon les propriétés électriques des matériaux qui varient avec la teneur en humidité.

D'autres méthodes ont également été utilisées pour la mesure de l'humidité par les chercheurs, telles que les méthodes innovantes avec sondes à neutrons (Hansen, 2005),

résonance magnétique nucléaire (RMN) (Pel et al. 2002), électrodes ECG médicales (Sass & Viles, 2006) et capteurs à fibre optique (Healy et al. 2003).

Parmi les méthodes destructives les plus en usage, la méthode gravimétrique testée par le chercheur Hola, (2017) a donné les résultats les plus fiables. Il a conclu que cette méthode permet de déterminer la valeur d'humidité à la surface de l'enveloppe testée ainsi que dans son épaisseur, avec une grande précision. Cependant, lors de son utilisation, il est nécessaire de collecter des échantillons de matériau in situ pour des tests de laboratoire.

Dans le cas des méthodes non destructives, leur avantage incontestable est l'absence d'interférence dans la structure d'un mur et donc la possibilité de mener des recherches dans un nombre quelconque de points de mesure. Une recherche menée par Adamowski et al. (2007) a démontré que la méthode non destructive donne des résultats moins fiables et crédibles que la première méthode. Il en a conclu que la meilleure façon d'évaluer de manière correcte la teneur en humidité et sa répartition dans un mur avec des résultats sûrs est de suivre la méthode destructive.

Conclusion

Ce chapitre présente une revue de la littérature sur le comportement thermique des différentes stratégies de l'enveloppe extérieure du bâtiment. Il inclut des études expérimentales et des simulations numériques sur différentes zones climatiques, impliquant principalement plusieurs paramètres affectant le comportement thermique de l'enveloppe extérieure. Bien que les travaux présentés dans ce chapitre exposent des résultats divergents d'une étude à l'autre, néanmoins, ils partagent ensemble des résultats fiables et utiles sur le comportement thermique de l'enveloppe extérieure, à travers la réduction des températures surfacique et de l'air, et la diminution de la consommation énergétique dans les cas d'étude par rapport au cas de référence. Le présent chapitre commence par une revue de la littérature sur des travaux liés aux revêtements extérieurs du bâtiment, sachant que les études portées particulièrement sur cet élément sont très rares. Ainsi, il a exploré l'effet de l'auto-ombrage qui est considéré comme une stratégie fondamentale au niveau de l'enveloppe extérieure. Ensuite il a abordé une synthèse bibliographique sur l'effet de la couleur et de l'albédo du revêtement extérieur du bâtiment, puis l'effet de l'enveloppe intelligente à l'égard des particules de matériaux écologiques sur le confort thermique et les besoins énergétiques du bâtiment. Les études portées sur l'effet de la rugosité et la densité

du couvert végétal extérieur sont abordées également dans ce chapitre, afin de faire ressortir les stratégies pouvant être utilisées au niveau des revêtements extérieurs. Enfin, une revue de la littérature est approchée sur les différentes méthodes et normes internationales des mesures in-situ sur le transfert de chaleur au niveau de l'enveloppe extérieure. Cette partie de littérature permet de voir en détail les études conduites sur le transfert de chaleur, basées sur des standards internationaux, afin de les exploiter dans les prochains chapitres. L'état de l'art présenté dans cette partie a permis d'avoir un aperçu sur les différentes solutions qui sont en relation directe avec le revêtement extérieur. L'objectif de ce chapitre est d'extraire une synthèse des avantages et des inconvénients de chaque procédé étudié dans les travaux de recherches de l'état de l'art, et de retenir des solutions afin d'optimiser au maximum les recherches portées sur les revêtements extérieurs et leur impact sur le comportement thermique du bâtiment.

Sur la base de l'analyse bibliographique présentée dans ce chapitre, l'étude a abouti à l'adoption de plusieurs méthodes d'évaluation et qui seront partagés en plusieurs phases :

Premièrement, l'étude du comportement thermique de la texture à travers l'évaluation de la température surfacique extérieur et la fraction d'ombre, ainsi qu'à travers l'analyse des particules et des composantes de la texture inspirées de l'analyse bibliographique. Cette phase est inspirée de l'état de l'art présenté dans ce présent chapitre à travers les stratégies de l'enveloppe extérieure, et qui présente le quatrième chapitre de cette étude. Aussi, l'étude a abouti à l'adoption de la méthode moyenne de la norme ISO 9869 : 2014. Le choix de cette méthode qui est déjà présenté par plusieurs recherches bibliographiques dans ce chapitre, présente la méthode la plus appropriée au contexte d'étude, afin d'évaluer le transfert de chaleur et la résistance thermique à travers la texture du revêtement extérieur, cette phase expérimentale est présentée dans le dernier chapitre de cette étude

Les prochains chapitres présenteront donc la phase pratique, ils porteront sur des études expérimentales avec des mesures in-situ, en évaluant le comportement thermique du revêtement extérieur à travers les avantages extraits de l'analyse bibliographique de ce chapitre, et afin de mettre au clair l'effet de la texture du revêtement extérieur : Dans une première phase, sur des box expérimentaux pour apercevoir le comportement thermique de la texture, et dans une deuxième phase sur des cellules expérimentales testées au moyen des standards internationaux, afin de comprendre l'impact de la texture du revêtement extérieur sur le confort intérieur et la performance thermique du bâtiment.

CHAPITRE IV
COMPORTEMENT THERMIQUE
DES TEXTURES DU REVETEMENT EXTERIEUR

Introduction

Le changement climatique est l'un des sujets les plus débattus du 21^{ème} siècle. La planète a connu de nombreux phénomènes générés par ce changement, tels que la hausse des températures, les vagues de chaleur, l'élévation du niveau de la mer, des tempêtes plus intenses et des incendies de forêt. Depuis 1930, plus de 100 000 nouveaux composants chimiques ont été développés, avec un grand manque d'informations au niveau de l'évaluation sanitaire de ces produits, dont la majeure partie est utilisée dans la construction. Par exemple, le béton de ciment Portland, qui est le matériau le plus utilisé dans le monde (plus de 10 000 millions de tonnes/an, et dont la production dans les 40 prochaines années, augmentera d'environ 100 %), comprend des produits chimiques utilisés pour modifier ses propriétés, dont les effets sur la santé et l'environnement sont encore ignorés (Pacheco-Torgal, 2016).

L'enveloppe du bâtiment est une couche extérieure qui peut exclure les effets indésirables tout en permettant ceux qui sont estimables. Elle joue un rôle crucial dans l'amélioration de l'efficacité énergétique du bâtiment et du confort intérieur de ses occupants. Le choix de l'enveloppe extérieure est un enjeu initial à prendre en compte dans la conception durable du bâtiment. La détermination du matériau et de la texture du revêtement extérieur appropriés pour optimiser l'efficacité énergétique est une démarche très importante qui peut être assurée par multiples éléments tels que l'ardoise, la brique, le ciment, le plâtre, marbre.

Ces éléments sont utilisés pour recouvrir, consolider, protéger ou décorer les murs extérieurs. Ils peuvent également influencer la consommation d'énergie et améliorer le confort thermique intérieur grâce à leur texture. Pour approcher cette recherche, le chapitre précédent s'est penché sur la revue de la littérature des quatre principaux domaines : Le revêtement extérieur, l'auto-ombrage, les couleurs, et le revêtement cinétique intelligent.

Ce chapitre aborde le sujet de la conception thermique de l'enveloppe du bâtiment à travers la texture extérieure. La configuration de cette texture peut assurer des solutions liées à la thermique des bâtiments telles que la minimisation de la demande en énergie et la minimisation des heures d'inconfort thermique.

Les études portées sur ce sujet concluent que l'optimisation dans la configuration de la texture de l'enveloppe extérieure peut agir comme isolant thermique pour les bâtiments, en

les protégeant des rayons solaires, et en réduisant ainsi les besoins en matériaux d'isolation thermique (Boukhelkhal & Bourbia, 2021). Les solutions d'amélioration à travers des revêtements texturés sont peu exploitées, elles sont suggérées comme un nouveau domaine qui sollicite éminemment de développement à l'avenir.

1. Objectif de l'étude expérimentale

En se basant sur l'examen du chapitre précédent, le revêtement extérieur joue un rôle crucial dans l'amélioration de l'efficacité énergétique du bâtiment et du confort intérieur pour les occupants. Par conséquent, le choix de l'enveloppe extérieure est la première question à considérer lors de la réalisation d'un bâtiment économe en énergie.

En Algérie, l'utilisation de la texture en enduit comme élément décoratif apparaît dans un certain nombre de styles architecturaux traditionnels, notamment dans la partie Sud du pays, caractérisée par un climat chaud et aride, et dont les bâtiments traditionnels sont construits pour faire face aux rudes conditions climatiques.

Dans cette optique, l'objectif de cette étude est d'évaluer le comportement thermique de l'enveloppe extérieure avec différentes textures de revêtements extérieurs, inspirées des méthodes de constructions traditionnelles qui utilisaient des murs auto-ombrageant comme stratégie de refroidissement. Pour les climats chauds et arides, il est important de déterminer la texture et le matériau appropriés utilisés dans le revêtement extérieur afin d'optimiser le comportement thermique des bâtiments.

2. Situation et contexte climatique de Constantine

Dans cette étude expérimentale, des mesures ont été effectuées afin d'évaluer le comportement thermique de la texture du revêtement extérieur. Le système expérimental (TEST BOX) a été installé dans un jardin privé d'une zone dégagée dans la ville même de Constantine, située dans le Nord-Est de l'Algérie (latitude:36.9126 N, longitude:7.0213 E).

Constantine possède un climat semi-aride, avec des températures moyennes annuelles de 16,37°C, un hiver froid avec le mois de janvier comme le plus froid avec une température moyenne minimale de 2,6°C. Tandis que l'été est chaud et sec, le mois de juillet est considéré comme le plus chaud avec une température moyenne maximale de 34,6°C. L'humidité relative de l'air varie entre 57 % et 86,9 % en Août et en Janvier respectivement. Dans cette région, l'Office National de la Météorologie a enregistré une

précipitation moyenne annuelle de l'ordre de 470 mm, dont le pic se situe au mois de décembre (O.N.M, 2019). D'autre part, en dépit de l'éloignement de la mer, le barrage de Béni Haroun joue un rôle très important dans l'augmentation de l'humidité relative et du taux de précipitations.

L'intensité du rayonnement solaire est considérable. Sur une surface horizontale, l'Office National de la Météorologie a enregistré une intensité moyenne du rayonnement solaire de l'ordre de 4230W/m² par jour, avec une valeur minimale de 152 w/h/m² au mois de Décembre, et une valeur maximale de 337 W/h/m² au mois de Juillet (APRUE, 2017). Cette valeur de l'intensité solaire joue le rôle principal dans l'identification du confort thermique dans la région de Constantine. Cette amplitude des données climatiques de cette région entre le mois le plus chaud et le mois le plus froid, démontre les caractéristiques contrastées du climat.

En été et pendant les heures les plus chaudes des mois de juillet et août, l'analyse bioclimatique de Constantine présentée par le Diagramme psychrométrique ci-dessous illustre que le climat de cette ville demande des études approfondies afin de contrôler efficacement l'intensité du rayonnement solaire au niveau de l'enveloppe extérieure des bâtiments. Cette protection doit être accompagnée d'une bonne ventilation nocturne afin d'optimiser le niveau du confort thermique dans le bâtiment.

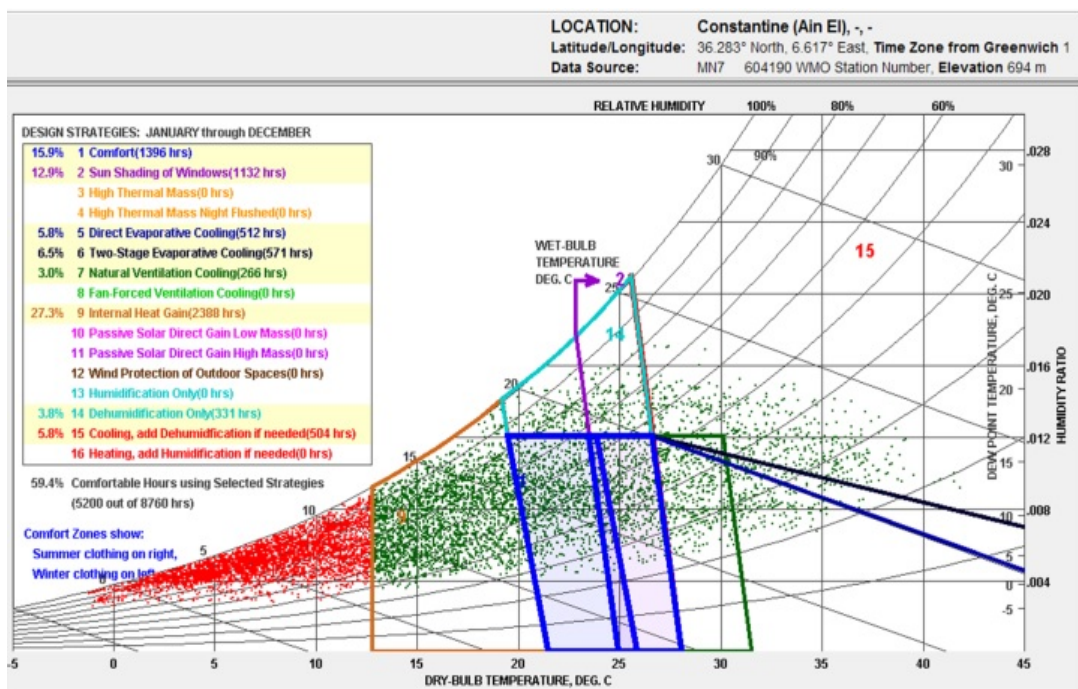


Figure 4. 1 : Diagramme psychrométrique de Constantine (source : Climate Consultant)

3. Méthodologies de l'étude expérimentale

La méthodologie d'approche globale de cette recherche est illustrée par la (figure 4.2)

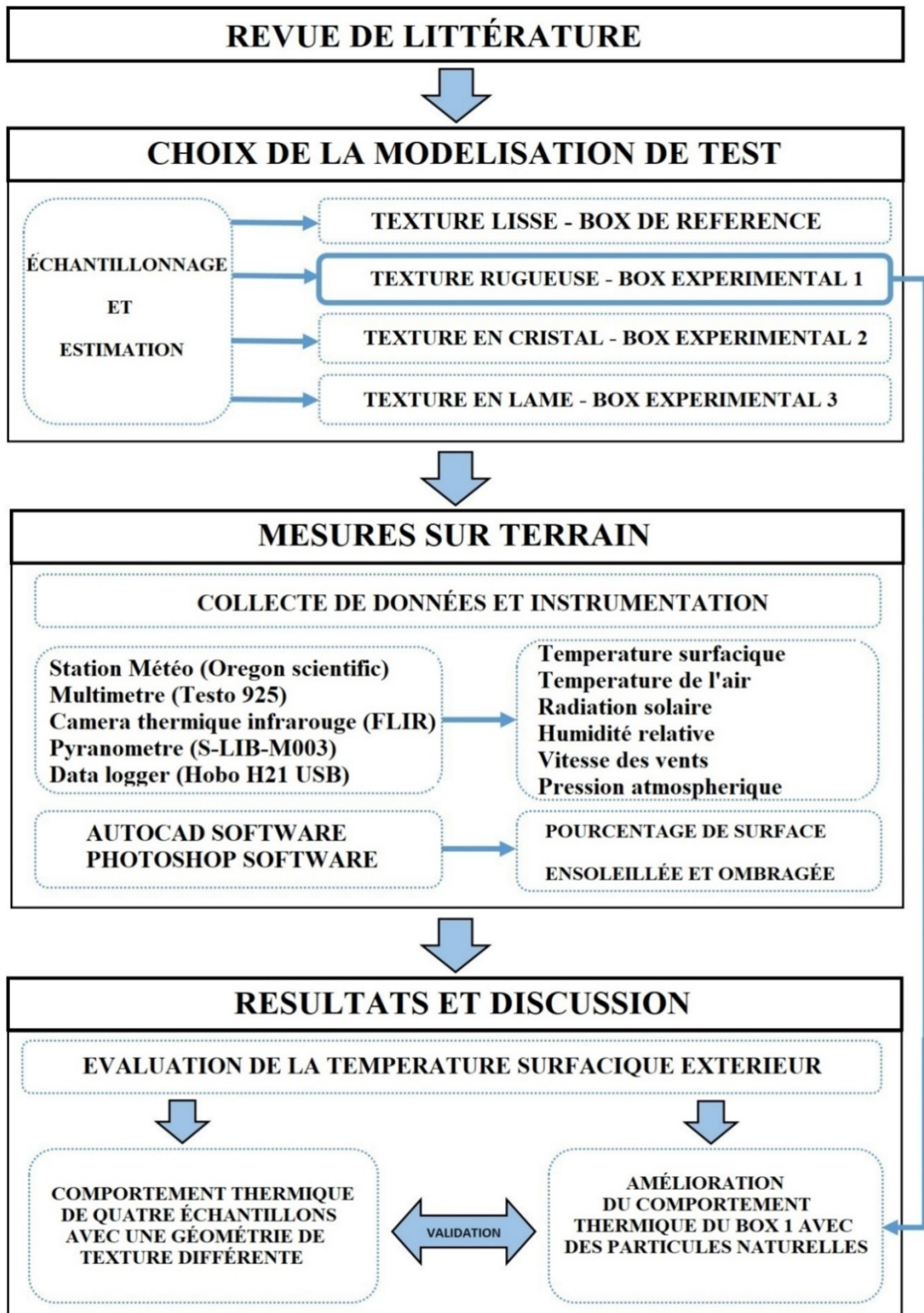


Figure 4. 2 : Étude du cadre conceptuel (source : Éditée par l'auteur, 2020).

La méthodologie suivie dans cette étude est basée sur la séquence des revues précédentes. Le modèle expérimentale choisi concernant l'effet de la géométrie de la texture extérieure sur la température surfacique extérieure a commencé par une idée qui a motivé l'étude dès le début de la phase expérimentale, afin d'améliorer les caractéristiques thermiques des murs étudiés, en essayant d'incorporer des particules naturelles (composants écologiques, organiques, déchets et recyclage) dans le matériau de revêtement extérieur. Cette recherche est utilitaire dans l'optimisation du comportement thermique de l'enveloppe du bâtiment en mesure de réduire la consommation d'énergie et d'apporter du confort aux occupants.

3.1. Description du protocole expérimental

La présente étude comportait deux phases expérimentales :

3.1.1. Première phase expérimentale (été 2019)

Cette première phase représente une investigation sur terrain, comportant une série de mesures. L'expérience consiste à réaliser quatre Boxes de 1 m³ qui exposent quatre types de revêtement extérieur. Les figures ci-dessous donnent une description détaillée des textures développées objet de l'ensemble de mesures :

Etapes 01 : Pour construire des boxes mesurant 1 m³, le choix du matériau est porté sur la brique rouge de 5 cm d'épaisseur qui va être utilisée comme support du revêtement extérieur. Cette épaisseur réduite de la brique a été choisie en vue d'éviter les effets d'inertie thermique produite lors de l'utilisation d'un matériau épais et lourd.

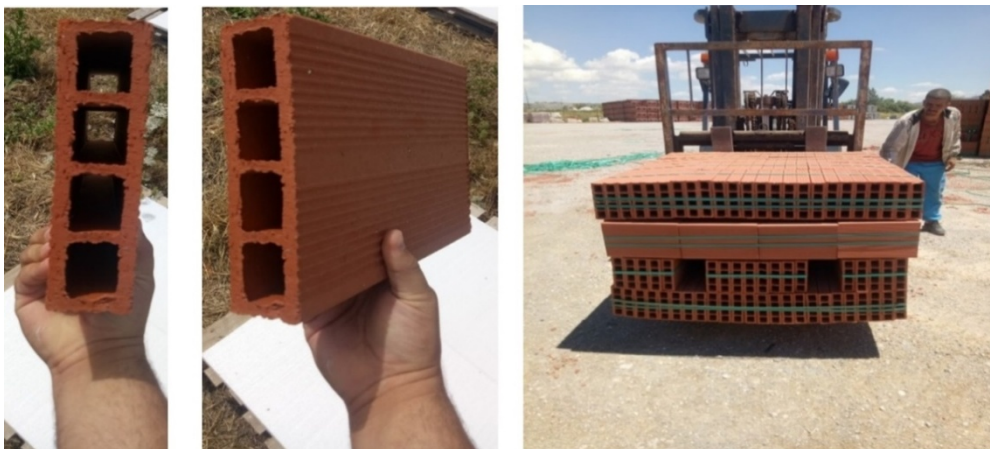


Figure 4. 3 : Choix des matériaux des boxes de mesures.

(source : Éditée par l'auteur, 2019).

Etape 02 : L'opération a été élaborée avec la présence et l'assistance d'une main-d'œuvre qualifiée pour la réalisation de cette expérimentation. Les quatre échantillons étaient munis d'une isolation au niveau du toit et du sol avec un albédo très élevé dans chaque échantillon, en considérant que la transmission thermique des toits et des sols était presque nulle.



Figure 4.4 : Réalisation des boxes de mesures. (source : Éditée par l'auteur, 2019).

Etape 03 : Après une recherche bibliographique approfondie et une enquête sur la texture traditionnelle dans le Sud algérien, le choix s'est porté sur quatre types de textures :

- **Texture lisse (STB) considérée comme texture de référence.**
- **Texture rugueuse (RTB).**
- **Texture cristalline (CTB).**
- **Texture de la lame (BTB).**

Tout comme les modèles montrés dans les (figures 4.5 - 4.6 - 4.7), les configurations morphologiques des différentes textures de revêtement sont basées sur le pourcentage de la

surface d'ombre projetée sur la surface totale de la paroi (SO/ST). Ci-dessous les différentes configurations proposées dans cette étude.

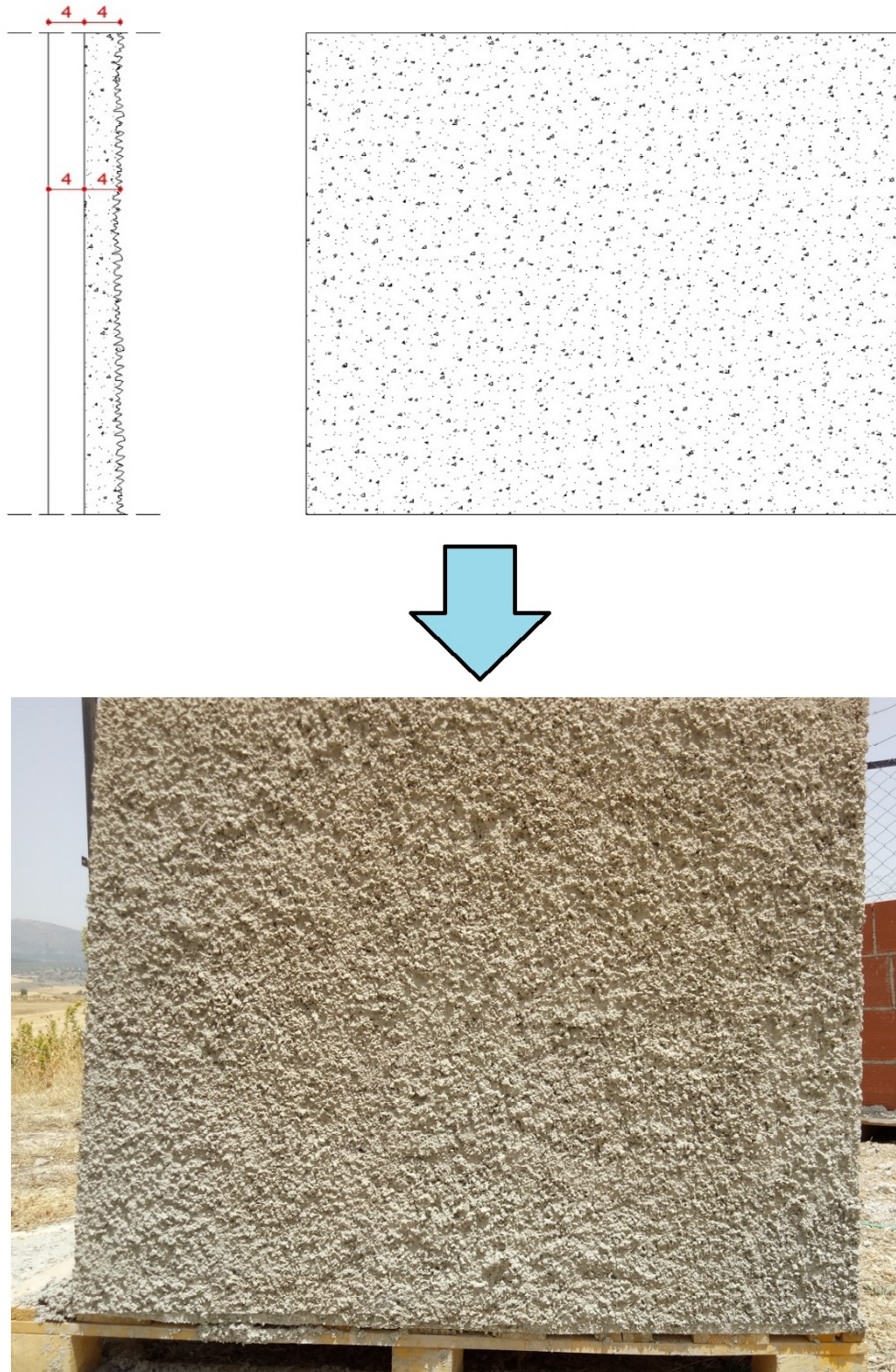


Figure 4. 5 : Description et détail de la texture rugueuse.

(source : Éditée par l'auteur, 2019).

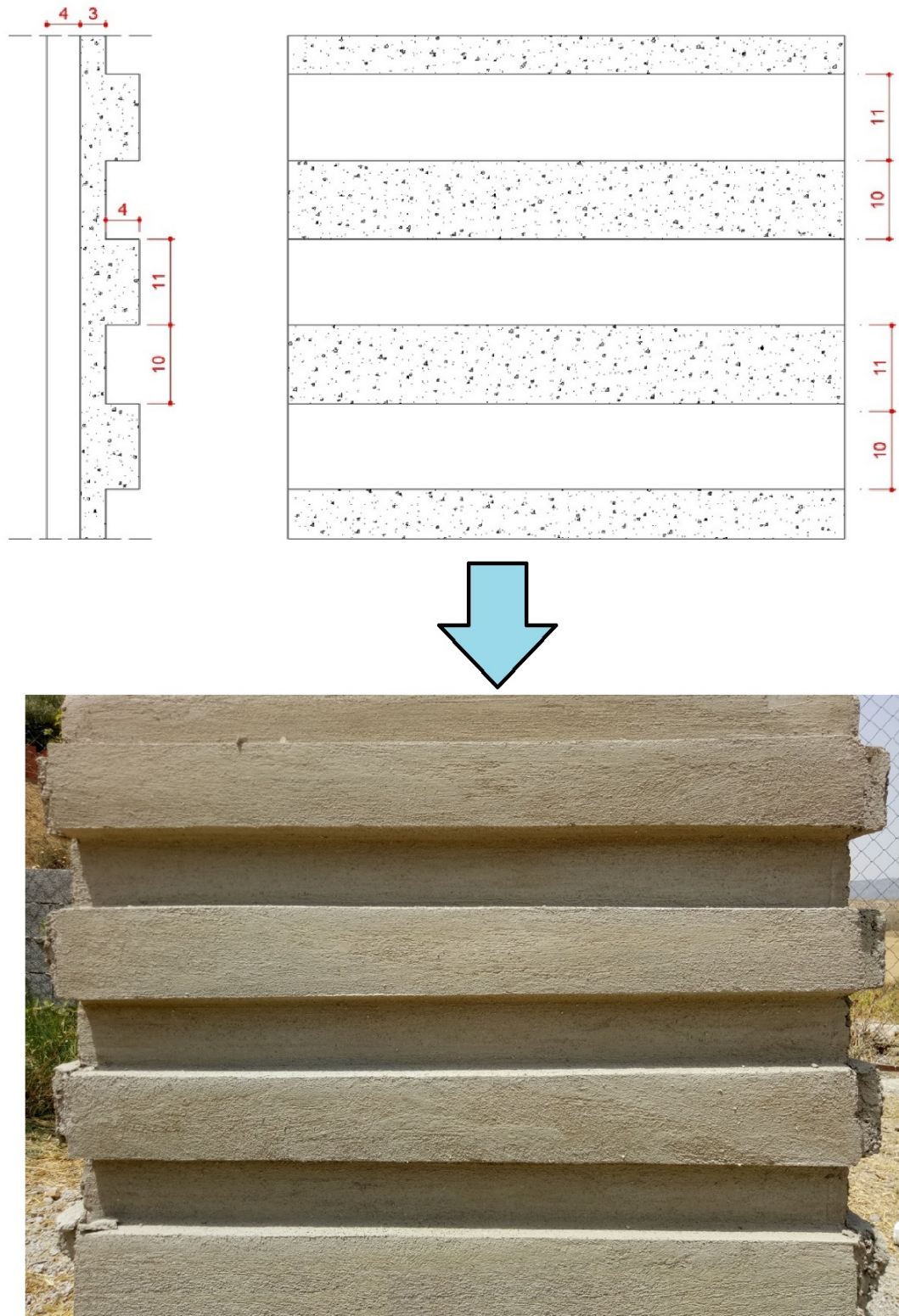


Figure 4. 6 : Description et détail de la texture en lame.

(source : Éditée par l'auteur, 2019).

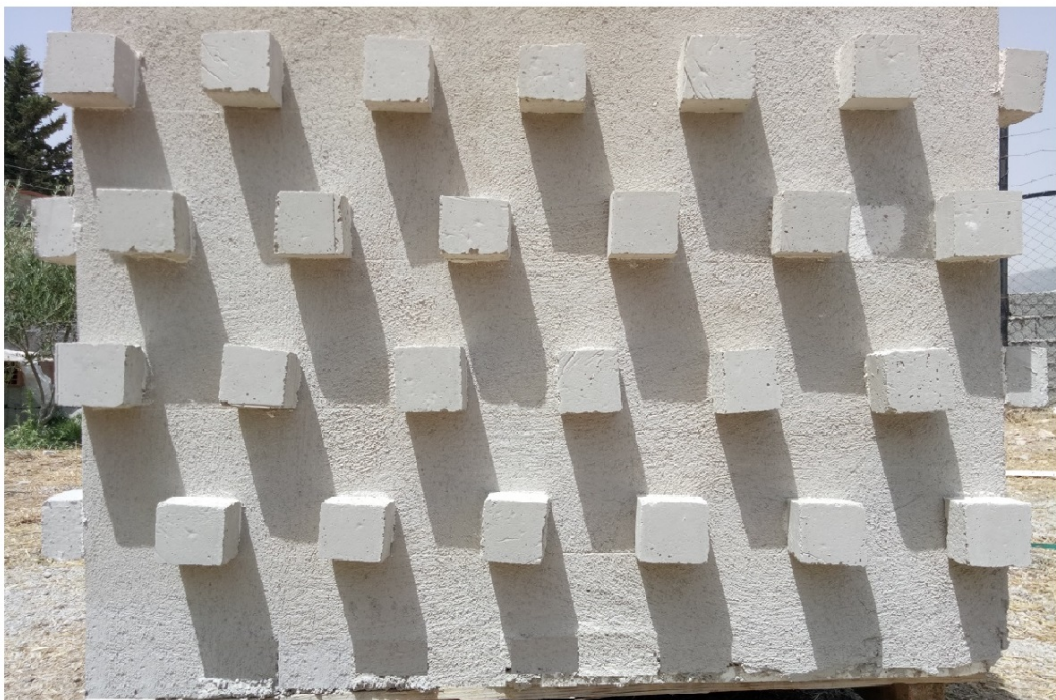
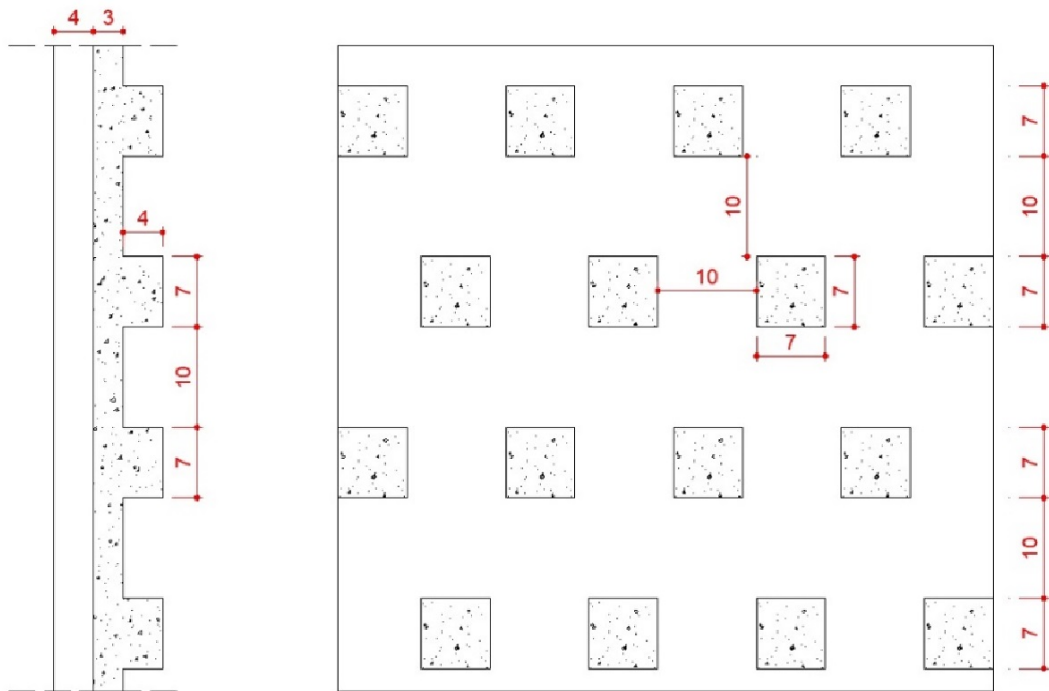


Figure 4. 7 : Description et détail de la texture en cristal.

(source : Éditée par l'auteur, 2019).

Etape 04 : À ce stade de finalisation, le matériau choisi pour réaliser le revêtement extérieur est « le mortier de ciment ». Les boxes sont d'abord testés et des mesures thermiques sont effectuées avant la pose des revêtements de texture afin d'éviter toute inexactitude ou écart dans les résultats. Les résultats obtenus dans les échantillons sans texture étaient similaires dans les quatre box expérimentaux.

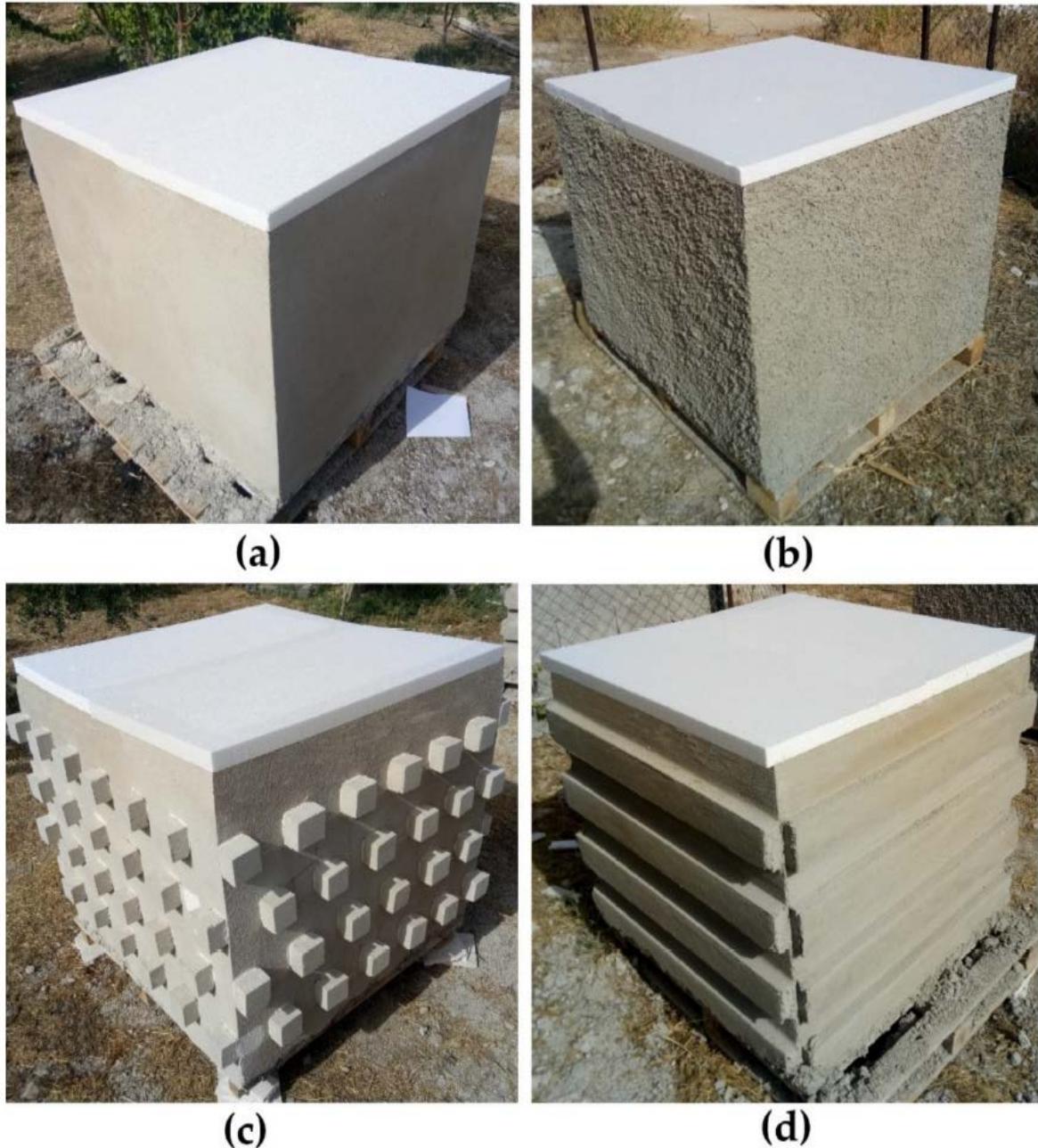


Figure 4. 8 : Finalisation des textures sélectionnées pour les mesures de température de surface. (a) texture lisse (STB) - (b) texture rugueuse (RTB) - (c) texture cristalline (CTB) - (d) texture de lame (BTB). (source : Éditée par l'auteur, 2019).

3.1.2. Deuxième phase expérimentale (été 2020)

La deuxième phase de cette recherche consiste à mettre à l'épreuve l'effet de l'incorporation de particules naturelles (composantes écologiques, organiques, déchets et recyclages) dans les revêtements extérieurs, cette phase est basée sur une conclusion faite à partir d'un état de l'art de plusieurs recherches sur les matériaux écologiques et de recyclage. Finalement, le choix est maintenu sur la texture rugueuse dans le but de garder le même aspect et l'ombre projetée, mais avec des composantes de différentes caractéristiques mécaniques et thermiques.

Après une recherche approfondie sur l'amélioration des performances thermiques des particules naturelles, une variété de particules est testée, et la sélection est faite selon trois types avec des caractéristiques thermiques différentes. La (figure 4.9) montre un composant issu des carrières de sable, un second composant produit du recyclage écologique (déchets pneumatiques) et un autre obtenu à partir de déchets de palmier dattier (particules de palmier). Ces déchets sont lavés avec de l'eau distillée pour éliminer toutes impuretés de leurs surfaces ainsi que le sel, puis séchés au four. Puis ils ont été broyés et séparés selon différentes tailles, similaires à l'agrégat de sable.

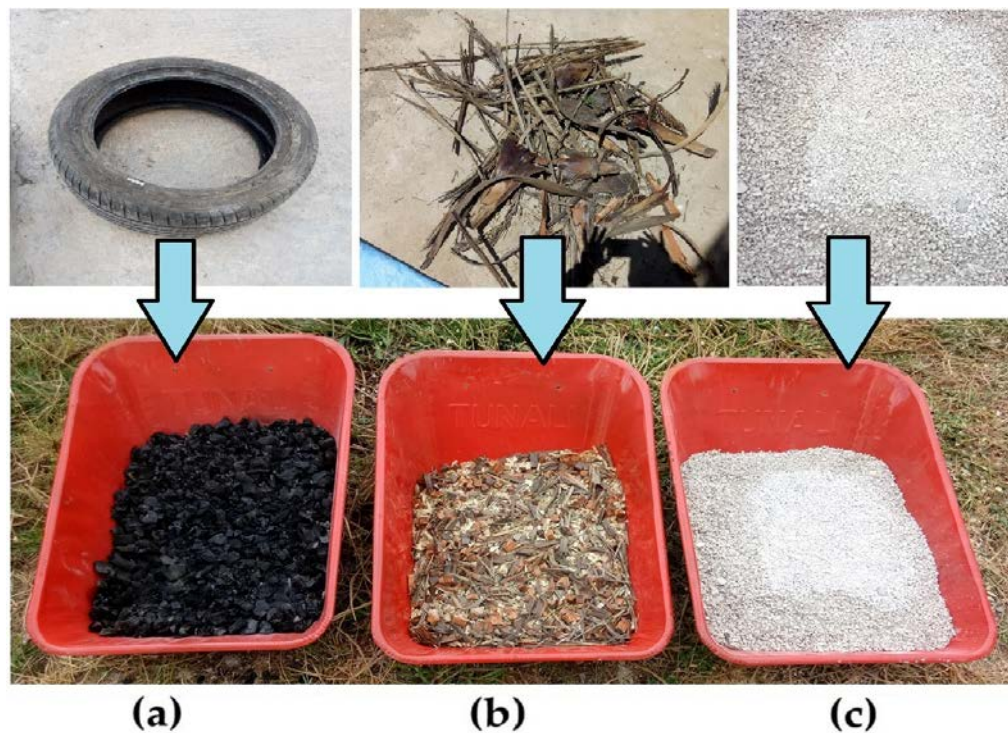


Figure 4. 9 : Évaluation du comportement thermique du granulat testé. (a : déchets de pneus- b : particules de palmier- c : agrégats de sable). (source : Éditée par l'auteur, 2020).

Les résultats de cette étude sont basés sur la capacité des trois composantes à garder des propriétés thermiques convenables du mortier de revêtement extérieur et leur comportement thermique afin de réutiliser ces déchets organiques ou de les recycler dans la fabrication de textures de revêtement rugueuses.

Après de nombreuses mesures in situ, le choix s'est porté sur les particules de palmier, qui ont montré la capacité de réduire la température de surface davantage que les agrégats de déchets pneumatiques. Ce choix s'est basé sur l'aptitude à conserver de meilleures propriétés thermiques afin d'être réutilisés comme agrégats de mortier dans la fabrication de textures du revêtement extérieur. Ce matériau a fait l'objet de plusieurs recherches. Il a prouvé une capacité thermique élevée à cause de son aptitude à réduire la conductivité thermique, la compression et le poids du revêtement (Benmansour et al. 2014). De plus, ce matériau est largement disponible à partir de palmiers dattiers de la région du grand Sud algérien (Oushabi et al. 2014). Les (figures 4.10 - 4.11) expriment la différence de température de surface des trois échantillons.

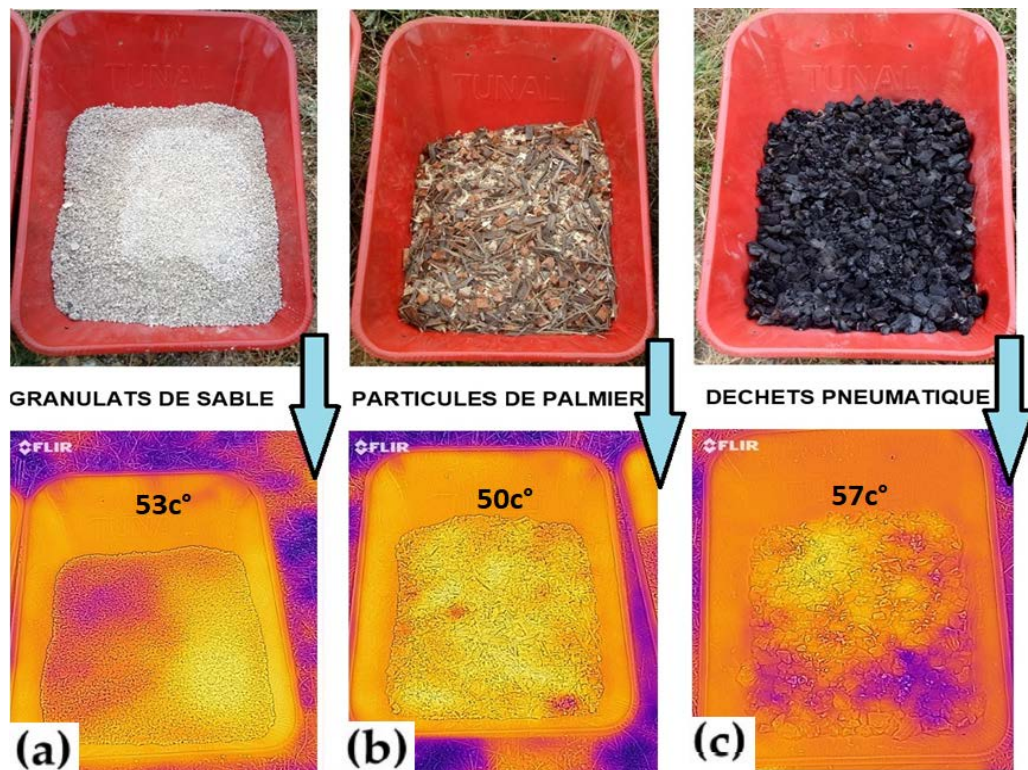


Figure 4. 10 : Comparaison du comportement thermique des trois agrégats sélectionnés

(a : Granulat de sable- b : particule de palmier- c : déchets pneumatiques)

(source : Éditée par l'auteur, 2020)

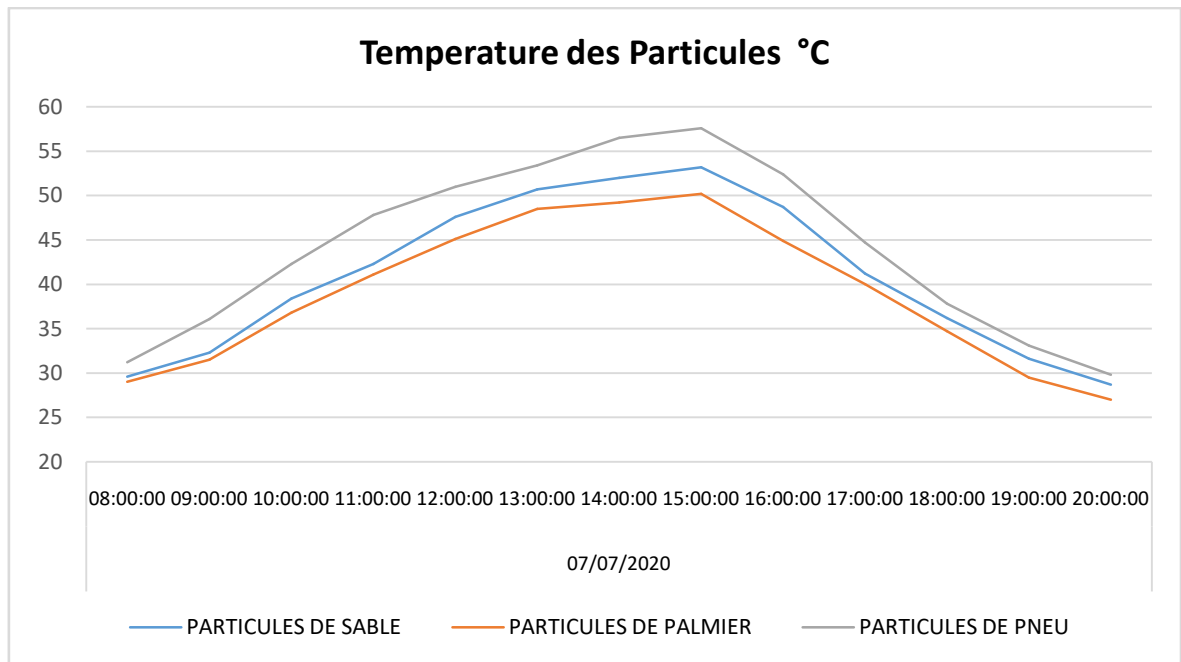


Figure 4. 11 : Valeurs de température surfacique des trois échantillons.

(source : Éditée par l'auteur, 2020)

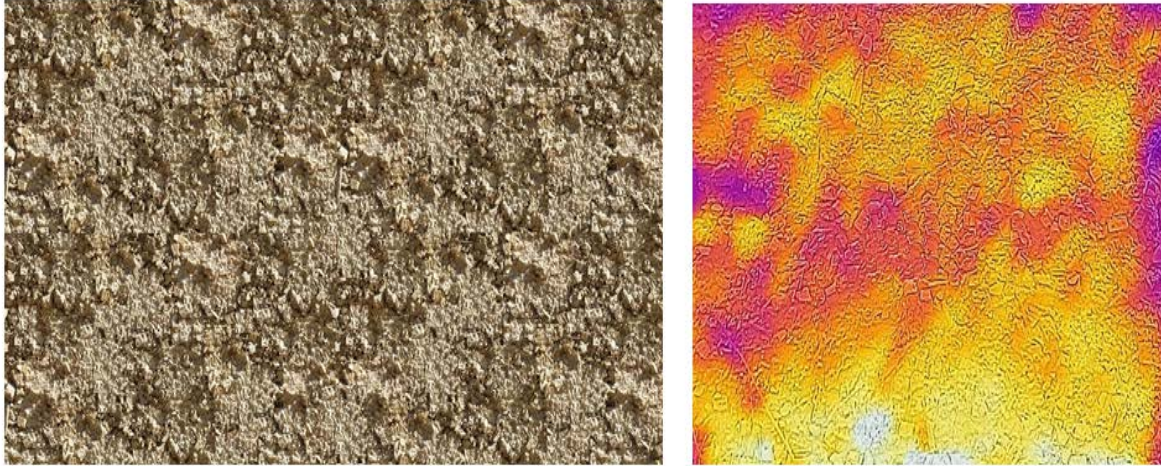
Afin d'évaluer le comportement thermique de la texture rugueuse avec et sans particules de palmier, trois box de 1m³ chacun sont construits séparément : (RTB), (RTB₁) et (RTB₂). Chacun est fabriqué avec différentes concentrations d'agrégats de particules de palmier (0 %, 30 % et 70 %) respectivement.



Figure 4. 12 : Préparation de la texture rugueuse du revêtement extérieur avec des particules de palmier (source : Éditée par l'auteur, 2020)

La (figure 4.13) montre la texture rugueuse avec différentes concentrations d'agrégats de particules de palmier (0 % et 30 %) respectivement.

REVETEMENT RUGUEUX AVEC DES PARTICULES DE PALMIER



REVETEMENT RUGUEUX AVEC DES GRANULATS DE SABLE

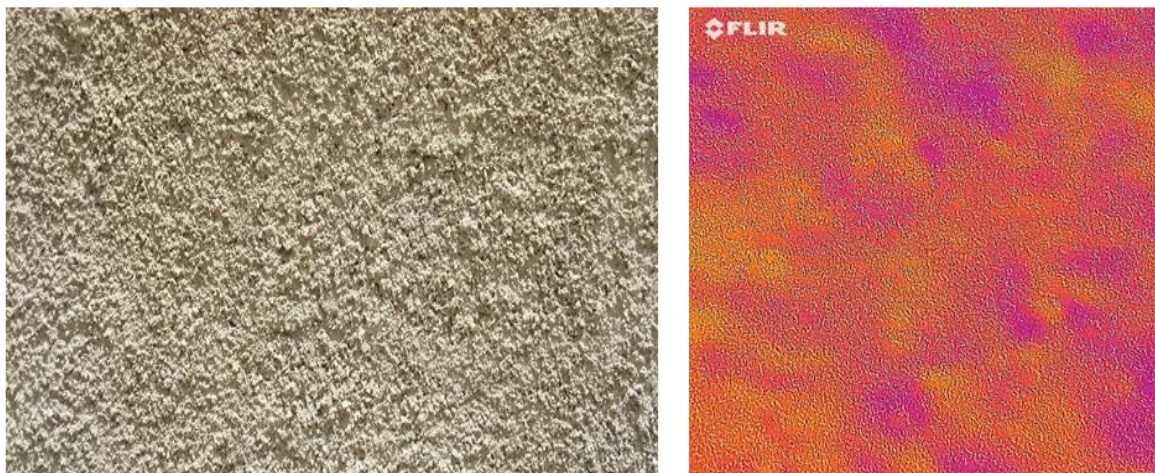


Figure 4. 13 : Texture rugueuse avec différentes concentrations d'agrégats de particules de palmier (source : Éditée par l'auteur, 2020).

3.2. Choix des instruments du relevé de mesures

Dans cette étude, le système expérimental (Test Box) est installé à l'intérieur d'un jardin privé dans une zone libérée et dégagée de toutes constructions ou plantations. Ce relevé de mesure est effectué au moyen de différents instruments pour les mesures in-situ de la température de l'air, les températures surfaciques, le rayonnement solaire, la vitesse et la

direction des vents, les humidités relatives, la pression atmosphérique, et le taux des précipitations :

3.2.1. Caméra thermique type (FLIR)

C'est un instrument professionnel de dépistage sans contact qui sert à détecter et visualiser la chaleur surfacique avec l'imagerie thermique. Avec une résolution de 464×348 pixels thermiques, et un écran tactile lumineux, cet instrument offre une mesure de température précise et facile à interpréter. Il comporte également une option automatique pour calculer la température surfacique moyenne à partir de l'afficheur de la caméra thermique (FLIR, 2021).



Figure 4. 14 : Caméra thermique type FLIR (source : Éditée par l'auteur, 2020)

3.2.2. Multimètre à sonde connectable type (TESTO 925)

Il représente un instrument polyvalent et très pratique pour les chercheurs et les professionnels. Car, grâce à la différente gamme de sondes de température qui le constitue, il permet de faire toutes les mesures relatives à la température, à savoir de contact,

d'ambiance, de pénétration, ou d'immersion. Il permet aussi d'afficher continuellement toutes les valeurs minimales et maximales de la température enregistrée (TESTO, 2021).



Figure 4. 15 : Multimètre à sonde connectable type TESTO 925

(source : Éditée par l'auteur, 2020)

3.2.3. Pyranomètre (S-LIB-M003) avec un Data logger (HOBO H21 USB)

C'est un instrument qui peut mesurer avec une précision considérable les niveaux de lumière. Le capteur de rayonnement solaire fabriqué en silicium permet un déploiement rapide. Il peut offrir une plage de mesure de 0 à 1280 W/m² sur une plage spectrale de 300 à 1100 nm. Afin de bien lire et enregistrer les résultats de cet instrument, il doit être connectable avec l'enregistreur de données HOBO H21 USB qui représente un enregistreur automatique avec une batterie externe. Il doit d'abord être programmé ou configuré (HOBO, 2021).

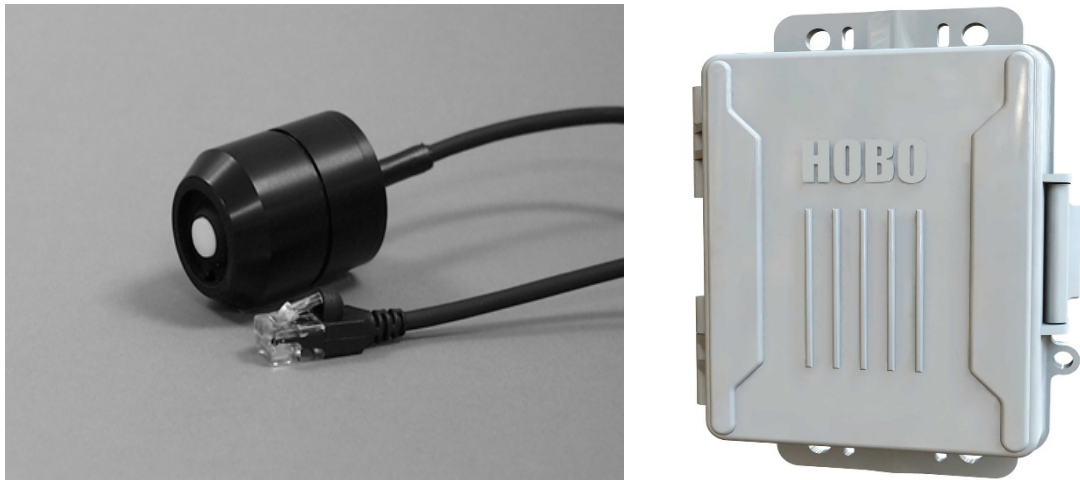


Figure 4. 16 : Pyranomètre S-LIB-M003 avec un Data logger HOBO H21 USB

(source : Éditée par l'auteur, 2020)

3.2.4. Station météo type (Oregon Scientific)

La station météorologique Oregon Scientific est un instrument qui comprend de multiples fonctionnalités telles que l'heure, les relevés de température, d'humidité, de vitesse et de direction des vents, la pression atmosphérique, les précipitations et l'indice UV de l'extérieur, afin de fournir des conditions météorologiques locales. Cette station est caractérisée par un enregistreur automatique sur logiciel, une connexion « wifi » qui transmet les informations météorologiques des capteurs vers un afficheur sans fil (Oregon Scientific, 2021).



Figure 4. 17 : Station météo type Oregon Scientific (source : Éditée par l'auteur, 2020)

3.3. Choix des périodes des relevés de mesures

Dans cette étude expérimentale, afin d'évaluer le comportement thermique de la texture du revêtement extérieur, plusieurs mesures sont effectuées. La période choisie pour la première phase et la deuxième phase de l'étude était la saison estivale allant du 23 juin au 30 juin 2019 (08 jours) qui représentent les jours les plus longs de l'année. Pour la première phase d'étude, les jours les plus chauds sont enregistrés le 25, 26, 27 juin. Les résultats sont relevés de (7h00) à (18h00) à un intervalle de 60 minutes.

Durant cette période, la station météorologique (Oregon Scientific) est installée à proximité des box de mesures, dont elle a enregistré un maximum de température de l'air (T_a) atteignant 48,2 °c à 13h00, un minimum d'humidité de 6%, et une pression atmosphérique autour de 946 hPa. De même, le rayonnement solaire sur un plan vertical enregistré par le pyranomètre était d'environ 361 Wh/m² à midi. Le (Tableau 4. 1) montre les résultats enregistrés par la station météorologique durant la première phase d'étude.

Tableau 4. 1 : Résultats enregistrés par la station météorologique Oregon Scientific :

Heure	Pression atmosphérique (hPa)	Température Extérieure (°c)	Hygrométrie Extérieure (%)	Vitesse du vent (Nœud)	Direction du vent	Précipitations (mm)	Rayonnement solaire sur un plan vertical (W/M ²)
07	948	28.0	25	1.2	SE	00	123
08	947	31.4	22	3.1	S	00	172
09	947	33.3	20	1.9	SE	00	224
10	947	39.5	16	0.8	E	00	291
11	947	43	13	0.2	N	00	322
12	947	46.3	09	1.8	SO	00	330
13	946	48.2	06	2.3	E	00	312
14	946	47.3	06	3.3	NO	00	264
15	946	47.8	06	2.3	N	00	216
16	945	43.3	10	4.3	SE	00	123
17	946	38.5	12	5.8	SE	00	69
18	945	37.2	15	3.3	O	00	47

La deuxième phase de mesures est réalisée durant la période estivale 2020, en maintenant le même choix de période de la première phase. Les résultats sont enregistrés pendant 12 heures, de 8h00 à 20h00 toutes les 60 minutes. La température maximale de l'air (T_a) enregistrée par la station météorologique (Oregon Scientific) est d'environ $44,6^\circ\text{C}$ à 14h00, et le rayonnement solaire sur un plan vertical enregistré par le pyranomètre était d'environ $328\text{ (w/m}^2\text{)}$.

4. Interprétation et discussion des résultats

4.1. Effet de la géométrie de la texture sur la température de surface

La première enquête de cette étude s'est concentrée sur l'effet de la géométrie de la texture sur la température surfacique extérieure. L'idée d'introduire de la texture en surface extérieure peut faciliter le refroidissement par effet d'auto-ombrage. En comparant les quatre échantillons mesurés, les résultats au cours de l'été 2019 ont montré des mesures variables relativement à toutes les orientations. Les résultats de la température surfacique extérieure mesurée par la caméra thermique (FLIR) et le multimètre (TESTO 925) sont présentés dans les figures ci-dessous. Nous avons pris comme exemple la façade sud.

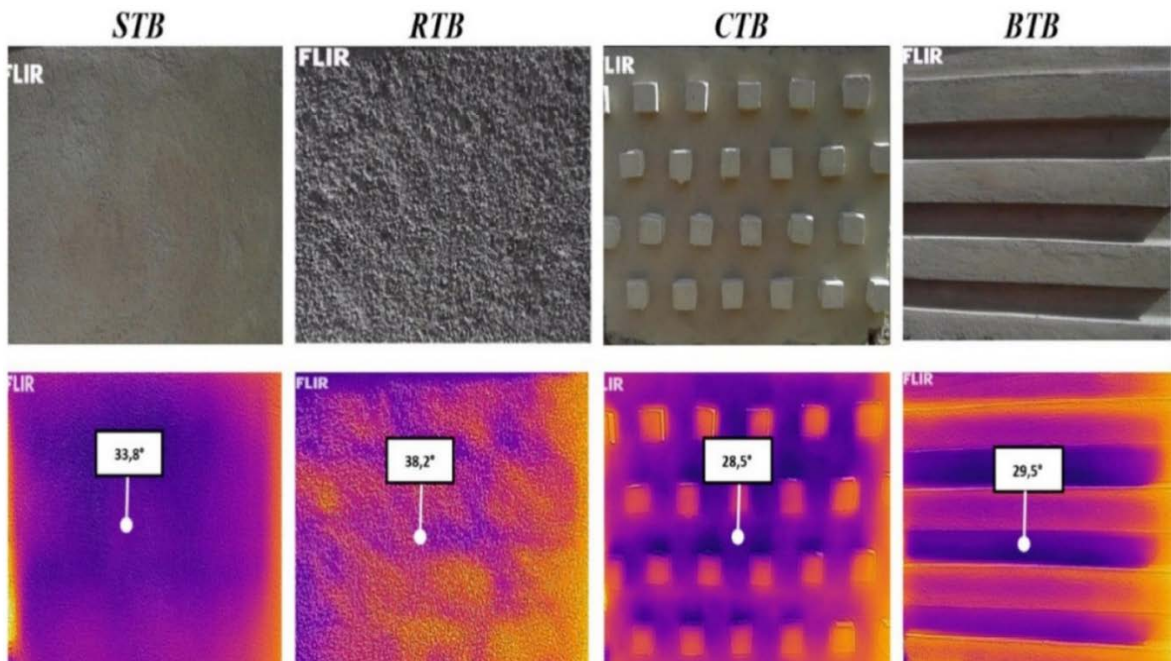


Figure 4. 18 : Température surfacique extérieure de l'orientation sud à 9h00.

(source : Éditée par l'auteur, 2019)

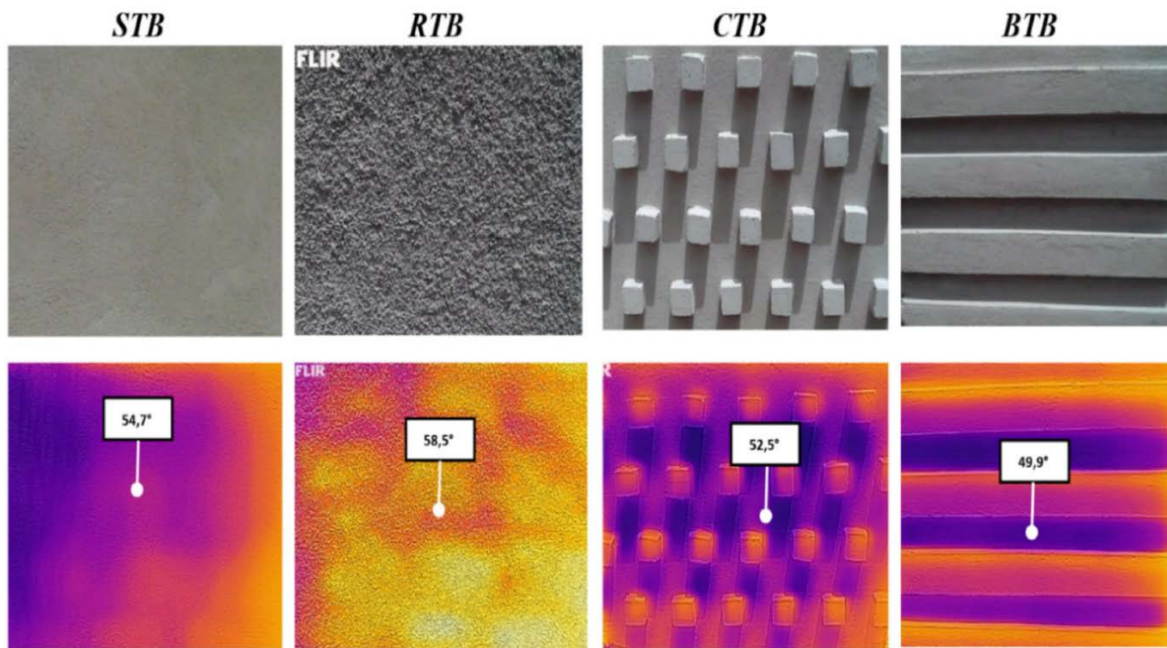


Figure 4. 19 : Température surfacique extérieure de l'orientation sud à midi.

(source : Éditée par l'auteur, 2019)

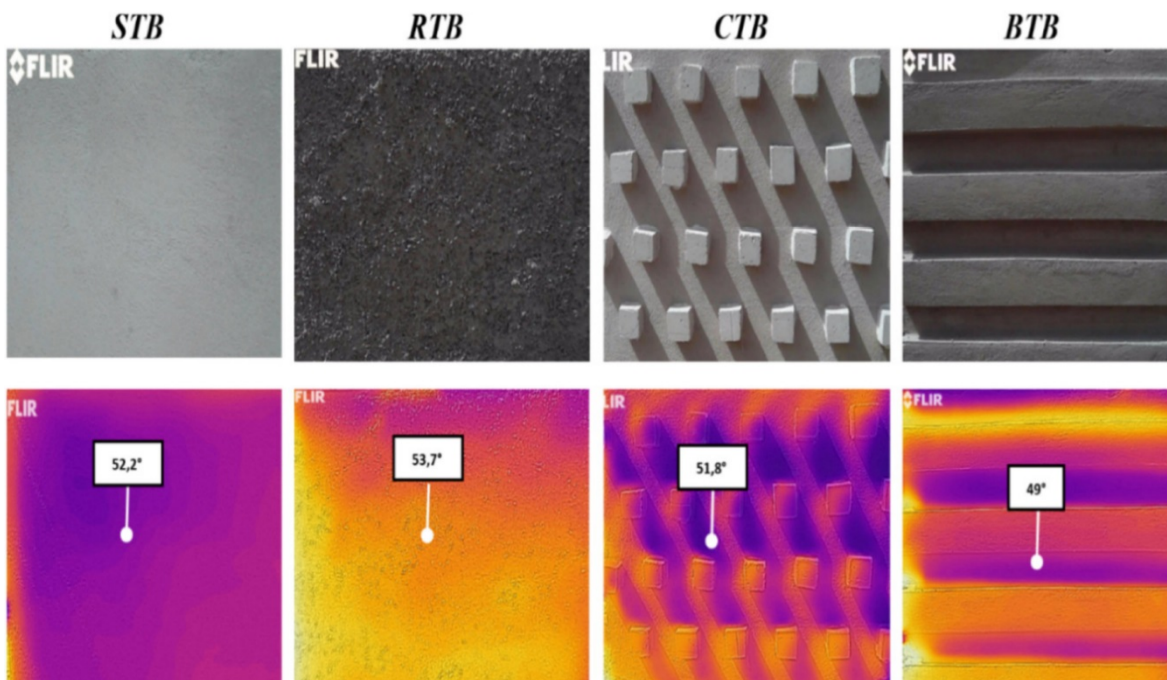


Figure 4. 20 : Température surfacique extérieure de l'orientation sud à 15h00.

(source : Éditée par l'auteur, 2019)

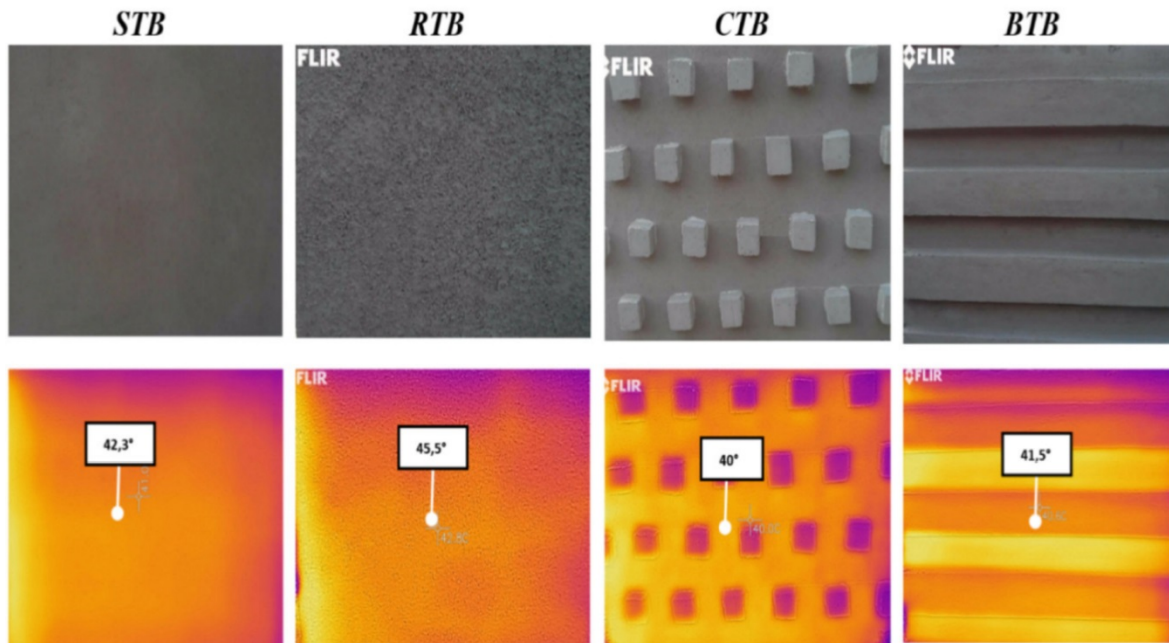


Figure 4. 21 : Température surfacique extérieure de l'orientation sud à 18h00.

(source : Éditée par l'auteur, 2019)

Les résultats de la température surfacique extérieure des quatre textures étudiées pour toutes les orientations (nord, est, sud, ouest) sont présentées dans les figures ci-dessous :

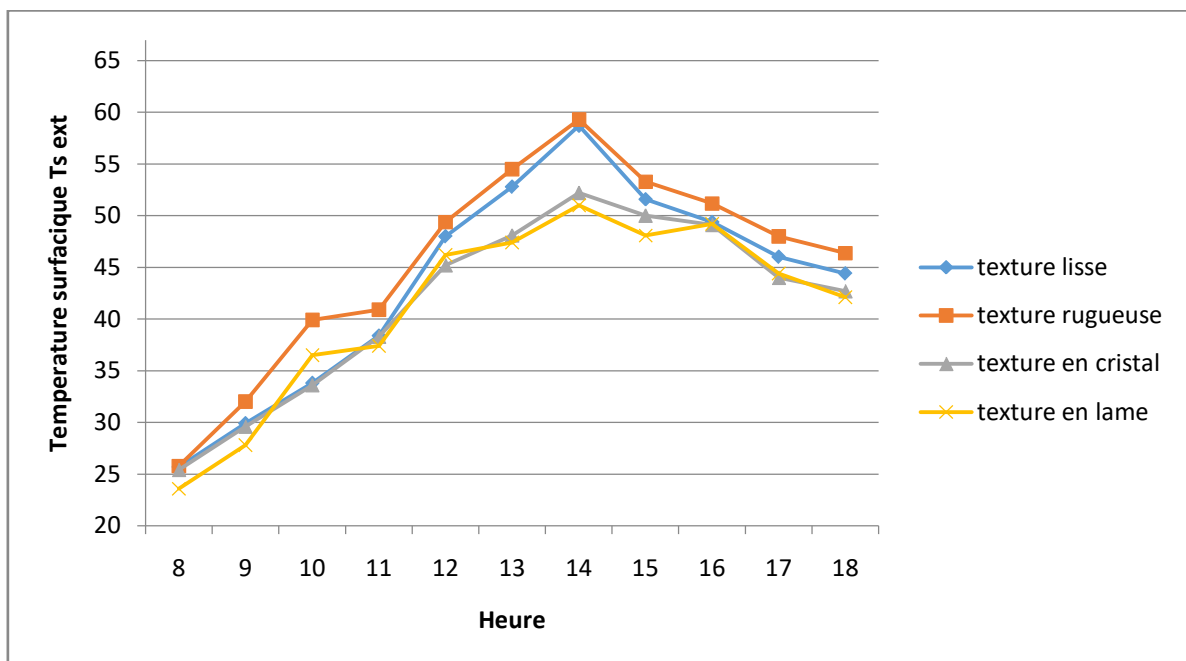


Figure 4. 22 : Diagramme de la température surfacique extérieure de la façade nord.

(source : Éditée par l'auteur, 2019)

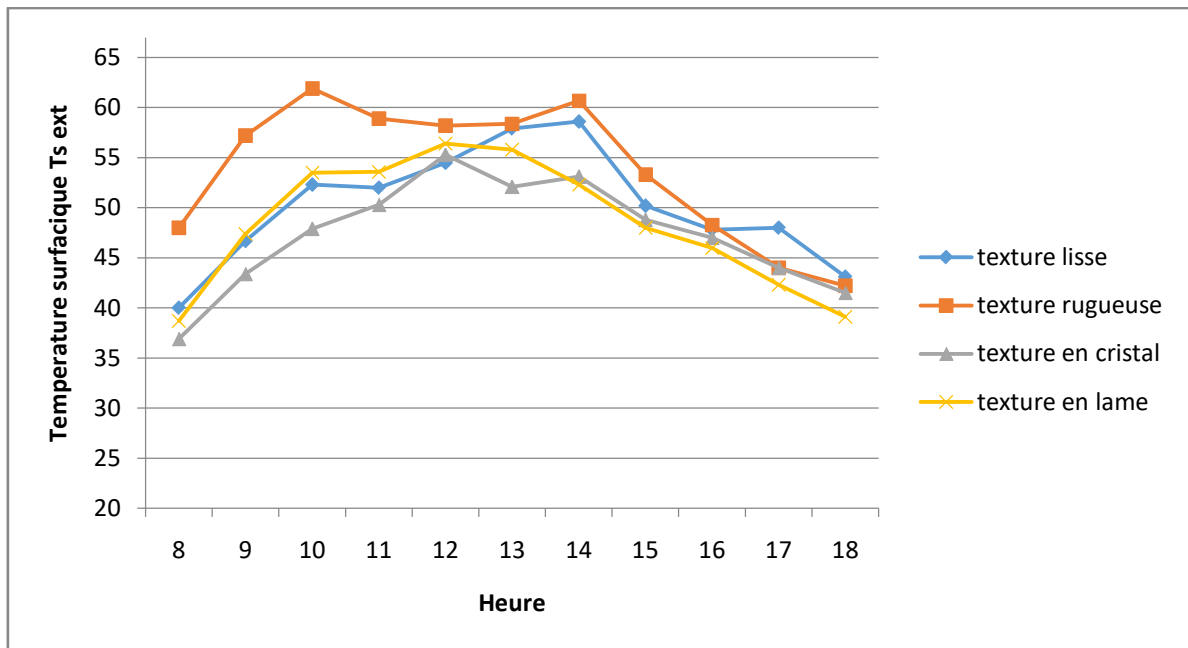


Figure 4. 23 : Diagramme de la température surfacique extérieure de la façade est.

(source : Éditée par l’auteur, 2019)

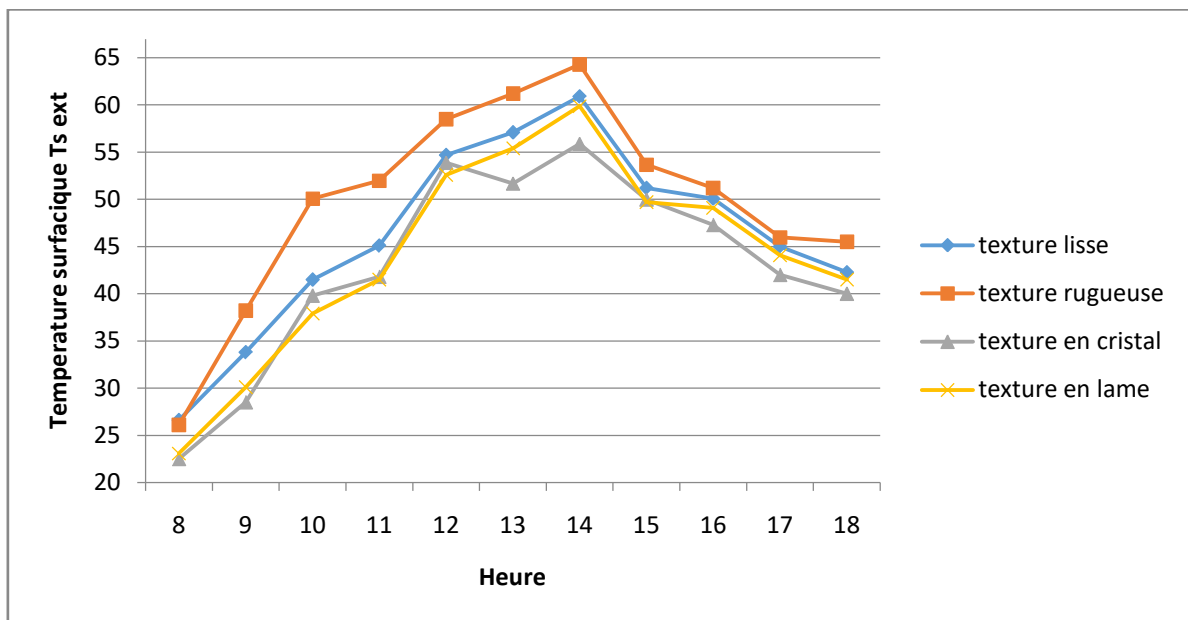


Figure 4. 24 : Diagramme de la température surfacique extérieure de la façade sud.

(source : Éditée par l’auteur, 2019)

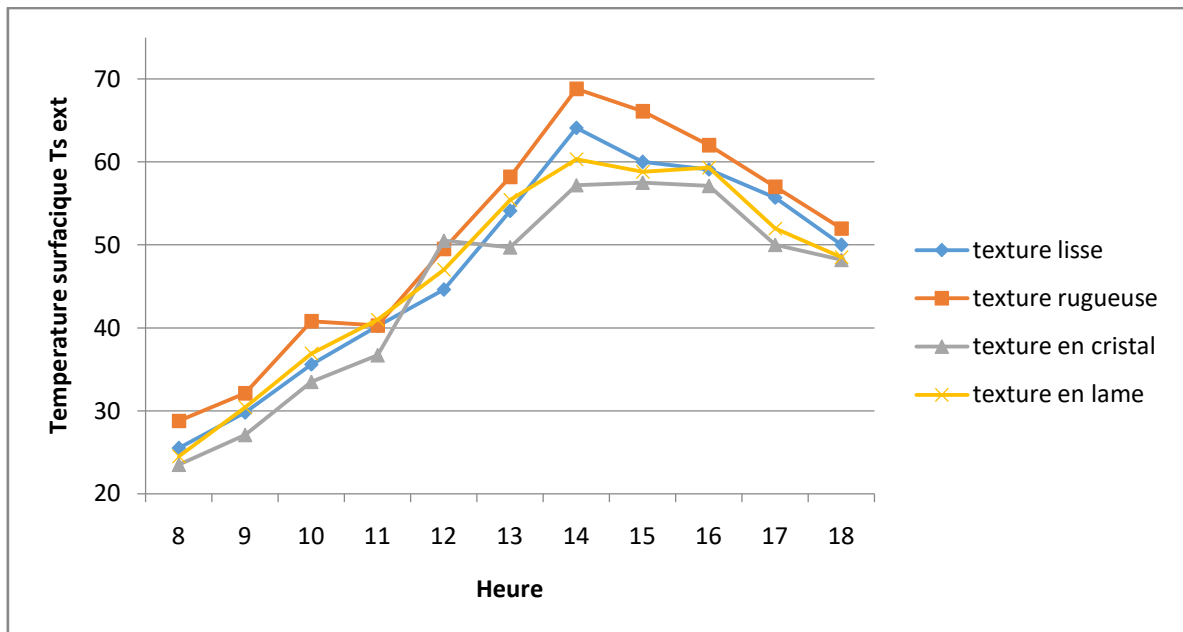


Figure 4. 25 : Diagramme de la température surfacique extérieure de la façade ouest.

(source : Éditée par l’auteur, 2019)

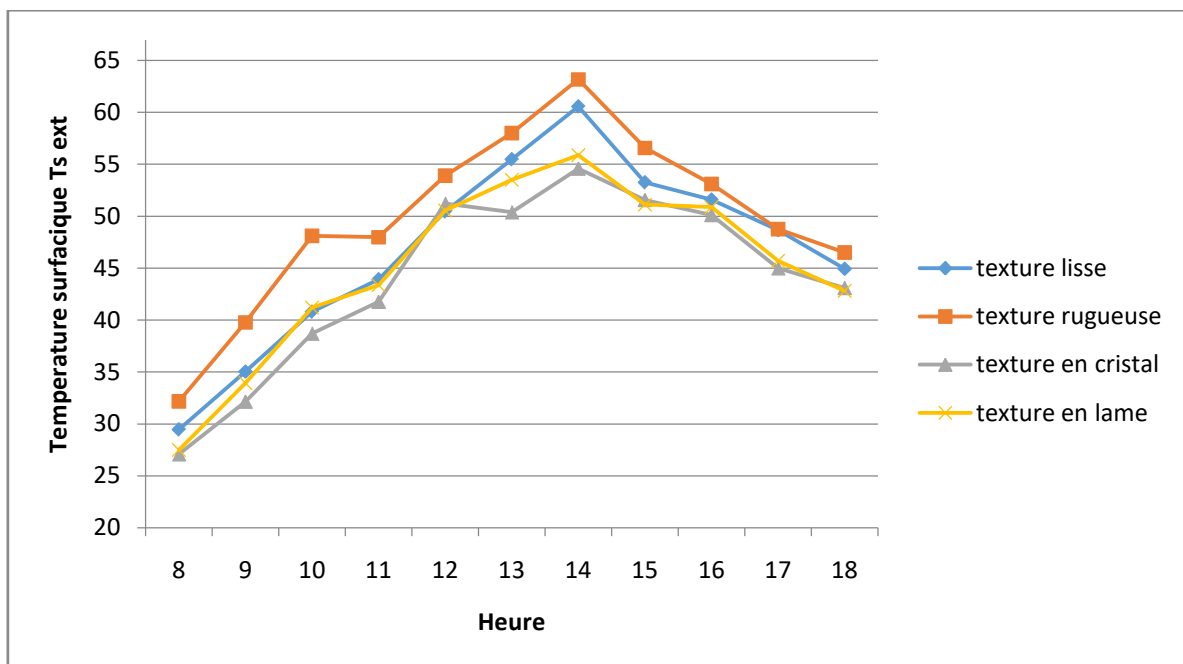


Figure 4. 26 : Diagramme de la température surfacique moyenne (nord-est-sud-ouest).

(source : Éditée par l’auteur, 2019)

A l'exemple des modèles indiqués dans les (figure 4. 22 jusqu'à 4.26), les textures qui enregistrent la valeur la plus basse de la température surfacique extérieure (EST), sont

représentées par la texture en lame (BTB) et la texture en cristal (CTB). Il est important de déterminer la fraction d'ombre (SF), qui constitue le rapport entre la surface totale exposée aux rayonnements solaires directs, avec la surface ombragée et protégée du rayonnement solaire de la même surface totale car, dans les climats chauds et secs, la minimisation du rayonnement solaire et l'augmentation de l'ombre sont des mesures estimables pour réduire le stress thermique.

A 9h00, la température de l'air (T_a) enregistrée par la station météo (Oregon Scientific) est de 33,3 °C, l'humidité relative est d'environ 20 %, et le rayonnement solaire sur un plan vertical enregistré par le pyranomètre est d'environ 224 W/m². Pendant ce temps, la texture en cristal représente la valeur la plus basse de la température surfacique extérieure (Est) = 28,5 °C. Ceci est principalement dû à la texture et la taille de la zone ombragée, avec (SF) égal à 95% par rapport à la surface totale du mur ; suivi de la texture en lame, dont la température surfacique extérieure (Est) = 29,5 °C avec (SF) = 37% sur la surface totale de la paroi. La valeur la plus critique est enregistrée au niveau de la texture rugueuse (RTB), avec (Est) = 38,2 °C, soit au niveau de la surface ombragée ou exposée, cette texture représente un pourcentage d'ombre plus important que la texture en lame.

Ces résultats sont observés tout au long de la journée du relevé. A midi par exemple, la température de l'air (T_a) enregistrée par la station météo (Oregon Scientific) est de 46,3 °C, l'humidité relative est d'environ 9%, et le rayonnement solaire sur un plan vertical enregistré par le pyranomètre est d'environ 377 W/m². Pendant ce temps, la valeur la plus basse de la température surfacique extérieure est enregistrée au niveau de la texture en lame (BTB) et donne 49,9 °C, présentant un (SF) de 41 % ; suivi de la texture en cristal (CTB), avec une valeur de 52,5 °C, présentant 40 % du (SF). La texture lisse (STB) a marqué une valeur de 54,7 °C, tandis que la texture rugueuse (RTB) a continuellement indiqué la valeur la plus élevée de 58,5 °C.

A 15h00 par exemple, la texture en lame (BTB) a enregistré la valeur la plus basse de la température surfacique extérieure (Est) de 49°C avec (SF) de 40%. Sinon, la surface rugueuse a enregistré en permanence la valeur la plus critique de 53,7°C, considéré plus élevée par rapport à la surface lisse avec 51,2°C, alors que cette dernière est totalement exposée au rayonnement solaire. Pendant ce temps, la station météorologique (OregonScientific) a enregistré une température de l'air (T_a) d'environ 47,8°C et une

humidité relative de 06%. Or, le rayonnement solaire sur un plan vertical enregistré par le pyranomètre était de l'ordre de 156 (W/m²).

Le (Tableau 4. 2) montre les différents résultats enregistrés pour la température surfacique extérieure des quatre textures étudiées, en considérant toutes les orientations.

Ces tableaux récapitulatifs montrent que le nombre d'heures les plus critiques (en rouge) dans l'orientation sud est considérablement élevé pour la texture rugueuse (RTB) (sept heures à partir de 10h00), suivi de la texture lisse (STB) avec une moyenne de cinq heures, suivie par les deux autres types de texture (quatre heures). Les heures les plus chaudes sont enregistrées entre 10h00 et 16h00. La texture rugueuse (RTB) a donc fréquemment indiqué et exposé le plus grand nombre d'heures chaudes.

Tableau 4. 2 : Températures de surface externe pour toutes les orientations répertoriées.

NORD					EST					
HEURE	(STB)	(RTB)	(CTB)	(BTB)	HEURE	(STB)	(RTB)	(CTB)	(BTB)	
										
8	25.7	25.8	25.4	23.6	8	40	48	36.9	38.7	
9	29.9	32	29.6	27.8	9	46.7	57.2	43.4	47.4	
10	33.8	39.9	33.6	36.5	10	52.3	61.9	47.9	53.5	
11	38.4	40.9	38.3	37.4	11	52	58.9	50.3	53.6	
12	48	49.4	45.2	46.2	12	54.5	58.2	55.3	56.4	
13	52.8	54.5	48.1	47.4	13	57.9	58.4	52.1	55.8	
14	58.7	59.3	52.2	51	14	58.6	60.7	53.1	52.3	
15	51.6	53.3	50	48.1	15	50.2	53.3	48.8	48	
16	49.4	51.2	49.1	49.2	16	47.8	48.3	47	46	
17	46	48	44	44.4	17	48	44	44	42.3	
18	44.4	46.4	42.7	42.1	18	43.1	42.2	41.5	39.1	
SUD					OUEST					
HEURE	(STB)	(RTB)	(CTB)	(BTB)	HEURE	(STB)	(RTB)	(CTB)	(BTB)	
										
8	26.6	26.1	22.5	23.1	8	25.5	28.8	23.5	24.5	
9	33.8	38.2	28.5	30.1	9	29.8	32.1	27.1	30.4	
10	41.5	50.1	39.8	37.9	10	35.6	40.8	33.5	36.9	
11	45.1	52	41.8	41.5	11	40.2	40.3	36.7	41	
12	54.7	58.5	53.9	52.6	12	44.6	49.5	50.5	47	
13	57.1	61.2	51.7	55.4	13	54.1	58.2	49.7	55.4	
14	60.9	64.3	55.9	59.9	14	64.1	68.8	57.2	60.3	
15	51.2	53.7	50	49.7	15	60	66.1	57.5	58.8	
16	50.1	51.2	47.3	49.1	16	59.1	62	57.1	59.3	
17	45	46	42	44.1	17	55.7	57	50	52	
18	42.3	45.5	40	41.5	18	50	52	48.2	48.5	
EST	Légèrement chaud				Chaud				Très Chaud	
	Moyennement chaud									

Ci-dessous le (Tableau 4. 3) présente le pourcentage de surfaces ombragées par rapport aux surfaces ensoleillées pour toutes les orientations des textures étudiées.

Tableau 4. 3: Rapport entre les surfaces ombragées et ensoleillées pour toutes les orientations (nord, est, sud, ouest).

H	NORD			EST			SUD			OUEST		
	RTB	CTB	BTB	RTB	CTB	BTB	RTB	CTB	BTB	RTB	CTB	BTB
	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE
	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO
08	00%	37%	10%	80%	89%	86%	35%	05%	54%	00%	00%	00%
	100%	63%	90%	20%	11%	14%	65%	95%	46%	100%	100%	100%
09	00%	40%	05%	70%	88%	83%	40%	10%	61%	00%	00%	00%
	100%	60%	95%	30%	12%	17%	60%	90%	39%	100%	100%	100%
10	00%	17%	00%	60%	81%	78%	50%	49%	62%	00%	00%	00%
	100%	83%	100%	40%	19%	22%	50%	51%	38%	100%	100%	100%
11	00%	17%	00%	50%	72%	52%	50%	57%	60%	00%	00%	00%
	100%	83%	100%	50%	28%	48%	50%	43%	40%	100%	100%	100%
12	00%	00%	00%	30%	52%	62%	50%	60%	58%	00%	00%	00%
	100%	100%	100%	70%	48%	38%	50%	40%	42%	100%	100%	100%
13	00%	00%	00%	00%	00%	00%	50%	59%	55%	30%	51%	57%
	100%	100%	100%	100%	100%	100%	50%	41%	45%	70%	49%	43%
14	00%	00%	00%	00%	00%	00%	40%	56%	57%	50%	68%	60%
	100%	100%	100%	100%	100%	100%	60%	44%	43%	50%	32%	40%
15	05%	00%	00%	00%	00%	00%	10%	61%	60%	60%	78%	77%
	95%	100%	100%	100%	100%	100%	90%	39%	40%	40%	22%	23%
16	40%	00%	61%	00%	00%	00%	00%	37%	05%	65%	88%	87%
	60%	100%	39%	100%	100%	100%	100%	63%	95%	35%	12%	13%
17	50%	38%	73%	00%	00%	00%	00%	00%	00%	75%	89%	91%
	50%	62%	27%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	25%	11%	09%
18	60%	60%	89%	00%	00%	00%	00%	00%	00%	80%	94%	95%
	40%	40%	11%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	20%	06%	05%

Sur la base des résultats obtenus, on est contraint de conclure qu'il existe une corrélation entre la fraction d'ombre (SF) et la température surfacique extérieure (Est), comme mentionné dans la (figure 4.27), tandis que la texture rugueuse (RTB) déploie la plus faible corrélation par rapport aux autres.

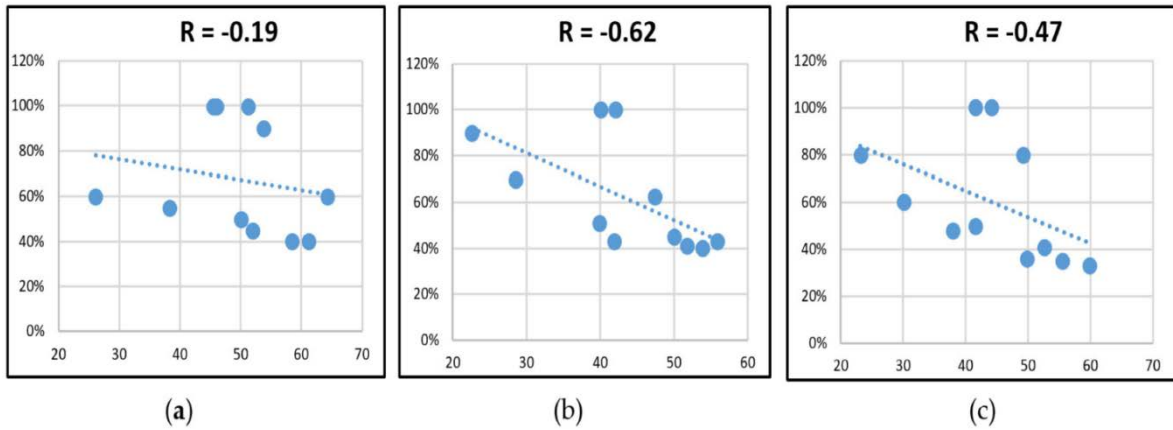


Figure 4. 27 : Rapport de corrélation entre la température surfacique extérieure (Est) et la fraction d'ombre (SF) pour (a :RTB- b :CTB- c :BTB). (source : Éditée par l’auteur, 2020).

La figure ci-dessous présente un histogramme groupé de l'évolution du (SF) par rapport à la température surfacique extérieure (Est) de la façade sud dans les quatre types de texture de 8h00 à 18h00:

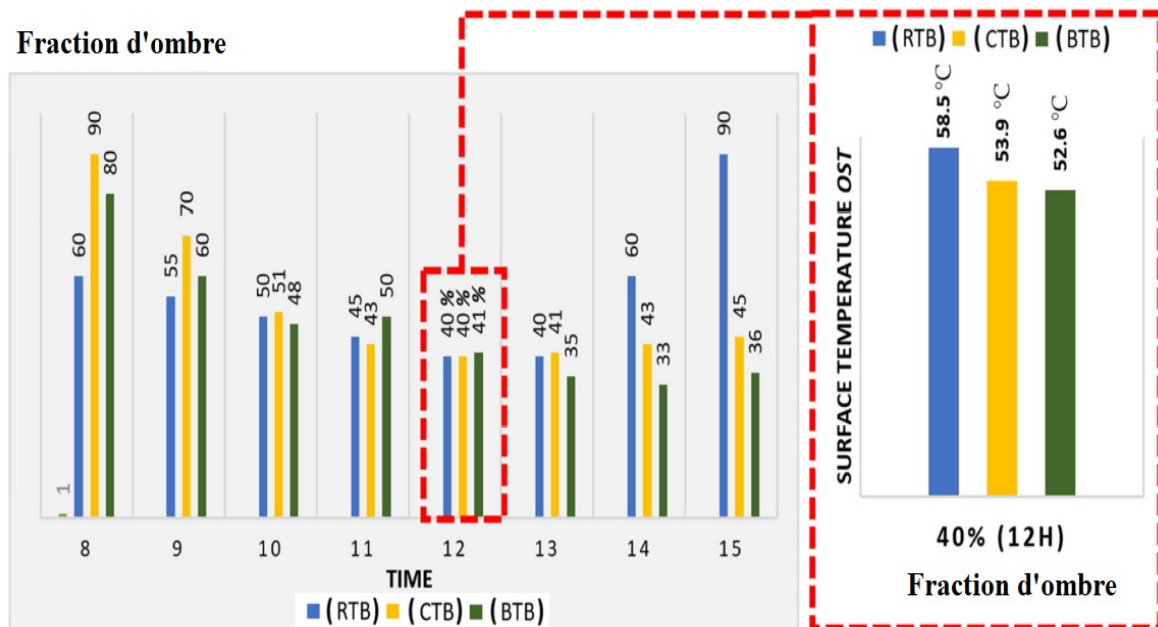


Figure 4. 28 : Température surfacique extérieure à midi, comparée au pourcentage de (SF) pour l’orientation sud. (source : Éditée par l’auteur, 2020).

Sur la base de la (figure 4.28), à midi, le pourcentage de (SF) sur le mur sud est identique (environ 40%) pour les trois textures RTB, CTB et BTB. La comparaison des résultats de température de surface externe (Est) enregistrés à midi, relève que ces valeurs sont de l'ordre de 52,6 °c pour la texture lame (BTB), de 53,9°c pour la texture cristalline (CTB),

et de 58,5 °c pour la texture rugueuse (RTB) bien que toutes les textures aient le même pourcentage de (SF). Ceci peut s'expliquer par le fait que la texture rugueuse (RTB) présente de petites taches d'ombres n'excédant pas 1 cm² et avec des positions aléatoires qui favorisent les petites réflexions et l'absorption du rayonnement solaire, contrairement aux textures en cristal (CTB) et en lame (BTB), qui présentent un assemblage de surfaces ombragées plus grandes et plus authentiques agissant comme de petits auvents protégeant le mur lui-même.

L'analyse et la comparaison des quatre textures sont présentées sur la (figure 4.29). La comparaison des diagrammes entre chaque type de texture avec les différentes orientations étudiées (nord, est, sud et ouest) clarifie et solidifie les résultats précédents qui confirment que la texture du revêtement affecte la température superficielle extérieure qui, à son tour, joue un rôle grandiose dans l'amélioration de l'environnement du bâtiment et la réduction de la consommation d'énergie.

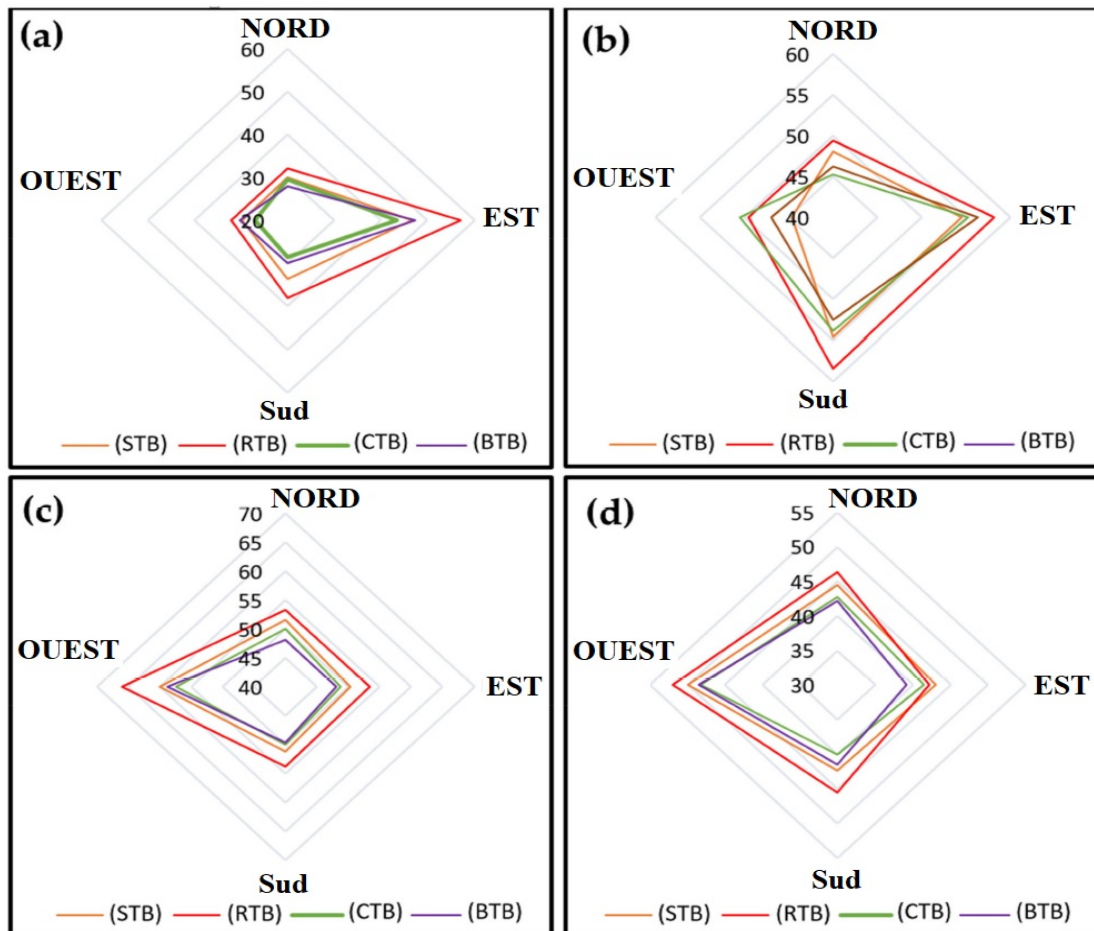


Figure 4. 29 : Température de surface externe pour toutes les orientations. (a : 9h00) (b : midi.) (c : 15h00) (d: 18h00) (source : Éditée par l'auteur, 2020).

4.2. Effet des particules de texture sur la température de surface

Les résultats de la première phase de cette étude montrent que la texture rugueuse enregistre des résultats considérablement critiques pour la température surfacique extérieure. Or cette texture est utilisée pour la plupart des revêtements extérieurs des bâtiment, plus particulièrement en Algérie. L'amélioration du comportement thermique de cette texture est indispensable en ajoutant de nouveaux composants favorables au climat rigoureux de la région. Cette méthode est réalisée en utilisant des agrégats naturels, tels que des particules de palmier, afin d'optimiser l'efficacité thermique.

La figure ci-dessous montre les résultats de la température surfacique extérieure (Est) obtenue après avoir ajouté à la texture rugueuse les particules de palmier avec différentes concentrations (RTB : 0%, RTB₁ : 30%, et RTB₂ : 70 %) respectivement.

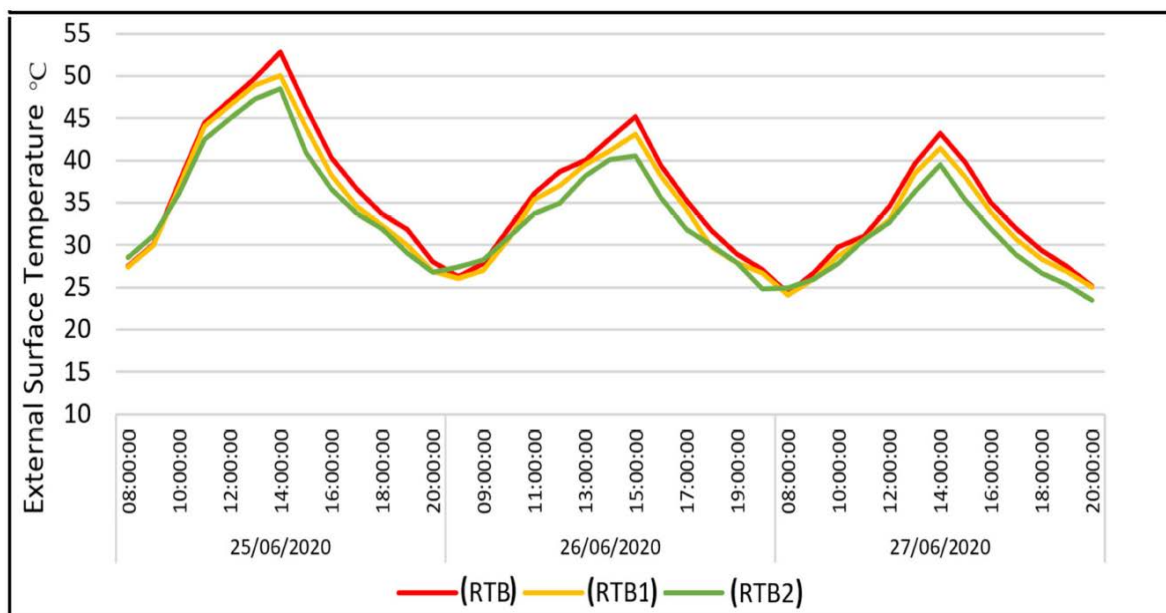


Figure 4. 30 : Température surfacique extérieure de la texture rugueuse avec différentes concentrations de particules (0%, 30%, 70 %) (source : Éditée par l'auteur, 2020).

L'agrégat de particules de palmier est ajouté en respectant les différentes concentrations, en commençant par RTB de 100 % d'agrégat de sable, RTB₁ de 30 % de particules de palmier et 70 % d'agrégat de sable, et enfin, RTB₂ de 70 % particules de palmier et 30% d'agrégats de sable, respectivement. Ce diagramme montre que les températures surfaciques extérieures les plus élevées sont enregistrées au niveau du revêtement de référence RTB, dont la valeur la plus critique est enregistrée au cours de la journée du 25 juin 2020 entre

14h00 et 15h00, égale à 52,8 °c avec une différence de 2,7 °c par rapport au RTB₁ et de 4,3°c par rapport au RTB₂. Le diagramme montre aussi que la différence de la température surfacique extérieur maximale entre le premier jour et le dernier jour de mesures peut atteindre 8 c°. Cela peut être dû à l'incorporation de particules de palmier dans la texture rugueuse avec plusieurs densités.

Ces résultats prouvent que l'utilisation de particules de palmier en plusieurs densités peut réduire significativement la température de surface externe (Est) au niveau de la texture rugueuse, car les résultats présentent une différence allant jusqu'à 4,3 °c. L'étude a montré aussi que l'incorporation de particules de palmier dans la composition du revêtement de l'enveloppe du bâtiment peut contribuer à la réduction de la température de surface extérieure avec une différence de 8 c° entre le premier jour et le dernier jour de mesures. Cette différence prouve que la stratégie de l'incorporation des particules de palmier dans la texture rugueuse, peut offrir une réduction de la température de surface en fonction du temps, qui est un facteur très important afin d'arriver aux objectifs du confort thermique souhaitable.

5. Synthèse

5.1. Profondeur de la texture

Les résultats révèlent que les textures présentant le moins de profondeur telles que la texture lisse et rugueuse, ont enregistré des températures surfaciques plus élevées que les autres. Ils confirment l'hypothèse exprimant que plus la texture de surface est profonde, plus la surface protégée par effet d'auto-ombrage augmente et plus le rapport (SF) est grand, et par conséquent la capacité de la texture à perdre de la chaleur est grande.

5.2. Organisation, disposition et assemblage de la texture

Les résultats de cette enquête illustrent clairement que les textures avec une disposition et un assemblage convenablement organisés ont contribué à mieux rafraichir que les textures rugueuses. L'organisation des dispositifs de la texture semble être plus efficace et efficace, en créant des cassures organisées selon une disposition bien définie. Cette organisation peut assurer plus de protection en augmentant la surface ombragée. De plus, cette supposition explique que la disposition et l'assemblage de la texture sont une solution

très efficace afin d'augmenter le rapport (SF), et par conséquent diminuer l'effet de la température surfacique extérieure.

5.3. Épaisseur de la texture

En examinant l'impact des différentes épaisseurs de la texture sur leurs performances thermiques, on en déduit que les textures les plus épaisses telles que la texture en lame et en cristal, présentent un rapport (SF) plus grand que les textures fines telles que la texture lisse et rugueuse. Ces résultats sont cohérents avec l'étude de Bergman (Watt et al. 2010) qui révèlent que plus le panneau de façade est fin, plus le panneau se chauffe rapidement, et donc sa température est plus élevée.

5.4. Composantes de la texture

Les résultats de la deuxième phase de cette enquête illustrent clairement que l'intégration des composants naturels dans la texture tels que les agrégats à base de particules de palmier, peut réduire significativement la température surfacique extérieure. L'étude a conclu qu'en augmentant la concentration des agrégats à base de particule de palmiers. La température surfacique diminue et le revêtement se refroidit rapidement. Par conséquent, l'utilisation d'une concentration avec plus de 70 % de particules de palmier, permet de meilleurs résultats de température de surface à condition qu'elles soient mélangées avec des adjuvants pour éviter la détérioration causée par les conditions météorologiques.

Conclusion

L'enveloppe du bâtiment est la barrière entre les environnements intérieurs et extérieurs. Elle a de nombreuses fonctions fondamentales dans le bâtiment, notamment la protection de l'espace intérieur contre les variations climatiques, ainsi que la réduction de la consommation d'énergie et l'amélioration du confort thermique intérieur. Les revêtements extérieurs des bâtiments, outre leur aspect esthétique, peuvent avoir des textures avantageuses pour réduire les gains solaires et offrir de bonnes performances d'isolation thermique. Cette recherche vise à évaluer l'effet de la texture et de la géométrie du revêtement extérieur sur la performance thermique. Afin d'atteindre cet objectif, ce chapitre examine l'impact de certaines variables morphologiques de la texture des revêtements, inspirées de l'architecture saharienne en Algérie.

On a utilisé l'imagerie thermique, les mesures in-situ en compagnie d'une étude de la température de surface sur terrain effectuées pendant l'été sur quatre échantillons (box de mesures) en tenant différentes textures extérieures et différentes orientations, dans la zone climatique de Constantine-Algérie.

Dans l'ensemble, les résultats de la première phase de ce chapitre indiquent une crédibilité significative entre la géométrie de la texture extérieure, le pourcentage d'ombre projetée et la température de surface extérieure. Les résultats de ce chapitre montrent que les panneaux de façade texturés peuvent améliorer le refroidissement, à travers la profondeur, l'assemblage et l'épaisseur des dispositifs géométriques de la texture, et qu'il existe une forte corrélation entre la morphologie créée de la texture, le rapport (SF) et la température de surface.

La deuxième partie de la recherche implique une approche similaire, et explore l'effet de trois types de particules ayant le même aspect mais avec des caractéristiques thermiques différentes. On en conclue que les agrégats de végétaux naturels « particules de palmier » possèdent de meilleures performances et contribuent à une réduction significative de la température de surface extérieure atteignant $4,3^{\circ}\text{C}$, ce qui peut entraîner une diminution de la consommation énergétique dans le bâtiment. Par conséquent, l'intégration des particules de palmier dans les panneaux ayant la même texture, peut contribuer aussi à la diminution de la température surfacique extérieure. Pour finir, cette recherche vise à impacter significativement l'environnement bâti et à élargir le champ vers de nouvelles voies de réflexion dans d'autres études futures liées à la thermorégulation.

Sur la base des résultats de ce présent chapitre, le prochain chapitre explorera l'effet des textures étudiées

sur le confort thermique intérieur dans des chambres expérimentales, en se basant sur la détermination et le calcul du transfert de chaleur à travers les textures étudiées, au moyen des normes internationales comme la norme ISO 9869.

CHAPITRE V

EFFET DE LA TEXTURE DU REVETEMENT EXTERIEUR SUR LE TRANSFERT DE CHALEUR ET LE CONFORT THERMIQUE INTERIEUR

Introduction

L'évolution de l'enveloppe du bâtiment a connu au fil des temps de multiples transformations et améliorations, selon le contexte et le climat de chaque région et période, en passant de l'utilisation de la pierre, au bois, au métal..., d'une surface rugueuse ou lisse et simple à une autre composée, adaptative et plurivalente, participant ainsi à une efficacité fonctionnelle qui influence la qualité du bâtiment afin de répondre aux défis des changements climatiques.

Le chapitre précédent a étudié l'effet de différentes textures sur la température surfacique extérieure. Cependant, leur comportement thermique démontre que malgré l'action du revêtement extérieur des bâtiments intervenant comme une barrière entre l'environnement interne et externe, la texture géométrique peut servir d'intermédiaire et fournir l'utilité et l'opportunité afin de contribuer à la performance plus large du bâtiment. De ce fait, l'exploitation des caractéristiques morphologiques de la texture du revêtement extérieur du bâtiment présente un moyen convenable afin de compléter passivement la régulation thermique des bâtiments. Cela est démontré dans des études sur la manipulation de la texture et la géométrie, pour augmenter les performances thermiques d'une enveloppe de bâtiment (Peeks et Badarnah, 2021) (Grobman et Elimelech, 2015). Par conséquent, en parcourant les études existantes, il est fort de constater qu'il existe une insuffisance dans la recherche actuelle concernant les performances des façades en utilisant des caractéristiques morphologiques telles que la texture de surface.

A partir de ces éléments, afin de vérifier les hypothèses émises au départ et de concrétiser l'objectif de cette recherche, le présent chapitre étudie l'effet des textures déjà expérimentées dans le chapitre précédant sur le transfert de chaleur et le confort thermique intérieur du bâtiment. Il s'agit de tester l'effet de plusieurs configurations de texture du revêtement extérieur où le flux de chaleur peut être transféré entre l'intérieur des bâtiments, et leur environnement par conduction, convection, et rayonnement. Toutefois, certaines morphologies de texture du revêtement extérieur peuvent améliorer les capacités de régulation thermique du bâtiment.

Pour une application plus large à l'environnement bâti, ce travail de recherche étudie et identifie le transfert de chaleur et le confort thermique à l'intérieur du bâtiment, à travers les normes internationales et les indices de confort thermique.

1. Objectif de l'étude expérimentale

L'étude expérimentale est conçue pour examiner le comportement du transfert de chaleur et le confort thermique intérieur de différentes configurations de textures de revêtements extérieurs telles initialement inspirées de l'architecture traditionnelle dans les régions Sud de l'Algérie tel que le Hoggar, le M'Zab, Timimoune.

Cette étude vise à explorer la manière suivant laquelle la texture utilisée à la surface, peut faciliter le refroidissement et le rafraîchissement dans des environnements tempérés chauds. Aussi, elle vise à étudier les capacités de perte de chaleur de manière comparative, à travers un ensemble d'enquêtes sur des variables liées à la morphologie de la texture du revêtement telles que l'épaisseur, l'assemblage, la profondeur et la taille.

En tant que technique passive complémentaire, il s'agit d'un moyen potentiellement simple, abordable et efficace qui pourrait contribuer au refroidissement des bâtiments et réduire le besoin de systèmes de refroidissement mécanique coûteux et énergivore.

2. Étapes de modélisation des cellules expérimentales

Afin de concevoir le modèle expérimental, cette étude s'est inspirée de plusieurs travaux et publications. Au début, la méthodologie de recherche combine une série d'opérations basées sur un processus international (TEST BOX - TEST CELL - TEST HOME - LIVING LAB). Dans la première étude expérimentale, l'expérimentation consiste en un essai de TEST BOX, une expérience déjà décrite par Givoni, (1983). Il s'agit de développer quatre boîtes de textures différentes en vue de distinguer la différence de résultats. Ultérieurement, dans le présent chapitre, la méthodologie suivie s'appuie sur l'essai de TEST CELL déjà mentionné par plusieurs chercheurs (Givoni, 1983) (Zhang et al. 2019) (Blanco et al. 2019). Ces études spécifient que l'utilisation de cellules expérimentales donne des résultats plus réels, plus adéquats et pertinents, surtout concernant les orientations les plus critiques qui sont respectivement les orientations ouest et sud.

2.1. Description du protocole expérimental

Les mesures de terrain sont effectuées sur Constantine, une ville du Nord-Est de l'Algérie (latitude : 46,9126 ° N, longitude : 7,0213 ° E). Le climat de Constantine est typiquement

chaud et sec en été et froid en hiver. Le système expérimental est installé dans un jardin privé sur un terrain dégagé et éloigné de toute construction et plantation. Il est composé d'une salle tampon construite en briques de béton de 15 cm d'épaisseur, et dont le sol et le toit sont une dalle en béton armé de 15 cm d'épaisseur. Cette salle tampon est totalement isolée (y compris le sol et le plafond) par des panneaux en polystyrène de 07 cm d'épaisseur, en considérant que leur transmission thermique est quasi nulle. Les figures ci-dessous montrent les différentes étapes suivies lors de la réalisation de ce système expérimental.



Figure 5. 1 : Terrain de réalisation de l'étude expérimentale

(source : Éditée par l'auteur, 2020).



Figure 5. 2 : Construction des cellules expérimentales

(source : Éditée par l'auteur, 2020).



Figure 5. 3 : Construction du plancher des cellules expérimentales

(source : Éditée par l'auteur, 2020).



Figure 5. 4 : Pose et coulage de la plate-forme des cellules expérimentales

(source : Éditée par l'auteur, 2020).



Figure 5. 5 : Travaux de maçonnerie de la salle tampon des cellules

(source : Éditée par l'auteur, 2020).



Figure 5. 6 : Construction du toit des cellules expérimentales en béton

(source : Éditée par l'auteur, 2020).



Figure 5. 7 : Réalisation et mise en œuvre des textures d'études

(source : Éditée par l'auteur, 2020).



Figure 5. 8 : Types de texture étudiés en finition (source : Éditée par l’auteur, 2020).

Après la réalisation du système expérimental et la mise en place de l’isolation de l’intérieur grâce à des panneaux de polystyrène de 07 cm d’épaisseur, les trois cellules expérimentales sont fabriquées en se basant sur les trois types de textures (Texture lisse de référence, Texture rugueuse, Texture en cristal) qui sont exposées selon l’orientation sud. Les figures ci-dessous démontrent les différentes étapes parcourues lors de l’isolation de la salle tampon en utilisant des panneaux de polystyrène de 07 cm, en même temps que la confection et l’installation de trois chambres d’essai par des panneaux de polystyrène de 10 cm d’épaisseur.



Figure 5. 9 : Mise en place de l'isolation de la salle tampon.

(source : Éditée par l'auteur, 2020).



Figure 5. 10 : Mise en place d'isolation du toit de la salle tampon

(source : Éditée par l'auteur, 2020).



Figure 5. 11 : Séparation et isolation des cellules par des panneaux de polystyrène et confection des joints avec la mousse du Polyuréthane (source : Éditée par l’auteur, 2020).

L’élaboration de cette opération depuis sa conception est effectuée en présence et avec le suivi d’un architecte (l’auteur) en compagnie d'une main-d'œuvre qualifiée.

En outre, la salle tampon isolée est utilisée afin d’éliminer l'effet du rayonnement solaire engendré par les orientations nord, est, ouest, sur les cellules d'essai. La salle tampon mesure 10 mètres de longueur, 3,7 mètres de largeur et 3 mètres de hauteur. Ainsi, les trois salles d'essai sont construites séparément à l'intérieur de la salle tampon. Elles possèdent des dimensions identiques et uniformes de 3 mètres de longueur, 2.8 mètres de largeur, et 2.8 mètres de hauteur. La face extérieure orientée au sud s’avère directement exposée aux conditions de l'environnement extérieur. Les figures ci-dessous exposent le détail de construction du système expérimental.

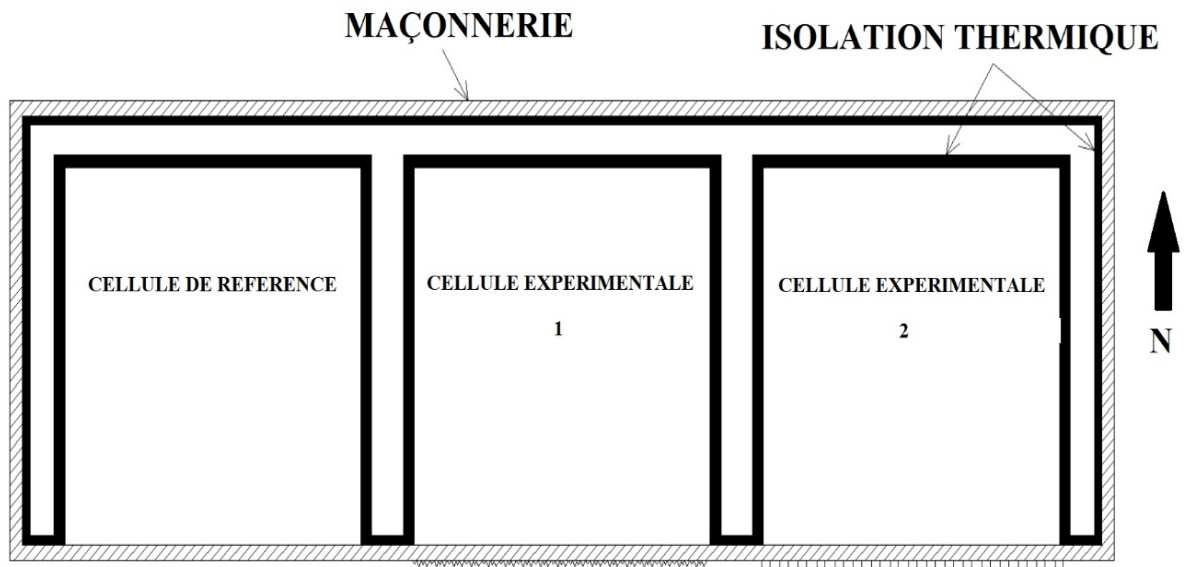


Figure 5. 12 : Plan du système expérimental -vue en plan-

(source : Éditée par l'auteur, 2020).

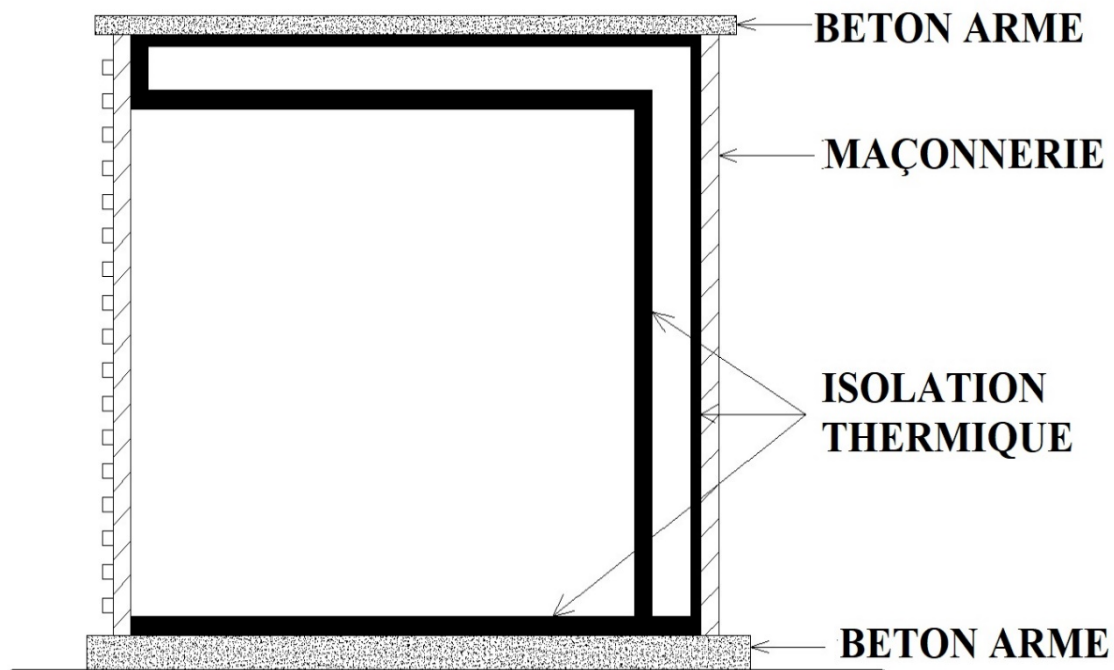


Figure 5. 13 : Coupe du système expérimental -vue en coupe-

(source : Éditée par l'auteur, 2020).

Avant la pose des revêtements mis à l'épreuve, les trois faces orientées au sud ont été testées et mesurées, afin d'éviter tout type d'erreur, d'écart ou d'imprécision au moment de la pose des textures des revêtements. Les résultats de mesures des trois cellules sans revêtement étaient similaires et homogènes par rapport à la cellule entière.

2.2. Choix des matériaux de construction

Le matériau de construction choisis pour l'élaboration de la texture au niveau du revêtement est le mortier de ciment en utilisant la combinaison courante de deux tiers de sable et un tiers de ciment. Le choix s'est porté sur le mortier de ciment pour l'accessibilité et la disponibilité de ses composants et sa manipulation simple et courante pour la main d'œuvre. L'ensemble de tous les panneaux de revêtement testés ont disposé de la même durée et du même dosage du mélange de mortier de ciment. Ce choix permet de tester divers paramètres de texture du revêtement. Aussi, il favorise et soutient la progression et le développement dans ce domaine de recherche en Algérie, au moment où la majorité des revêtements extérieurs sont construits avec du mortier de ciment. Cependant, cela ne signifie pas que le mortier de ciment constitue le matériau le plus approprié à toutes les conditions des régions et climats. Ceci est mis en évidence dans les travaux de Radhi et al. (2014) qui ont effectué leurs recherches sur les matériaux de surface du bâtiment en explorant à la fois la couleur et la capacité de stockage de chaleur. Concernant le mortier de ciment, puisqu'il présente une masse thermique élevée, sa capacité à stocker la chaleur est considérablement élevée, ce qui signifie qu'il est capable d'atteindre une température de surface plus élevée par rapport à d'autres matériaux qui possèdent une masse thermique plus faible.

3. Méthodologie de l'étude expérimentale

L'approche méthodologique adoptée pour cette étude a été entreprise par l'identification du problème de la surchauffe de la texture qui a été déjà traité dans le chapitre précédent.

Cette approche a été choisie afin de développer une solution de conception d'une manière significative. De plus, elle est articulée sur la recherche de la conception de texture du revêtement extérieur, en réalisant et en testant des échantillons tout au long du processus de mesures. La méthodologie suivie dans cette étude est illustrée dans la figure ci-dessous.

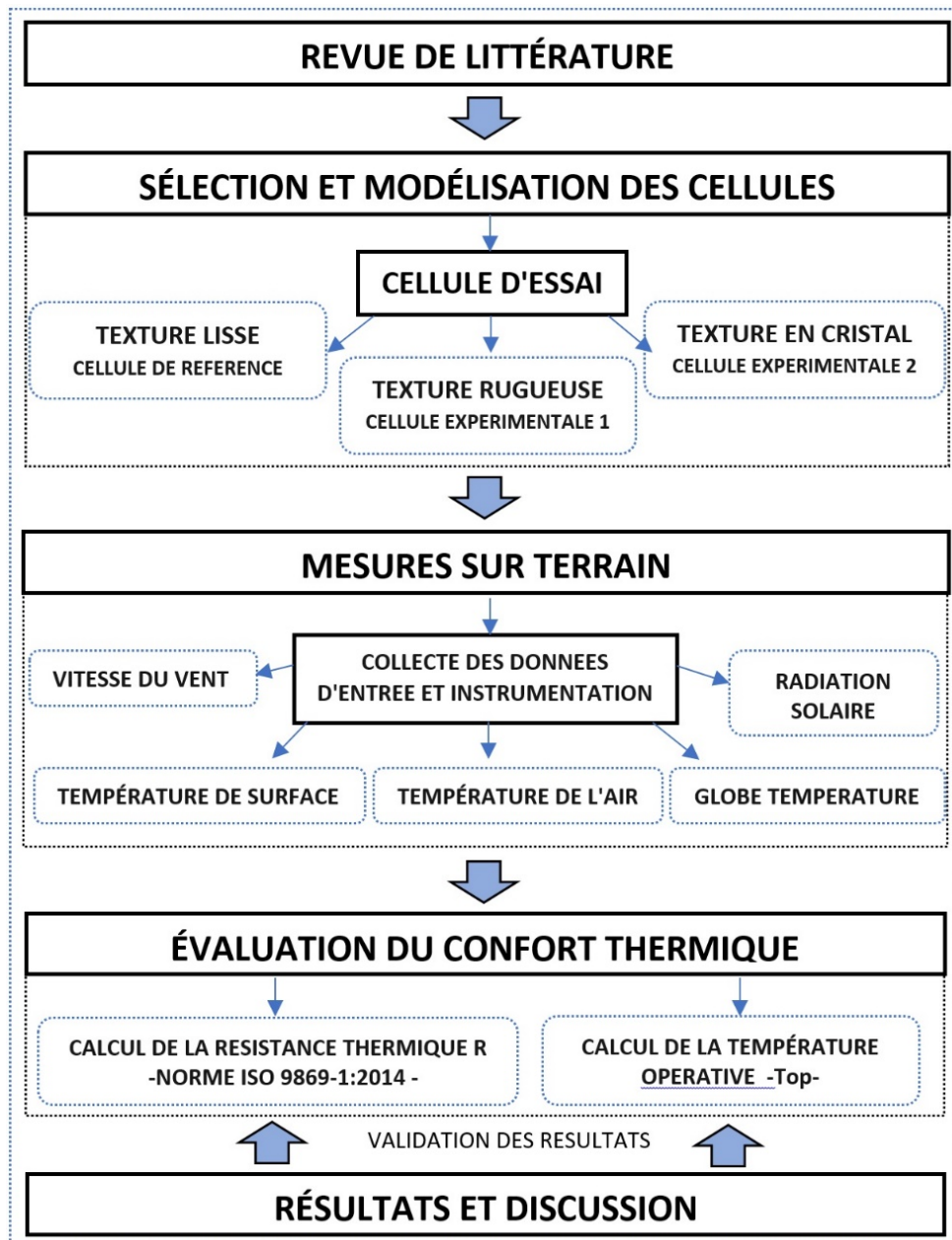


Figure 5. 14 : Étude du cadre conceptuel (source : Éditée par l’auteur, 2020).

Cette approche méthodologique est basée sur une revue de la littérature, y compris des publications récentes visant à évaluer la performance thermique des enveloppes de bâtiment. Cette recherche initiale a exploité et tiré parti de plus de 30 publications, qui sont divisées en plusieurs catégories selon la structuration et l’objectif d’étude. Les résultats de la revue de la littérature sont présentés dans le troisième chapitre.

Le choix de la texture du revêtement extérieur s’appuie sur les résultats du chapitre précédent. De ce fait, deux types de texture de revêtement sont déterminés et choisis

(texture rugueuse et texture en cristal) en ajoutant davantage un revêtement lisse comme référence. Cette étude a été fondée sur la détermination de la résistance thermique et la transmittance thermique des différents types de texture en se basant sur la norme standard (ISO 9869-Partie 1: 2014). Une estimation du confort thermique intérieur des cellules a été faite par l'indice de la température opérative -OT-. Dès lors, la description détaillée de cette méthode est donnée dans les sections suivantes.

3.1. Méthodologie suivie pour le calcul des paramètres de mesure

Dans cette étude, des mesures in situ sont menées pour évaluer la performance thermique des revêtements extérieurs, les procédures standards spécifiées dans les normes internationales sont adoptées pour déterminer le confort thermique intérieur et la performance énergétique de la paroi étudiée.

3.1.1. Calcul de R-value

La résistance thermique des murs est l'une des propriétés les plus importantes à identifier, elle est définie par l'action de la résistance au passage d'un flux thermique à travers une section de la paroi. Afin de mesurer avec précision la résistance thermique réelle des revêtements extérieurs au niveau des murs, l'étude se sert de la méthode proposée par la norme (ISO 9869-Partie 1: 2014), basée sur le mesurage in situ de la résistance thermique et du coefficient de transmission thermique (voir chapitre 3).

La norme ISO 9869-Partie 1: 2014 est généralement suivie dans la mesure in situ de la résistance thermique R-value. Cette valeur est basée sur la mesure simultanée de deux paramètres : le flux thermique moyen temporel et la température différentielle de la surface des deux extrémités de la paroi.

Dans cette étude, les recommandations conformément à la norme ISO 9869-Partie 1: 2014 sont bien suivies, prises en considération et respectées (voir chapitre 3). Les paramètres de la performance thermique sont calculés en utilisant la méthode moyenne (Average method) élaborée dans les normes ISO 9869-Partie 1: 2014. Selon cette méthode, si les paramètres environnementaux des deux environnements sont convenablement définis, R-value est calculées selon les formules suivantes (voir chapitre 3) :

$$R = \frac{\sum_{j=1}^n (T_{sij} - T_{sej})}{\sum_{j=1}^n q_j} \dots\dots\dots(05)$$

Lorsque la température moyenne radiante comprise par la surface peut être définie, la densité du débit de chaleur q peut être donnée par :

$$q = E \cdot h_r \cdot (T_r - T_s) + h_c \cdot (T_a - T_s) \dots\dots\dots(06)$$

Au préalable, le troisième chapitre explique en détail le calcul suivi et les équations utilisées dans cette étude.

Les critères de convergence spécifiés par les normes ISO 9869-Partie 1: 2014 sont respectés, afin de rapporter une valeur R_c acceptable, et les principales conditions pour retenir la mesure (voir chapitre 3) sont pertinemment respectées.

Néanmoins, Pour éviter les problèmes observés dans la pratique (la longue durée et le problème de précision), cette étude s'est référée à une méthode évoquée par Arash et al. (2018) qui dévoile la contribution des modifications apportées à la norme ISO 9869-Partie 1: 2014 afin d'améliorer les résultats des mesures in situ en termes de durée et de précision (voir chapitre 3). Cette méthode modifiée contribue à obtenir la résistance thermique avec une plus grande précision en un laps de temps plus court. Elle semble être la solution la plus raisonnable, car la valeur moyenne R_c converge suffisamment mieux et sera plus proche de la valeur finale donc plus crédible que les deux autres. De plus, l'utilisation de la valeur moyenne R_{c-ave} est une alternative pour augmenter la précision afin d'éviter de trouver deux valeurs différentes hors de la plage de précision. La formule donnée par Arash et al. (2018) est la suivante:

$$R_{c-ave} = (R_{c-in} + R_{c-out}) / 2 = \left[\frac{\sum_{j=1}^n (\Delta T)_{in}}{\sum_{j=1}^n q_{j,in}} + \frac{\sum_{j=1}^n (\Delta T)_{out}}{\sum_{j=1}^n q_{j,out}} \right] / 2 \dots\dots\dots(13)$$

Avec R_{c-in} et R_{c-out} les valeurs R_c obtenues sur la base du flux thermique cumulé à la surface intérieure et extérieure respectivement. Le détail de cette méthode est illustré dans le (chapitre 3).

3.1.2. Calcul de la température opérative T_{op}

Afin d'évaluer l'effet de la texture extérieure sur les environnements thermiques intérieurs, l'indice de confort thermique T_{op} (Operative Temperature) est utilisé dans le but de comparer le confort thermique intérieur entre les trois cellules expérimentales. L'indice T_{op} constitue la température que la personne ressent dans un environnement intérieur, il

combine l'effet de la température de l'air ambiant, de la température radiante moyenne et de la vitesse de l'air. On considère que le mouvement d'air dans chaque salle d'essai est assez négligeable (0,1 m / s). L'indice de confort thermique T_{op} est calculé à l'aide des formules suivantes (voir chapitre 3):

$$T_{op} = (t_a + t_{mr}) / 2 \dots\dots\dots(14)$$

$$T_{mr} = [(t_g + 273)^4 + 1.1 * 10^8 * (V_a^{0.6} / \epsilon_g * D^{0.4}) * (t_g - t_a)]^{1/4} - 273 \dots\dots\dots(15)$$

4. Configuration de la série de mesure

4.1. Choix de l'instrumentation

4.1.1. Anémomètre multifonction type TESTO 480

Cet instrument est un analyseur de climat multifonctionnel qui peut mesurer tous les paramètres climatiques importants avec un seul appareil : température, humidité, pression, intensité lumineuse, chaleur rayonnante, degré de turbulence, CO2, PMV/PPD et valeur WBGT. Le TESTO 480 est équipé de sondes et capteurs numériques de grande précision. Dans cette étude, l'instrument est placé à une distance de 1 mètre des cellules pour mesurer plusieurs paramètres de l'environnement extérieur tels que la température de l'air, l'humidité, la vitesse du vent, et la température de globe.



Figure 5. 15 : Anémomètre multifonction type TESTO 480

(source : Éditée par l'auteur, 2020).

4.1.2. Thermocouple Data logger type HOBO U12-012

Cet instrument est un capteur enregistreur de données utilisé pour mesurer la température surfacique sur les deux extrémités de la paroi, ainsi que la température et l'humidité de l'air. Le HOBO U12-012 accepte une large gamme de capteurs d'énergie et d'environnement. Il fournit des mesures de résolution 12 bits pour détecter une plus grande variabilité dans les données enregistrées et peut stocker jusqu'à 43 000 mesures.



Figure 5. 16 : Thermocouple Data logger type HOBO U12-012 (source: Auteur, 2020).

Dans le côté sud de la cellule, chaque texture de revêtement est équipée de cet instrument sur les deux cotés interne et externe de la paroi. Quatre capteurs sont utilisés sur la surface externe des cellules, et trois capteurs sur la surface interne pour enregistrer la température de surface intérieure, et la température et l'humidité de l'air dans chaque cellule d'essai.

4.1.3. Sonde globe de type TESTO 0602 0743 avec un Data logger type TESTO IAQ

Le thermomètre à sonde globe avec un diamètre de 150 mm, sert à mesurer la température à globe selon les normes ISO, il offre une plage de mesure de 0 à 120 °c. Le Data-logger IAQ est un enregistreur de données autonome pour des mesures pendant de longue durée jusqu'à deux semaines, et il est compatible avec la sonde à globe.



Figure 5. 17 : Sonde TESTO 06020743 - Data logger TESTO IAQ

(source: Éditée par l'auteur, 2020).

Dans nos essais, trois capteurs de cette instrument sont placés avec un Data logger de type TESTO IAQ au milieu des cellules à une hauteur de 1,4 m pour enregistrer le globe de température. La figure ci-dessous montre l'installation des instruments de mesures à l'intérieur des cellules expérimentales.



Figure 5. 18 : Installation intérieure des instruments de mesure.

(source : Éditée par l'auteur, 2020).

Les instruments qui sont déjà utilisés dans la première phase expérimentale sont le pyranomètre type (S-LIB-M003) avec Data logger de type (HOBO H21-USB), la station météo (Oregon scientific), et la camera thermique (FLIR), dont le fonctionnement de ces instruments a été détaillé dans le chapitre précédant. Dans cette étude, le pyranomètre est collé sur les parois sud pour enregistrer le rayonnement solaire projeté sur les revêtements extérieurs mesurés. Tandis que la station météo est installée à côté des cellules afin d'enregistrer et de suivre les différents paramètres climatiques.



Figure 5. 19 : Installation extérieure de la station météo

(source : Éditée par l'auteur, 2020).

Les figures ci-dessous montrent le détail de l'installation des instruments de mesures sur les cellules expérimentales.

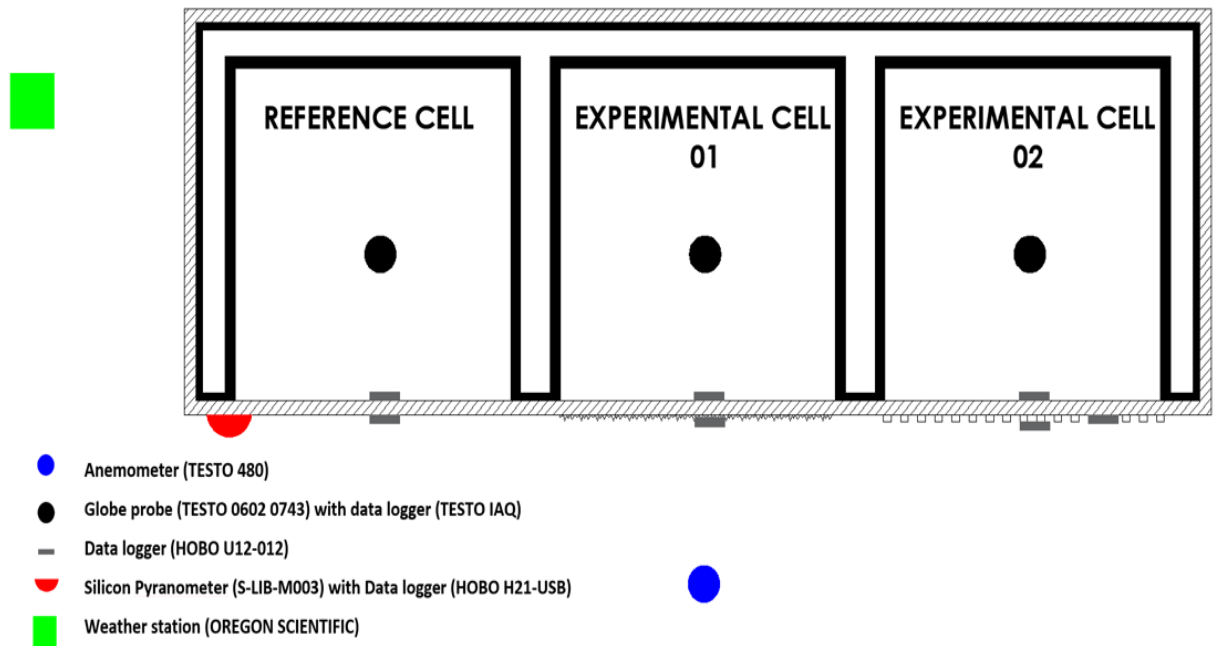


Figure 5. 20 : Détail de l'installation des instruments de mesures -vue en plan-.

(source : Éditée par l'auteur, 2020).



Figure 5. 21 : Installation extérieure des instruments de mesures

(source : Éditée par l'auteur, 2020).

4.2. Calibrage des instruments de mesure

Afin d'assurer le meilleur fonctionnement ainsi que la précision et la fiabilité des résultats de cette étude, les instruments employés sont étalonnés et calibrés. Cette opération consiste à comparer les grandeurs mesurées avec les mêmes mais mesurées au moyen d'autres instruments déjà calibrés et dans la même ambiance thermique. Les indications des deux instruments aident à la détermination des coefficients de calibrage afin de les utiliser sur les instruments employés pour l'étude.

Pour mieux placer les capteurs des différents instruments utilisées lors de la prise des mesures, et afin d'éviter tout type d'erreur, les emplacements de capteurs sont déterminés à l'aide d'une caméra thermique de type FLIR, dont des photographies d'imagerie thermique ont été prises dans chaque type de revêtement toutes les 30 minutes. Cette mesure est effectuée afin de s'assurer que l'ensemble des échantillons est soumis aux mêmes conditions environnementales.

4.3. Choix des périodes de relevés de mesures

La période choisie pour cette enquête était celle allant du 23 au 30 juin 2020 (08 jours), les jours les plus longs de l'année. Les résultats du relevé de mesures ont été enregistrés pendant 24 heures (jour et nuit) toutes les 30 minutes. Avec la même procédure, ce processus a été répété durant tous les huit jours de l'expérimentation, afin de calculer la convergence de la résistance thermique au niveau des trois cellules testées.

5. Résultats et discussions

Dans cette étude, des essais sont menés sur trois cellules expérimentales dans l'objectif d'évaluer la performance thermique de la texture du revêtement extérieure sur le confort thermique intérieur. La cellule de référence est revêtue d'une texture lisse, tandis que la première cellule expérimentale comporte une texture rugueuse, et la seconde cellule expérimentale a une texture en cristal. Les figures ci-dessous illustrent les résultats durant le relevé de mesure :

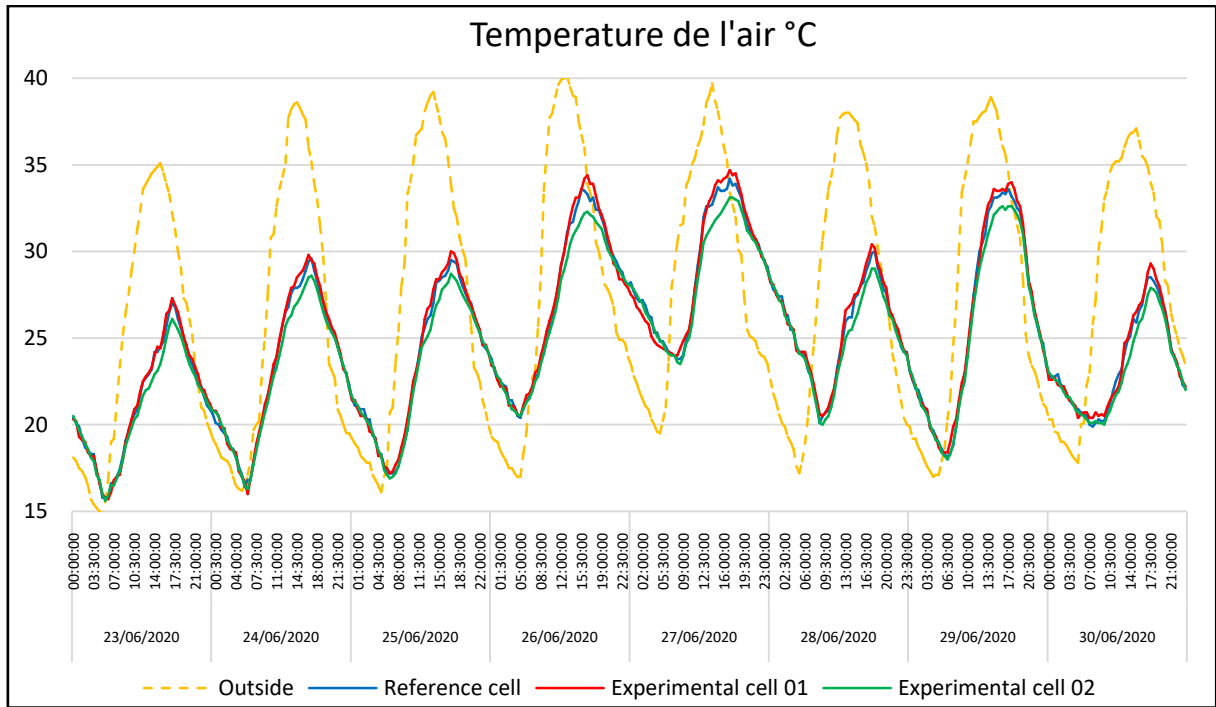


Figure 5. 22 : Température de l'air entre le 23 et le 30 juin 2020

(source : Éditée par l'auteur, 2020).

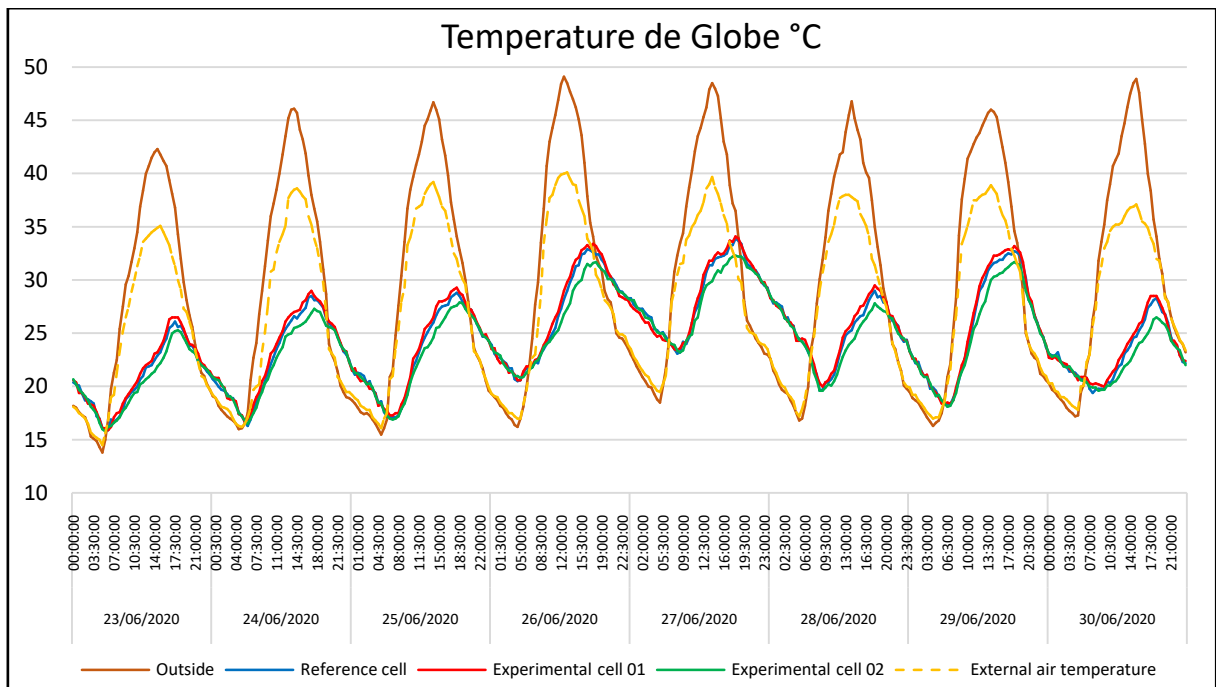


Figure 5. 23 : Température à globe entre le 23 et le 30 juin 2020

(source : Éditée par l'auteur, 2020).

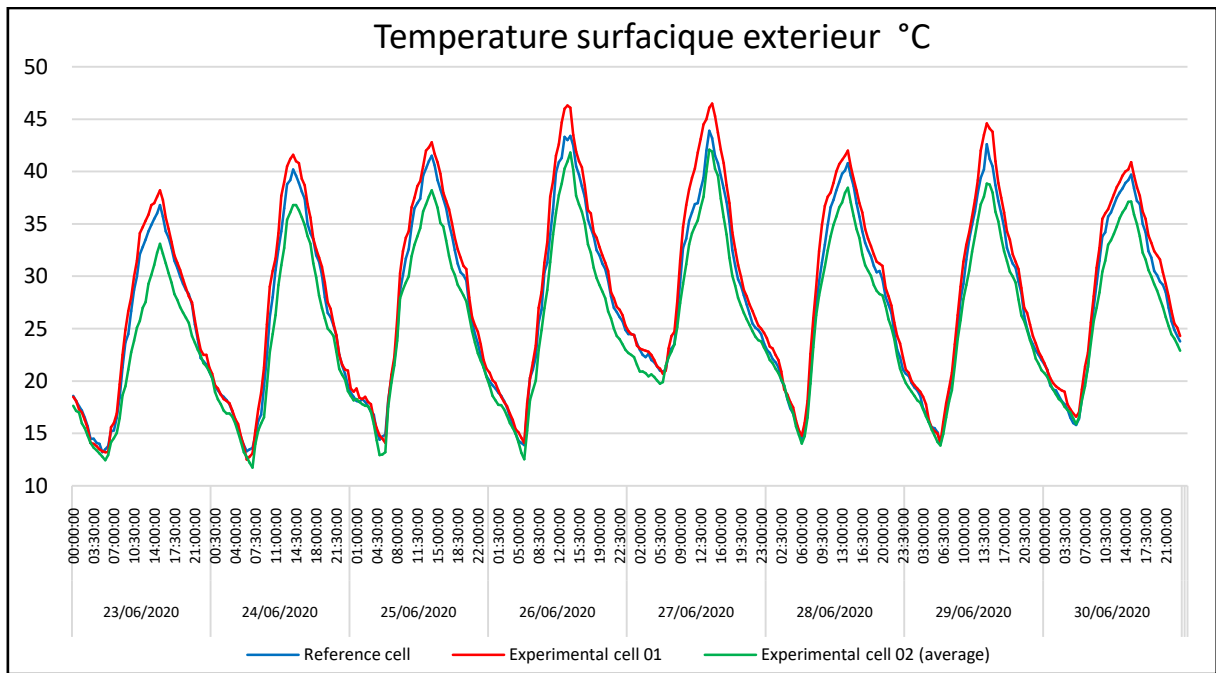


Figure 5. 24 : Température surfacique extérieure entre le 23 et le 30 juin 2020

(source : Éditée par l’auteur, 2020).

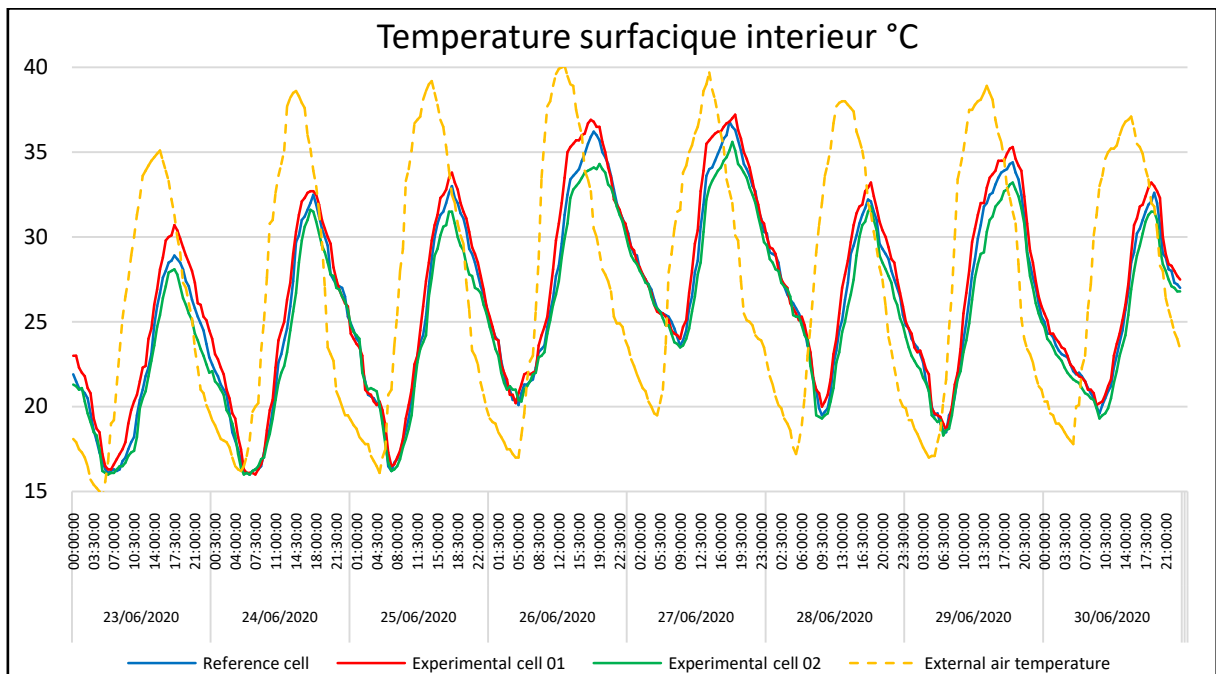


Figure 5. 25 : Température surfacique intérieure entre le 23 et le 30 juin 2020

(source : Éditée par l’auteur, 2020).

Comme déjà évoqué, la finalité de cette étude est d'évaluer la performance thermique des parois constituées de différentes textures de revêtements extérieurs, et leur effet sur le confort thermique intérieur. Toutes les recommandations conformément à la norme ISO 9869-Partie 1: 2014 sont suivies et respectées. Les paramètres de la performance thermique sont calculés en utilisant la méthode moyenne (Average method) élaborée dans les normes ISO 9869-Partie 1: 2014.

Afin d'éviter les problèmes de convergence tels que la durée et la précision des résultats, l'étude a opté pour la méthode élaborée par Arash et al. (2018) qui consiste à calculer une résistance thermique moyenne $R_{c-average}$ obtenue sur la base du flux thermique cumulé sur les surfaces intérieures et extérieures. Les résultats des valeurs R_c obtenus à partir des deux faces, ainsi que la valeur moyenne $R_{c-average}$, sont représentés sur les figures ci-dessous.

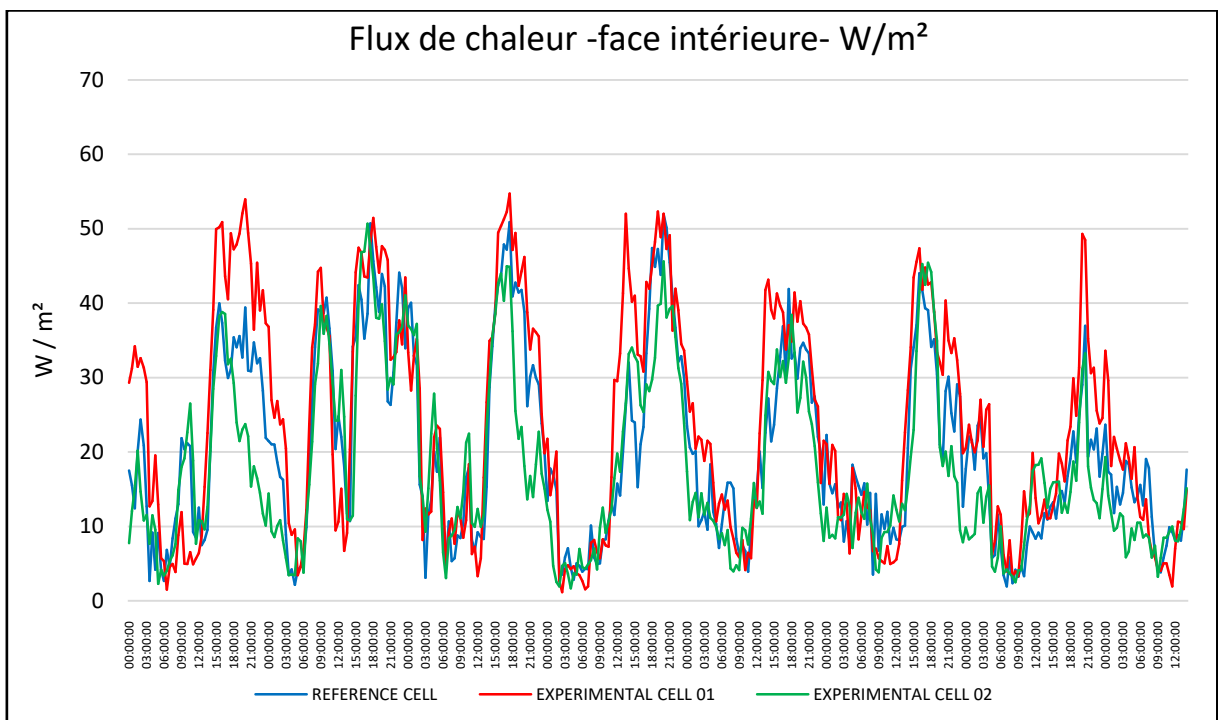


Figure 5. 26 : Flux de chaleur calculé à travers le mur intérieur entre le 23 et le 30 juin 2020 (source : Éditée par l'auteur, 2020).

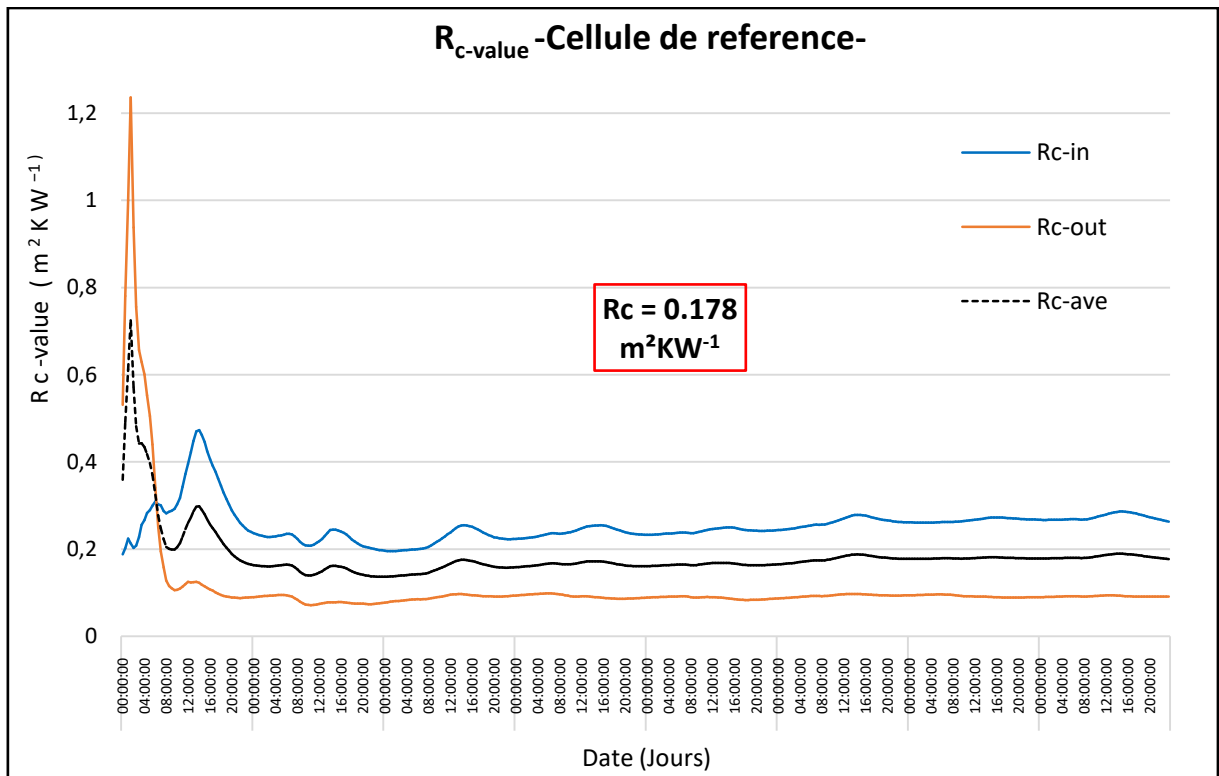


Figure 5.27 : Diagramme chronologique de la valeur R_{c-Average} de la cellule de référence pour la période de surveillance du 23 au 30 juin 2020 (source : Éditée par l’auteur, 2020).

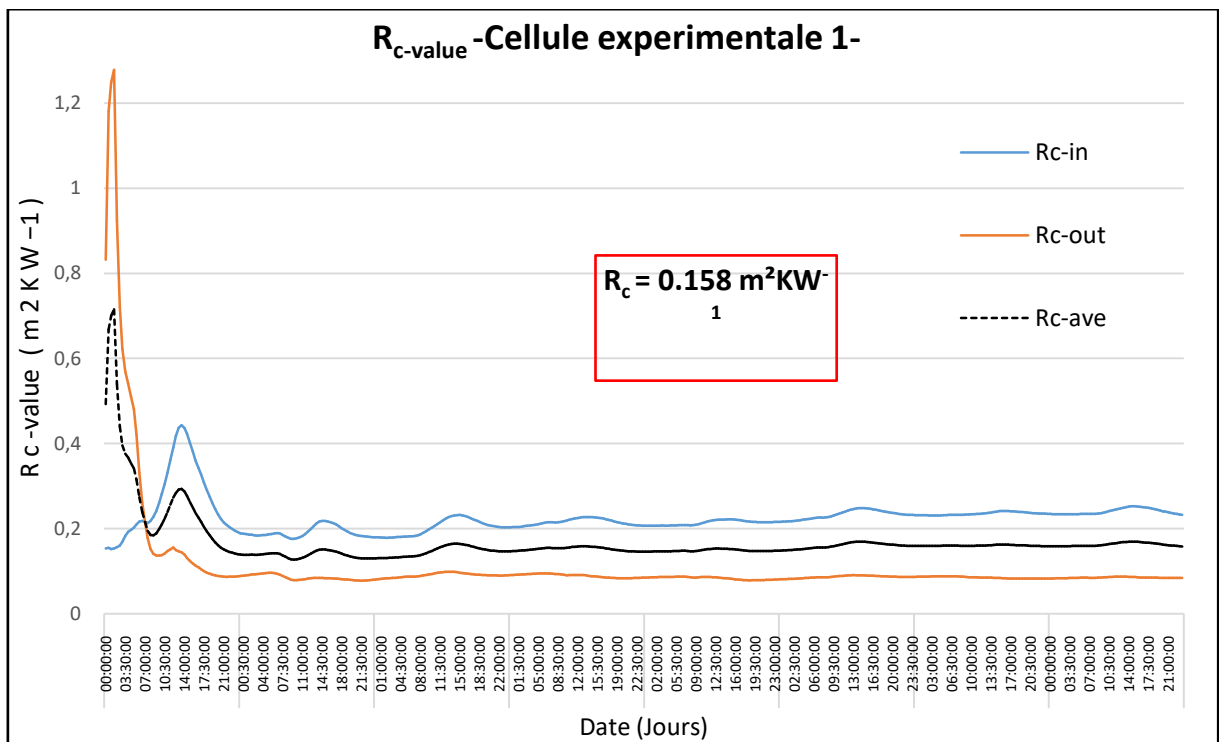


Figure 5.28 : Diagramme chronologique de la valeur R_{c-Average} de la cellule expérimentale 1 pour la période de surveillance du 23 au 30 juin 2020 (source : Éditée par l’auteur, 2020).

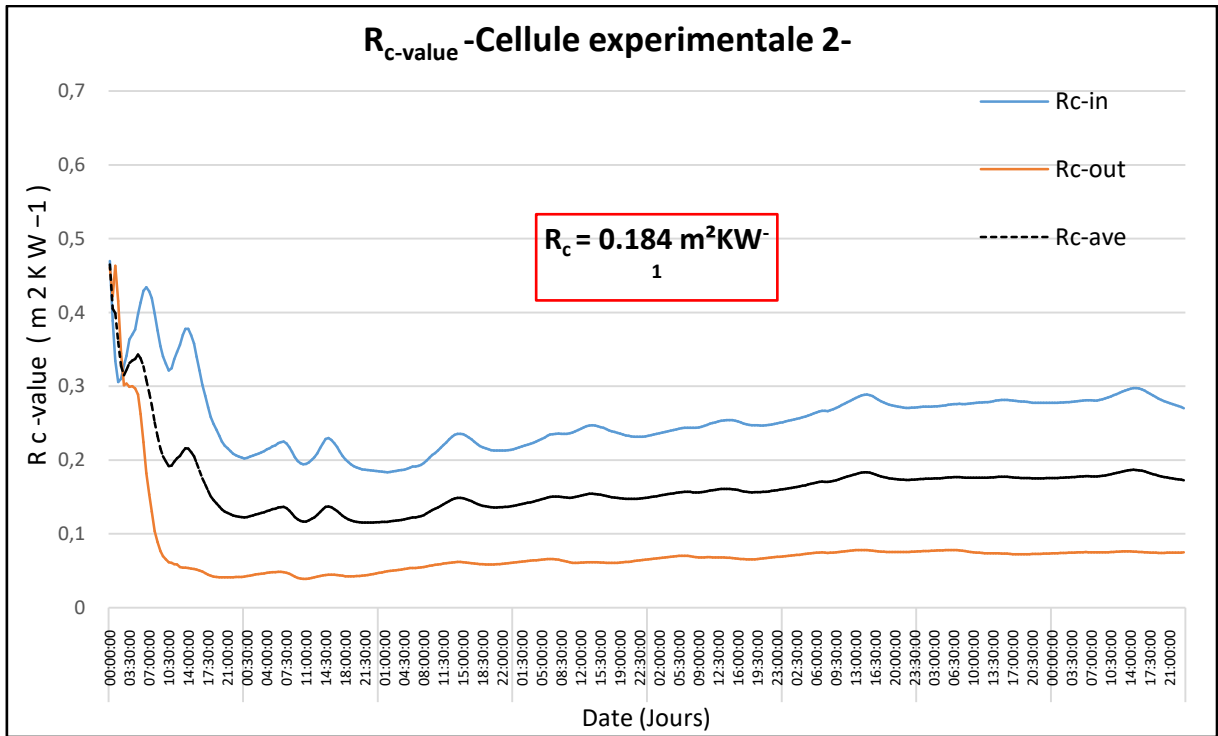


Figure 5. 29 : Diagramme chronologique de la valeur $R_{c\text{-Average}}$ de la cellule expérimentale 2 pour la période de surveillance du 23 au 30 juin 2020 (source : Éditée par l’auteur, 2020).

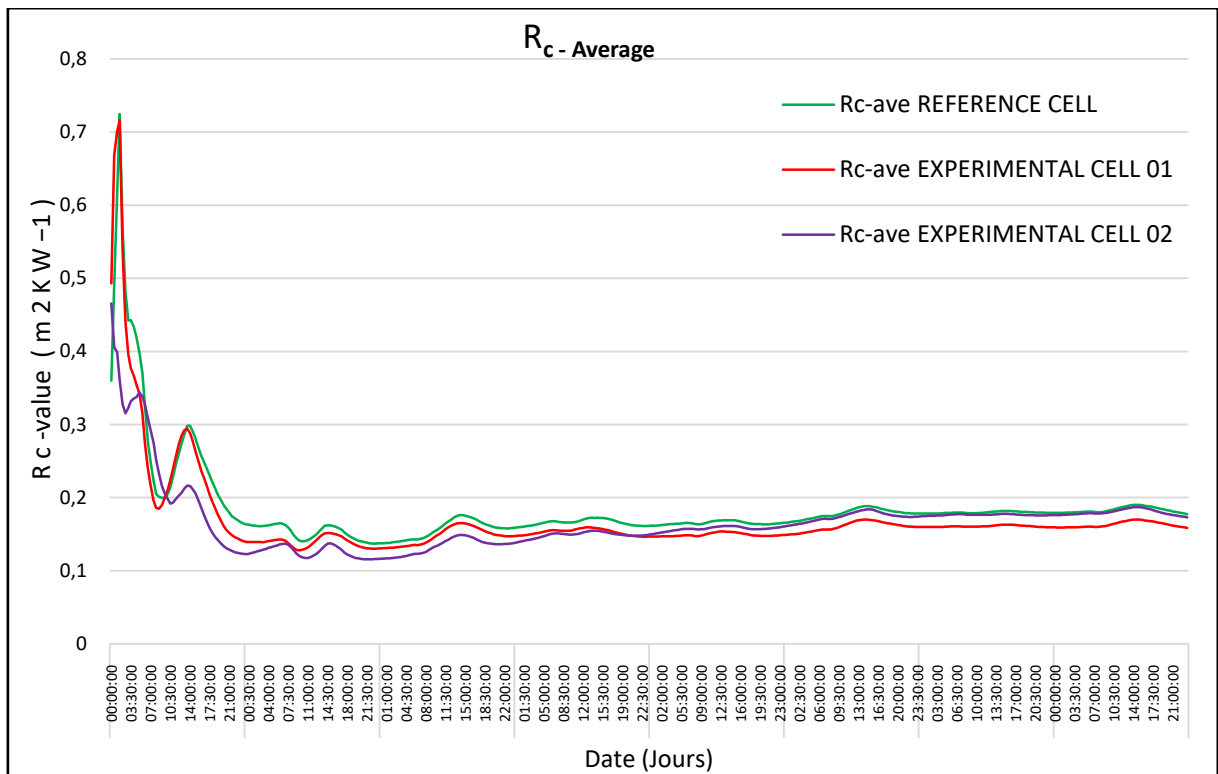


Figure 5. 30 : Comparaison de la valeur $R_{c\text{-Average}}$ des 03 cellules expérimentales pour la période de surveillance du 23 au 30 juin 2020 (source : Éditée par l’auteur, 2020).

Après comparaison des valeurs $R_{c-average}$ à la fin de la période de mesures, avec les valeurs $R_{c-average}$ obtenues à 6h, 12h et 24 h avant la fin des mesures, le constat montre que le facteur de convergence est inférieur aux critères spécifiés de 5%, ce qui répond aux recommandations citées dans les normes ISO 9869-Partie 1: 2014. Ainsi, les résultats indiquent clairement l'influence de la texture des revêtements extérieurs sur la valeur de $R_{c-average}$:

5.1. Texture lisse -Cellule de référence-

Les données de la cellule de référence sont présentées dans les figures précédentes, sachant que la période de mesures a duré 192 heures avec 0.5 heure d'intervalle d'enregistrement. De ce fait, les données montrent que la variation de température est de nature régulière. Nous constatons que les valeurs les plus critiques ont été enregistrées le 27 juin avec une valeur de température surfacique extérieure de 43,9 °c, et intérieure de l'ordre de 36,8 °c et une température de l'air de l'ordre de 34.2 °c. Ce constat est observé tout au long de la période de mesures.

Le débit du flux de chaleur interne calculé à travers le mur atteint 51.8 W/m². Ainsi, le graphique chronologique de $R_{c-average}$ de la (figure 5.27) montre que cette valeur converge vers une valeur constante égale à 0.178 m²KW⁻¹, avec une différence de moins de 5% répondant aux critères de la norme ISO 9869-Partie 1: 2014.

5.2. Texture rugueuse -Cellule Expérimentale 1

Les figures précédentes illustrent les différents résultats enregistrés de la cellule expérimentale N°1. Ces résultats montrent que la variation de température est de nature cyclique. Les valeurs les plus critiques sont enregistrées les 26 et 27 juin avec une valeur de la température surfacique extérieure de 46,3 °c et 46,5 °c respectivement, une température surfacique intérieure de l'ordre de 36,7 °c et 37,2 °c, et une température de l'air de l'ordre de 34,2 °c et 34,5 °c.

Le flux de chaleur interne calculé à travers le mur atteint 54.7 W/m². Le graphique chronologique de la (figure 5.28) montre que $R_{c-average}$ se dirige vers une valeur constante égale à 0.158 m²KW⁻¹, avec une différence de moins de 5% répondant aux critères de la norme ISO 9869-Partie 1: 2014.

5.3. Texture en cristal -Cellule Expérimentale 2

Les résultats de la cellule expérimentale N°2 sont illustrés dans les figures ci-dessus. La période de mesures a duré 192 heures avec 0.5 heure d'intervalle d'enregistrement. Les données montrent que la variation de température est de nature cyclique. Les valeurs les plus critiques sont enregistrées les 26 et 27 juin avec une température surfacique extérieure de 41,8 °c et 42,1 °c, une température surfacique intérieure de 34,3 °c et 35,6 °c, et une température de l'air de 32,1 °c et 33 °c respectivement. Cette observation a été constante tout au long de la période de mesures.

Le flux de chaleur interne calculé à travers le mur atteint 50,6 W/m². Le graphique chronologique de la valeur $R_{c-average}$ présentée dans la (figure 5.29), montre que cette valeur se converge vers une valeur constante égale à 0,184 m²KW⁻¹, avec une différence de moins de 5% répondant aux critères de la norme ISO 9869-Partie 1: 2014.

6. Synthèse et comparaison des résultats

Sur la base des résultats discutés, la cellule expérimentale N°2 (Texture en cristal) enregistre les valeurs les plus basses de la température surfacique, suivie par la cellule de référence (lisse). Les valeurs les plus critiques ont été enregistrées au niveau de la cellule expérimental N°1 (texture rugueuses). Cette observation est relevée tout au long de la période de mesures. Le nombre d'heures le plus critique est enregistré tout d'abord au niveau de la cellule expérimentale N°1 (texture rugueuses), suivie par la cellule de référence (texture lisse), ensuite la cellule expérimentale N°2 (texture en cristal).

L'analyse des données montre que la variation de température surfacique, à cause de la texture de revêtement extérieur, possède un impact sur les paramètres de performance thermique de la paroi tels que la résistance thermique et le débit de flux de chaleur.

La comparaison de la résistance thermique $R_{c-average}$ des trois cellules expérimentales est présentée dans la (figure 5.30). Ce graphique chronologique de $R_{c-average}$ montre que la valeur se dirige vers une valeur constante, de l'ordre de 0,178 m²KW⁻¹ pour la cellule de référence, 0,158 m²KW⁻¹ pour la cellule expérimentale N°1, et 0,184 m²KW⁻¹ pour la cellule expérimentale N°2. Ces valeurs enregistrées de $R_{c-average}$ montrent qu'elles sont plus élevées pour la cellule expérimentale N°2 (texture en cristal) par rapport aux deux autres.

Bien que ces valeurs présentent de faibles écarts et distinctions, la cellule expérimentale N°2 semble plus résistante que les deux autres cellules au passage du flux thermique dans la paroi. Ce qui explique qu'il existe une légère corrélation entre la texture de revêtement, la température surfacique et la résistance thermique de la paroi. A travers ces résultats, la conclusion produite montre que la variation de la valeur $R_{c-average}$ de chaque cellule expérimentale est causée par la nature de la texture des revêtements extérieurs.

La (figure 5.31) illustre les résultats enregistrés de la température opérative dans les trois cellules expérimentales. Elle indique la même logique que les résultats précédents, dans le sens que les valeurs des températures opératives les plus élevées sont enregistrées au niveau de la cellule expérimentale N°1, ensuite par la cellule de référence, et enfin, la cellule expérimentale N°2.

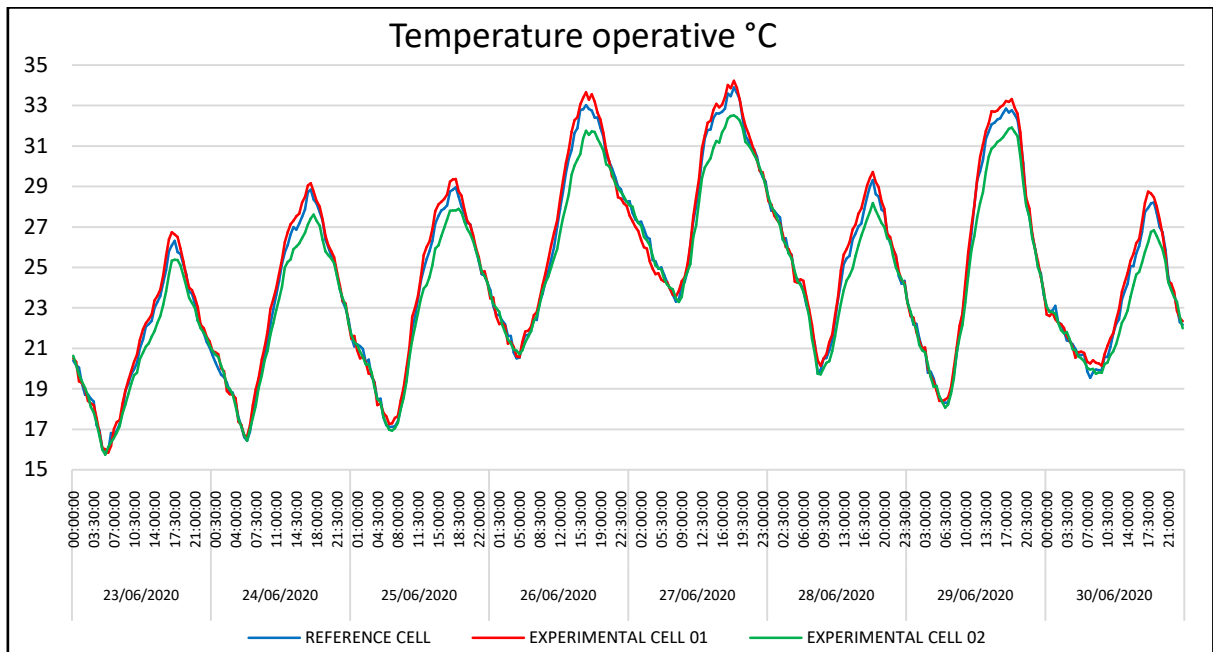


Figure 5. 31 : Température opérative entre le 23 et le 30 juin 2020

(source : Éditée par l'auteur, 2020).

Cependant, il est intéressant de noter que la texture des revêtements extérieurs a donné une légère différence des résultats sur les paramètres de la performance thermique de la paroi. Cette différence peut être expliquée par le fait que la cellule expérimentale N°1 (texture rugueuse) présente de petites surfaces d'ombres qui ne dépassent pas 1 cm² et avec des positions aléatoires, ce qui favorise les petites réflexions et absorptions de radiation solaire.

Contrairement à la cellule expérimentale N°2 (texture en cristal) dont la masse thermique plus élevée et les surfaces ombragées plus grandes et plus pures jouent le rôle d'auto-ombrage de la paroi, ce qui provoque une résistance thermique plus forte et plus résistante que celle de la cellule expérimentale N°1.

Conclusion

La surchauffe des bâtiments et leur besoin de refroidissement est un problème persistant dans l'aire du changement climatique. L'objectif de ce chapitre est d'examiner l'impact de la texture du revêtement extérieur sur le confort thermique, ainsi que la performance thermique et les capacités de perte de chaleur dans l'enveloppe extérieure du bâtiment. Cette recherche suit une approche méthodologique basée sur des normes et des standards internationaux afin d'évaluer le comportement thermique de la texture extérieure. Dans ce cas, la sélection des textures étudiées est basée sur les résultats obtenus dans le chapitre précédant. Tandis que le modèle expérimental développé dans ce chapitre est appliqué seulement au niveau du côté sud.

L'ensemble des résultats du présent chapitre montre des améliorations significatives de la performance thermique de l'enveloppe du bâtiment sous l'effet de la texture du revêtement extérieur. Ces résultats ont montré que la texture du revêtement extérieur, du fait de son épaisseur et de l'ombre qu'elles projette sur le bâtiment, est capable de limiter les surchauffes, de réduire les gains de chaleur et la température surfacique extérieure de bâtiments, et d'augmenter la résistance thermique de l'enveloppe extérieure en améliorant ainsi l'efficacité énergétique du bâtiment pendant l'été. En comparant les résultats de cette phase expérimentale à travers l'évaluation de la résistance thermique convergée et l'indice de la température opérative, on remarque qu'il existe une relation entre la texture, la température surfacique et la résistance thermique de la paroi. On peut dire donc qu'elle possède un impact sur les paramètres de performance thermique de l'enveloppe extérieur du bâtiment. Ces résultats indiquent toujours une même logique que les résultats précédents. Ce qui prouve et confirme l'évaluation proposée par la méthode moyenne de la norme ISO.

L'ensemble des résultats montrent des améliorations significatives de la performance thermique de l'enveloppe du bâtiment sous l'effet de la texture du revêtement extérieur. La texture du revêtement est donc capable de limiter les surchauffes, réduire les gains de

chaleur et la température surfacique extérieure. Ces résultats confirment encore une fois les conclusions de l'étude expérimentale initiale effectuée dans le chapitre précédant et le rôle de la texture du revêtement extérieur dans l'amélioration du confort thermique.

Par conséquent, la texture du revêtement extérieur s'avère l'une des solutions passives, surtout dans les régions Sud de l'Algérie caractérisées par un climat chaud et sec. Dans ces conditions, cette étude démontre l'exploitation potentielle de l'adaptation morphologique de l'enveloppe extérieure des bâtiments, qui pourrait contribuer à leur rafraîchissement et leur refroidissement passif et à réduire le besoin accru en systèmes mécaniques coûteux et énergivores. En outre, cette recherche suggère des domaines d'investigation plus approfondie et ouvre de nouvelles voies pour de nouvelles solutions thermiques.

CONCLUSION GENERALE

Depuis des années, suite aux changements climatiques et à leurs conséquences, la facture énergétique du bâtiment ne cesse d'augmenter de jour en jour. Aussi le recours au conditionnement de l'air devient une réalité inévitable. Étant donné que la hausse des températures dans le bâtiment peut provoquer de sérieuses conséquences sur le bien-être et le sentiment d'inconfort thermique, avec des impacts importants sur les plans économiques, écologiques et sanitaires des citoyens.

Depuis longtemps, l'enveloppe extérieure du bâtiment fait fonction de couverture qui protège les espaces intérieurs et assure le confort thermique. Cette partie du bâtiment qui garantit souvent le lien entre l'intérieur et l'extérieur peut être distinguée selon plusieurs aspects. En effet, le refroidissement naturel à travers l'enveloppe extérieure peut être obtenu en utilisant de multiples stratégies. En été par exemple, l'ombrage est considéré comme la méthode la plus efficace pour refroidir un bâtiment et réduire la charge de refroidissement artificiel.

Dans cet esprit, l'objectif principal de cette thèse est de contribuer à l'optimisation de l'enveloppe extérieure du bâtiment afin de minimiser les besoins énergétiques et augmenter le confort thermique dans le bâtiment. Cette optimisation est assurée à travers l'étude et l'évaluation d'un paramètre important qui constitue la texture du revêtement extérieur et son effet sur la performance énergétique et le confort thermique dans le bâtiment. Elle porte aussi sur l'anticipation et la prévision du comportement thermique et énergétique de la texture du revêtement sous les conditions climatiques de Constantine dans le nord-est de l'Algérie.

Afin d'aboutir à ces objectifs et répondre aux hypothèses posées au préalable, ce travail de recherche est composé de deux approches principales. En premier lieu, une approche théorique approfondie partagée en trois parties ; et en deuxième lieu, une approche pratique composée de deux volets expérimentaux.

Tout d'abord, et suite à une analyse documentaire approfondie, ce travail entreprend la présentation de quelques concepts liés au revêtement, en compagnie des types et fonctions des revêtements extérieurs, en mettant l'accent sur les principales stratégies utilisées dans des revêtements traditionnels dans les milieux sahariens au climat chaud et sec.

En second lieu, la partie état de l'art sur l'effet de la texture du revêtement extérieur sur le transfert thermique dans le bâtiment, aborde tout d'abord l'impact de l'enveloppe

extérieure du bâtiment et son effet sur l'ambiance thermique intérieure, d'une manière générale ; ensuite sur l'effet du revêtement extérieur et son effet sur le confort thermique ainsi que l'efficacité énergétique du bâtiment. Cette partie du travail recense les différentes méthodes, les méthodologies, ainsi que les outils utilisés dans la littérature, en commençant par une revue de la littérature sur des travaux liés aux revêtements extérieurs du bâtiment, sachant que les études portant particulièrement sur cet élément sont très rares. Par la suite, l'effet de l'auto-ombrage est considéré comme une stratégie fondamentale au niveau de l'enveloppe extérieure. Enfin, le travail s'achève par une synthèse bibliographique sur l'effet de la couleur et de l'albédo du revêtement extérieur, puis l'effet de l'enveloppe intelligente à l'égard des particules des matériaux écologiques sur le confort thermique et les besoins énergétiques du bâtiment. Pour cette raison, les études portant sur l'effet de la rugosité et la densité du couvert extérieur ont également été abordées afin d'identifier les stratégies pouvant être utilisées au niveau des revêtements extérieurs. En dernier lieu, une revue de la littérature est approchée sur les différentes méthodes et normes internationales des mesures in-situ sur le transfert de chaleur au niveau de l'enveloppe extérieure. Cette partie de la littérature permet de comprendre en détail les études conduites sur le transfert de chaleur, basées sur des standards internationaux afin de les exploiter dans le volet pratique de ce travail.

Pour cette finalité, l'état de l'art a permis d'avoir un aperçu global sur les différentes solutions qui sont en relation directe avec le revêtement extérieur. La plupart des études passées en revue sont basées sur des expérimentations sur terrain et partent d'un même besoin. Il est constaté que les résultats sont diversifiés mais généralement complémentaires. L'état de l'art a permis également de prendre conscience du manque incontestable de travaux sur la texture du revêtement extérieur, particulièrement sous les climats chauds et secs. En outre, cela permet d'identifier les paramètres de la texture du revêtement extérieur qui peuvent avoir un impact sur le confort thermique et la performance énergétique.

En deuxième lieu, sur la base de l'examen de l'approche théorique de cette étude, ce travail a été poursuivi par un volet expérimental afin d'évaluer le comportement thermique de l'enveloppe extérieure avec différentes textures de revêtements. Ces textures sont inspirées des méthodes de constructions traditionnelles qui utilisaient des murs auto-ombrageants comme stratégie de refroidissement. Afin d'atteindre cet objectif, la modélisation des

textures étudiées est basée sur certaines variables morphologiques de la texture des revêtements, inspirées de l'architecture saharienne en Algérie.

En utilisant l'imagerie thermique, des mesures in-situ en compagnie d'une étude de la température de surface sur terrain ont été effectuées pendant l'été sur quatre échantillons (box de mesures) en tenant différentes textures telles que la texture rugueuse, la texture en lame, et la texture en cristal, avec une texture lisse comme référence.

Dans l'ensemble, les résultats de cette phase indiquent une crédibilité et une relation significative entre la géométrie de la texture extérieure, le pourcentage d'ombre projetée et la température de surface extérieure. Les résultats indiquent que les panneaux de façade texturés peuvent améliorer le refroidissement, au moyen de la profondeur, la rugosité, l'assemblage et l'épaisseur des dispositifs géométriques de la texture, car il existe une forte corrélation entre la morphologie créée de la texture, le rapport (SF) et la température de surface.

Cette phase est suivie par une approche similaire, en explorant l'effet de trois types de particules ayant le même aspect mais avec des caractéristiques thermiques différentes. Enfin, cette approche met en valeur les agrégats végétaux naturels tels que les particules de palmier, qui possèdent de meilleures performances, qui contribuent à une réduction significative de la température de surface extérieure, ce qui peut entraîner une diminution de la consommation énergétique dans le bâtiment. Par conséquent, l'intégration des particules de palmier dans les façades texturées, peut contribuer à la diminution de la température surfacique extérieure.

Sur la base de ces résultats expérimentaux, ce travail de thèse se poursuit pour explorer l'effet des textures étudiées sur le confort thermique intérieur et le transfert de chaleur sur des chambres expérimentales. Cette deuxième phase de l'étude expérimentale vise à étudier l'effet des textures déjà testées dans la première phase expérimentale, sur le transfert de chaleur et le confort thermique intérieur du bâtiment, à travers un ensemble de recherches et d'exams basés sur des variables liées à la morphologie de la texture, telles que l'épaisseur, l'assemblage, la profondeur. De ce fait, cette phase expérimentale est basée sur le calcul du transfert de chaleur à travers les textures étudiées précédemment, au moyen des normes internationales comme la norme ISO 9869 et l'indice de la température opérative.

L'ensemble des résultats montrent des améliorations significatives de la performance thermique de l'enveloppe du bâtiment sous l'effet de la texture du revêtement extérieur. La texture du revêtement à travers ses variables est capable de limiter les surchauffes, réduire les gains de chaleur et la température surfacique extérieure, en améliorant ainsi la résistance thermique et l'efficacité énergétique du bâtiment pendant l'été. Ces résultats confirment ceux de la première phase expérimentale.

Cette étude démontre que l'exploitation de la texture des façades peut être utilisée pour faciliter la perte de chaleur, peut contribuer à leur refroidissement passif et réduire le besoin en systèmes mécaniques coûteux et énergivores. Ce qui confirme les trois hypothèses posées et répond aux objectifs visés dans le cadre de cette recherche.

En résumé, la texture du revêtement extérieur s'avère l'une des solutions les plus utiles pour réduire les besoins énergétiques pour le refroidissement des bâtiments en été. Elle constitue aussi une alternative au refroidissement passif surtout dans les régions Sud de l'Algérie caractérisées par un climat chaud et sec.

Recommandations

Les résultats de cette étude ont clarifié certaines idées et confusions sur le comportement thermique des revêtements texturés. Afin de synthétiser les résultats obtenus, les points suivants doivent être pris en charge avec un intérêt particulier :

- Le choix de la texture du revêtement extérieur est une stratégie efficace pour réduire la consommation énergétique des bâtiments et augmenter le confort thermique intérieur. Par conséquent, l'étude recommande de prendre en considération ce paramètre lors de la conception architecturale du bâtiment.
- Le choix de la texture du revêtement doit être basé sur des variables paramétriques qui caractérisent la texture telles que ; la profondeur, la rugosité, l'épaisseur, l'assemblage.
- Opter pour des textures offrant un maximum de profondeur avec un assemblage aligné et authentique simultanément. Ce couplage offre une meilleure protection d'auto-ombrage et augmente la performance thermique de la texture choisie.
- Le choix des composantes de la texture est une solution très efficace. Pour cela, il est recommandé de choisir des particules à base naturelle telles que les particules de palmier, qui offrent de meilleurs résultats que les autres types de particules.

- Le couplage entre les deux recommandations précédentes offre une optimisation thermique maximale et très performante dans le bâtiment.
- Parmi les textures étudiées, il est recommandé de choisir celle en lame et celle en cristal, à cause de leurs caractéristiques d'auto-ombrage, d'assemblage et de profondeur.
- En comparant la texture en lame et celle en cristal, cette dernière offre plus de surfaces ombragées, plus de rugosité et un assemblage plus authentique, donc elle est recommandée.
- Avant toute sélection de la texture des revêtements lors de la conception architecturale, le concepteur doit prendre en considération les conditions climatiques du lieu, afin de maximiser la performance thermique de la texture choisie et d'assurer un confort intérieur dans le bâtiment.

Limites et Perspectives

Pour en finir, certaines perspectives sont à noter et méritent d'être prises en considération pour un travail futur. Car cette recherche s'est appliquée et focalisée uniquement sur des conditions bien définies, elle vise à donner une vision globale sur le thème étudié et à élargir le champ vers de nouvelles voies de réflexion dans d'autres études futures liées à la thermorégulation :

- Le développement de cette recherche sera d'établir d'autres travaux qui pourraient inclure des simulations numériques pour évaluer l'effet de la texture du revêtement extérieur sur la performance thermique des murs.
- Elaborer un modèle numérique des textures étudiées et l'intégrer sur la base de données des logiciels de simulation numérique.
- Elargir le champ pour d'autres thèmes de recherches afin d'évaluer la texture de l'enveloppe extérieure dans différentes zones climatiques de l'Algérie et d'autres pays ayant notamment un climat humide et un climat aride. Cela pourrait aider à lutter contre la surchauffe des bâtiments, grâce à des solutions simples et adaptables sous différents climats.
- Tester une plus grande variété de textures et étaler la partie expérimentale sur une longue durée, plus particulièrement sur la saison hivernale, afin d'évaluer l'effet de la texture sur les besoins de chauffage.
- Étudier l'effet de la texture de l'enveloppe extérieure sur le confort acoustique.

- Etudier l'effet de la texture sur différentes parties du bâtiment telle que la toiture par exemple, qui est considérée comme la partie la plus exposée aux rayonnements solaires.
- Explorer différents matériaux avec différentes textures, car les propriétés morphologique de la texture varient suivant la composition du matériau, son mode d'agencement et de traitement. Ce qui peut affecter le refroidissement à travers les matériaux choisis.

Cette perspective aidera mieux à connaître le comportement thermique réel de n'importe quel type de texture. Son but est d'ouvrir des brèches à de futures recherches et de développer un cadre pour les concepteurs afin d'apporter des solutions architecturales thermiques, passives, applicables pour les bâtiments existants et nouveaux, et ouvrir de nouvelles opportunités pour résoudre les problèmes de surchauffe par des stratégies de refroidissement passif.

Le présent travail peut aussi s'inscrire dans le cadre de la préservation et de la valorisation du patrimoine bâti du Sud algérien afin de contribuer au développement durable de ces régions caractérisées par un climat chaud et aride.

BIBLIOGRAPHIE

- Abduljawad, A. T. (1991). *Building shadows courtyards and daylight in hot-arid regions with special reference to Iraq*. Thèse de doctorat, Université de Pennsylvania,
- Adamowski, J., Hoła, J., & Matkowski, Z., (2007). *Drying and renovation of flooded buildings*. 2, 5–43.
- Ahmad, A., Maslehuddin, M., & Al-Hadhrami, L. M., (2014). *In situ measurement of thermal transmittance and thermal resistance of hollow reinforced precast concrete walls*. *Energy and Buildings*, 84, 132–141.
- Ahvenainen, S., Kokko E., Aittomäki A. (1980). *Thermal conductances of wall structures, LVI-tekniikan laboratorio*, report 54, Espoo (Finland).
- Alhuwayil, W.K.; Mujeebu, M.A.; Algarny, A.M.M. (2019). *Impact of external shading strategy on energy performance of multi-story hotel building in hot-humid climate*. *Energy*, 169, 1166–1174.
- AL-Mumin, A. A. (1995). *Thermal performance prediction of shaded sunken courtyard buildings in a hot arid climate*. Thèse de doctorat, Office of graduation studies of Texas A&M University,
- Anderson, B.R. (1985). *The measurement of U-values on site, ASHRAE-DOE-BTECC Conference on Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings*, Clearwater Beach, Florida, December 2 to 5,
- Ascione, F.; Bianco, N.; De Masi, R.F.; Mauro, G.M.; Vanoli, G.P. (2015). *Design of the Building Envelope: A Novel Multi-Objective Approach for the Optimization of Energy Performance and Thermal Comfort*. *Sustainability*, 7, 809.
- ASTM, C 1046 *Standard Practice for In-Situ Measurement of Heat Flux and Temperature on Building Envelope Components*
- ASTM, C 1155-95. (2001b). 1155-95 (Reapproved 2001): *Standard practice for determining thermal resistance of building envelope components from the in-situ data*. Annual Book of ASTM Standards, 4.
- ASTM, C. (2001a). 1046-95 (Reapproved 2001): *Standard practice for in-situ measurement of heat flux and temperature on building envelope components*. Annual Book of ASTM Standards, 4.
- Atsonios, I. A., Mandilaras, I. D., Kontogeorgos, D. A., & Founti, M. A., (2017). *A comparative assessment of the standardized methods for the in-situ measurement of the thermal resistance of building walls*. *Energy and Buildings*, 154, 198–206.
- Ayoob, N. A. (1990). *Analyse théorique et expérimentale du comportement de systèmes de refroidissement évaporatif couplés à des enveloppes de bâtiments*. Thèse de Doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis,
- Baba, T., Ono A., Hat-Tori S. (1985). *Analysis of operational errors of heat flux transducers placed on wall surfaces*. *Rev. Sci. Instrum.* 56 pp. 1399–1401.
- Bacha, C.B.; Bourbia, F. (2016). *Effect of kinetic façades on energy efficiency in office buildings Hot dry climates*. In *Proceedings of the 11th Conference on Advanced Building Skins*, Bern, Switzerland; pp. 458–468.

- Baker, P., (2008). *In situ U-value measurements in traditional buildings: Preliminary results*. Edinburgh, 2008: Historic Scotland.
- Baker, P., (2011). *U-values and traditional buildings: In situ measurements and their comparisons to calculated values*. Historic Scotland Technical Paper, 10, 70.
- Bales, E., Bomberg M., (1985). *Courville G. Building Applications of Heat Flow Transducers*, ASTM STP 885, Philadelphia,
- Bansal, N.K.; Gargand, S.N.; Kothari, S. *Effect of exterior surface colour on the thermal performance of buildings*. Build. Environ. 1992, 27(1), 31–37.
- Belakehal, A. (1995). *La façade entre l'esthétique et le contrôle du rayonnement solaire*, mémoire de magistère, Université de Biskra,
- Bencherif, M. (1996). *La ville saharienne, de la tradition à l'innovation*, mémoire de Magister, Constantine,
- Benhalilou, K. (2012). *L'enveloppe végétale : une alternative au rafraîchissement passif cas de la façade végétale*, thèse de doctorat en science, université Constantine 3.
- Benmansour, N.; Agoudjil, B.; Gherabli, A.; Kareche, A.; Boudenne, A. (2014). *Thermal and Mechanical Performance of Natural Mortar Reinforced with Date Palm Fibers for Use as Insulating Materials in Building*. Energy Build, 81, 98–104.
- Blanco, I.; Schettini E. ; and Vox G. ; (2019). *Predictive Model of Surface Temperature Difference between Green Façades and Uncovered Wall in Mediterranean Climatic Area*. Applied Thermal Engineering 163 114406.
- Bomberg, M., & Solvason K.-R. (1985). *Discussion of heat flow meter apparatus and transfer standards used for error analysis. Guarded hot plate and flow meter technology*, ASTM STP 879, Philadelphia.
- Boukhelkhal, I. (2014). *Impact de la morphologie urbaine sur le confort thermique extérieur dans les climats chauds et arides- Cas de la nouvelle ville de Tafilelt à Ghardaïa*, mémoire de magister, université Constantine 3.
- Boukhelkhal, I.; Bourbia, F. (2021). *Experimental Study on the Thermal Behavior of Exterior Coating Textures of Building in Hot and Arid Climates*. Sustainability, 13, 4175. <https://doi.org/10.3390/su13084175>.
- CANTIN, R. Moujalled, B. Guarracino, G. (2005). *Complexité du confort thermique dans les bâtiments*. 6ème congrès Européen de Science des Systèmes Paris 19-22, p2. Laboratoire des Sciences de l'Habitat, CNRS.
- Capeluto, I.G. (2003). *Energy performance of the self-shading building envelope*. Energy and Build. 35, 327–336.
- Chelghoum, Z. Belhamri, A. (2011). *Analyse des propriétés thermiques des matériaux de constructions utilisés dans la ville de Tamanrasset*. Sciences & technologie d – n°33, pp. 47-56.

- Cheng, V., Ng, E. & Givoni, B., (2005). *Effect of envelope colour and thermal mass on indoor temperatures in hot humid climate*. Solar Energy, 78(4 SPEC. ISS.), pp.528–534. doi:10.1016/j.solener.2004.05.005.
- Chikhi, M. Agoudjil, B. Haddadi, M. Boudenne, A. (2011). *Numerical modelling of the effective thermal conductivity of heterogeneous materials*, Journal of Thermo-plastic Composite Materials 26. 336–345.
- Deconinck, A.-H., & Roels, S., (2016). *Comparison of characterisation methods determining the thermal resistance of building components from onsite measurements*. Energy and Buildings, 130, 309–320.
- Desogus, G., Mura, S., & Ricciu, R., (2011). *Comparing different approaches to in situ measurement of building components thermal resistance*. Energy and Buildings, 43(10), 2613–2620.
- Donnadieu, C. Et P. H. ET J. M. (1977). *Habiter le désert, les maisons mozabites*. Pierre Madagra Bruxelles.
- Ercan, B.; Tahira, S.; Ozkan, E. (2015). *Performance-based parametric design explorations: A method for generating appropriate building components*. Design Stud. 38, 33–53.
- Fezzoui, N. (2004). *Analyse et caractérisation du bilan d'énergie d'un habitat traditionnel (régions sud-ouest)*, thèse de doctorat, université de bechar.
- Flanders, S., Desjarlais, A., & Kunz, T., (1995). *A comparison of two techniques for R-value calculation, using winter in-situ data*. Thermal Envelopes VI/Heat Transfer in Walls I-Principles, 151–161.
- Ganji, H., Mohammad Kari, B. & Norouzian Pour, H., (2013). *Thermal performance of vegetation integrated with the building façade*. Pinkafeld, Austria, Forschungs- und Studienzentrums Pinkafeld.
- Gaspar, K., Casals, M., & Gangoells, M., (2016). *A comparison of standardized calculation methods for in situ measurements of façades U-value*. Energy and Buildings, 130, 592–599.
- Gaspar, K., Casals, M., & Gangoells, M., (2018). *In situ measurement of façades with a low U-value: Avoiding deviations*. Energy and Buildings, 170, 61–73.
- Givoni, B. (1978). *L'homme, l'architecture et le climat*. Paris. Edition du Moniteur.
- Givoni, B. (1998). *Climate Considerations in building and urban design*. USA. John Wiley & Sons, inc.
- Grobman, Y.J.; Elimelech, Y. (2005). *Microclimate on building envelopes: testing geometry manipulations as an approach for increasing building envelopes' thermal performance*. Archit. Sci. Rev. 59, 269-278.
- Hansen, M. H., (2005). *Measurement of moisture content in basement brick walls-a comparison of different methods*. 7th Nordic Building Physics Symposium, 86–93.

- Healy, W. M., Luo, S., Evans, M., Sucheta, A., & Liu, Y., (2003). *Development of an optical fiber-based moisture sensor for building envelopes. Proceedings 24th AIVC Conference and BETEC Conference on Ventilation, Humidity Control and Energy*, 277–282.
- Hoła, A., (2017). *Measuring of the moisture content in brick walls of historical buildings—the overview of methods*. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng, 251, 012067.
- Ibrahim, M.; Biwole, P.H.;Wurtz, E.; Achard, P.A. (2014). *Study on the thermal performance of exterior walls covered with a recently patented silica-aerogel-based insulating coating*. Build. Environ. 81, 112–122.
- Imeko,(1986). *Workshop proceedings on Heat Flux Measurements*, Budapest, April 23-25, OMIKK Technoinform. Available at the IMEKO Secretariat, POB 457, H-1371 Budapest.
- ISO 9869. (1994). *Thermal insulation—building elements—in-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance*.
- ISO 9869-1. (2014). 9869-1: 2014 *Thermal insulation, Building elements, In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance-Part 1: Heat flow meter method*. London: BSI.
- Izard, .J. L. (1993). *Architecture d'été .Construire pour le confort d'été*. Edisud. Aix-en-provence.
- Johanesson; G. (1979). *Heat flow measurements, thermo-electrical meters, function principles and sources of error, Report TVBH 3003*, Division of building technology. Lund Institute of Technology.
- Joudi, A.; Svedung, H.; Cehlin, M.; Rönnelid, M. (2013). *Reflective coatings for interior and exterior of buildings and improving thermal performance*. Appl. Energy, 103, 562–570.
- Kandar, M.Z.; Nimlyat, P.S.; Abdullahi, M.G.; Dodo, Y.A. (2019). *Influence of inclined wall self-shading strategy on office building heat gain and energy performance in hot humid climate of Malaysia*. 5, e02077.
- Kazemi, M., Boukhelkhal, I., Kosinski, P., Attia, S. (2020) *Heat and moisture transfer measurement protocols for building envelope*, Technical Report, Sustainable Building Design Lab, ISBN: 978-2-930909-22-6, Liege, Belgium. DOI: 10.13140/RG.2.2.30642.53445.
- Khadraoui, M.; Sriti, L.; Merad, Y. (2016).*Impact de la façade ventilée sur le confort thermique et l'esthétique de l'enveloppe architecturale*. In Proceedings of the Xth International Congress on Renewable Energy and the Environment, Tunis, Tunisia, 23–25.
- Kotzenn, B. (2003). *Investigation of Shade Under Six Different Tree Species of the Niger*, Journal of Arid Environment.
- KUPKE, Chr. (1976). *Untersuchungen über ein Wärmedämm - Schnellmeßverfahren*, Institut für Bauphysik, Stuttgart, BW 148/76.

- Laetitia, A. (1998). *Caractérisation de bases de données climatique. Proposition d'un générateur de climat. Application en thermique de l'habitat*. Thèse de doctorat. Université de La Réunion, Sainte-Clotilde.
- Lavigne, P., Brejon, P et Fernandez, P. (1994). *Architecture climatique. Une contribution au développement durable*. Tome 1: Base physiques. France. EDISUD.
- Liebard, A. De herde, A.(2005). *Traité de l'architecture et l'urbanisme bioclimatique*, édition Observer, Paris, P 03.
- Liu, S.; Kwok, Y.T.; Lau, K.K.; Chan, P.W.; Ng, E. (2019). *Investigating the energy saving potential of applying shading panels on opaque façades: A case study for residential buildings in Hong*. Energy Build.193, 78–91.
- Mansouri, O. ; Bourbia, F. ; Belarbi, R. (2018). *Influence de la réflectivité de l'enveloppe sur la demande énergétique des bâtiments et sur le confort thermique*. Nat. Technol. J. Vol A, 33–42.
- Matallah, M.E.; Alkama, D.; Ahriz, A.; Attia, S. (2020). *Assessment of the Outdoor Thermal Comfort in Oases Settlements*. Atmosphere, 11, 185.
- Matallah, M.E.; Alkama, D.; Teller, J.; Ahriz, A.; Attia, S. (2021). *Quantification of the Outdoor Thermal Comfort within Different Oases Urban Fabrics*. Sustainability, 13, 3051. <https://doi.org/10.3390/su13063051>.
- Mazria, E., (1980). *Le guide de l'énergie solaire passive*. s.l.:Editions Parenthèses.
- Meir, I. A., Pearlmutter D., Etzion Y. (1995). *On the Microclimatic Behavior of Two Semi, Enclosed Attached Courtyards in a Hot Dry Region*, Building and Environment, Vol. 30. No. 4, pp. 563-572.
- Merhan, S. (2020). *Self-Shading Walls to Improve Environmental Performance in Desert Buildings*. Available online: <https://www.researchgate.net/publication/338655646>.
- Nocera, F.; Lo Faro, A.; Costanzo, V.; Raciti, C. (2018). *Daylight Performance of Classrooms in a Mediterranean School Heritage Building*. Sustainability, 10, 3705.
- Ould Henia, (2003). *Choix climatiques et construction Zones arides et semi arides : La maison a cour de bou saada*.EPFL.Suisse.
- Oushabi, A.; Sair, S.; Abboud, Y.; Tanane, O.; El Bouari, A. (2017). *An Experimental Investigation on Morphological, Mechanical and Thermal Properties of Date Palm Particles Reinforced Polyurethane Composites as New Ecological Insulating Materials in Building*. Case Stud. Constr. Mater. 7, 128–137.
- Pacheco-Torgal, F.; Jonkers, H.M.; Karak, N.; (2016). Ivanov, V. *Introduction to biopolymers and biotech admixtures for eco-efficient construction materials*. In *Biopolymers and Biotech Admixtures for Eco-Efficient Construction Materials*; Woodhead Publishing Edition: Cambridge, UK.
- Peck, S. W., Callaghan, C., Bass, B. & Kuhn, M. E., (1999). *Research report: greenbacks from green roofs, forging a new industry in Canada*, Ottawa, Canada: s.n.

- Peeks, M.; Badarnah, L. *Textured Building Façades*. (2021). *Utilizing Morphological Adaptations Found in Nature for Evaporative Cooling*. *Biomimetics*. 6, 24. <https://doi.org/10.3390/biomimetics6020024>.
- Pel, L., Huinink, H., & Kopinga, K., (2002). *Ion transport and crystallization in inorganic building materials as studied by nuclear magnetic resonance*. *Applied Physics Letters*, 81(15), 2893–2895.
- Radhi, H.; Assem, E.; Sharples, S. (2014). *On the colours and properties of building surface materials to mitigate urban heat islands in highly productive solar regions*. *Build. Environ*, 72, 162–172.
- Rasooli, A., & Itard, L. (2018). *In-situ characterization of walls' thermal resistance: An extension to the ISO 9869 standard method*. *Energy and Buildings*, 179, 374–383.
- Rasooli, A., Itard, L., & Ferreira, C. I. (2016). *A response factor-based method for the rapid in-situ determination of wall's thermal resistance in existing buildings*. *Energy and Buildings*, 119, 51–61.
- Ravereau, A. (1981). *Les Mzab une Leçon D'architecture* ; Sindbad: Paris, France.
- Rodonò, G.; Sapienza, V.; Recca, G.; Carbone, D.C. (2019). *A Novel Composite Material for Foldable Building Envelopes*. *Sustainability*. 11, 4684.
- Roulet, C, Gass J. (1987). *Marcus I In situ U-value measurement: reliable results in shorter time by dynamic interpretation of the measured data*. *ASHRA E Transactions*, 93, pp. 1371-1379.
- Roulet, C. (2012). *Eco-confort - Pour une maison saine et à basse consommation d'énergie*. Lausanne, PPUR.
- Roulet, C. (2010). *Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne.
- Roulet, C., Gass, J., & Marcus, I. (1987). *In situ U-value measurement: Reliable results in shorter time by dynamic interpretation of the measured data*. *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings III*; ASHRAE Transactions: Atlanta, GA, USA, 777–784.
- Said, M. N. A. (2004). *Moisture measurement guide for building envelope applications*. Institute for Research in Construction, National Research Council Canada.
- Sass, O., & Viles, H. A. (2006). *How wet are these walls? Testing a novel technique for measuring moisture in ruined walls*. *Journal of Cultural Heritage*, 7(4), 257–263.
- Shen, H., Tan, H. & Tzempelikos, A. (2011). *The effect of reflective coatings on building surface temperatures, indoor environment and energy consumption — An experimental study*. , 43, pp.573–580.
- Standaert, P. (1987). *Numerical Analysis Operating Errors with Surface Mounted Heat Flux Sensors*, Report available at the Belgian Prime Minister Services, Policy of Science, Brussels.
- Standaert, P. (1984). *Twee-en driedimensionale warmteoverdracht: numerieke methode, experimentele studie enbouwfysische toepassingen, Two-andthree-dimensional thermal*

bridges, experimental study and building physics applications, Thesis, Katholieke Universiteit Leuven.

Synnefa, A., Santamouris, M. & Livada, I., (2006). *A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment*. *Solar Energy*, 80(8), pp.968–981.

Taha, H.; Sailor, D.; Akbari, H. (1992). *High Albedo Materials for Reducing Cooling Energy Use*; Lawrence Berkeley Lab: Berkeley, CA, USA; Volume UC-530

Tarabieh, K.; Abdelmohsen, S.; Elghazi, Y.; El-Dabaa, R.; Hassan, A.; Amer, M. (2017). *Parametric Investigation of Three Types of Brick Bonds for Thermal Performance in a Hot Arid Climate Zone*. In *DESIGN TO THRIVE, PLEA 2017 PROCEEDINGS*; Engine Shed Tours: Bristol, UK, Volume III, pp. 3699–3706.

Trethoven, H. (1986). *Measurement errors with surface mounted heat flux sensors*. *Build. Environ.* 21 pp. 41–56.

Tsoumarakis, C., (2008). *Thermal performance of a vegetated wall during hot and cold weather conditions*. Dublin, s.n., p. 22nd to 24th.

Walker, R., Pavía, S., & Dalton, M. (2016). *Measurement of moisture content in solid brick walls using timber dowel*. *Materials and Structures*, 49(7), 2549–2561. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0667-6>.

Watt, C.; Mitchell, S.; Salewski, V. (2010). *Bergmann's rule a concept cluster*. *Oikos*, 119, 89–100.

Wong, N. et al., (2010). *Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls*. *Building and Environment*, Volume 45, p. 663–672.

Yuxuan, Z.; Yunyun, Z.; Jianrong, Y.; Xiaoqiang, Z. (2020). *Energy saving performance of thermochromic coatings with different colors for buildings*. *Energy Build*, 215, 109920.

Záleská, M.; Pavlík, Z.; Čítek, D.; Jankovský, O.; Pavlíková, M. (2019). *Eco-Friendly Concrete with Scrap-Tyre-Rubber-Based Aggregate— Properties and Thermal Stability*. *Constr. Build. Mater.* 225, 709–722.

Zhang, L. ; Deng, Z. ; Liang, L. ; Zhang, Y. ; Meng, Q. ; Wang, J. ; and Santamouris, M. (2019). *Thermal Behavior of a Vertical Green Facade and Its Impact on the Indoor and Outdoor Thermal Environment*. *Energy and Buildings* 204. 109502. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109502>.

نجاة قناطي , حنان بوناب. الهوية العمرانية للمدينة الصحراوية. مجلة العلوم الإنسانية والاجتماعية. جامعة قسنطينة 2. عدد خاص بالماتقى الدوليتحولان المدينة الصحراوية. Volume 7, Numéro 22, Pages 35-42.

<https://www.flir.com>

<https://www.testo.com>

<https://www.hobodataloggers.com>

<https://www.oregonscientificstore.com>

<https://www.floornature.eu>

<https://www.futura-sciences.com>

<https://www.rona.ca>

ANNEXES

ANNEXE A

(Voir la version complète de la Norme ISO 9869-1:2014 sur DVD)

ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation. Le travail de préparation des Normes internationales est normalement effectué par les comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par un sujet pour lequel un comité technique a été constitué a le droit d'être représenté au sein de ce comité. Des organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO, participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (CEI) sur toutes les questions de normalisation électrotechnique.

Les procédures utilisées pour développer ce document et celles destinées à sa maintenance ultérieure sont décrites dans les Directives ISO/CEI, Partie 1. En particulier, les différents critères d'approbation nécessaires pour les différents types de documents ISO doivent être notés. Ce document a été rédigé conformément aux règles éditoriales des Directives ISO/IEC, Partie 2 (voir www.iso.org/directives).

L'attention est attirée sur la possibilité que certains éléments de ce document puissent faire l'objet de droits de brevet. L'ISO ne sera pas tenue responsable de l'identification de tout ou partie de ces droits de brevet. Les détails de tout droit de brevet identifié au cours de l'élaboration du document figureront dans l'introduction et/ou sur la liste ISO des déclarations de brevet reçues (voir www.iso.org/patents).

Pour une explication sur la signification des termes et expressions spécifiques à l'ISO liés à l'évaluation de la conformité, ainsi que des informations sur l'adhésion de l'ISO aux principes de l'OMC dans les obstacles techniques au commerce (OTC).

Le comité responsable de ce document est l'ISO/TC 163, Performances thermiques et utilisation de l'énergie dans l'environnement bâti, sous-comité SC 1, Méthodes d'essai et de mesure.

Cette première édition annule et remplace l'ISO 9869:1994, qui a fait l'objet d'une révision technique.

Le coefficient de transmission thermique d'un élément de construction (valeur U) est défini dans l'ISO 7345 comme le « débit thermique en régime permanent divisé par la surface et par la différence de température entre l'environnement de chaque côté d'un système ».

En principe, la valeur U peut être obtenue en mesurant le débit de chaleur à travers un élément avec un débitmètre de chaleur ou un calorimètre, ainsi que les températures des deux côtés de l'élément en régime permanent.

Cependant, comme les conditions de régime permanent ne sont jamais rencontrées sur un site en pratique, une mesure aussi simple n'est pas possible. Mais il existe plusieurs manières de surmonter cette difficulté :

Imposer des conditions de régime permanent par l'utilisation d'une boîte chaude et d'une boîte froide. Cette méthode est couramment utilisée en laboratoire (ISO 8990) mais est lourde sur le terrain ;

En supposant que les valeurs moyennes du débit de chaleur et des températures sur une période de temps suffisamment longue donnent une bonne estimation de l'état stationnaire. Cette méthode est valide si :

Les propriétés thermiques des matériaux et les coefficients de transfert de chaleur sont constants sur toute la plage de fluctuations de température se produisant au cours de l'essai.

Le changement de quantité de chaleur emmagasinée dans l'élément est négligeable par rapport à la quantité de chaleur traversant l'élément. Cette méthode est largement utilisée mais peut conduire à de longues périodes de mesure et peut donner des résultats erronés dans certains cas.

Utiliser une théorie dynamique pour prendre en compte les fluctuations du débit de chaleur et des températures.

Selon la norme (ISO 9869-Partie 1: 2014) la Résistance Thermique (R) est donné par les formules ci-dessous :

$$R = \frac{\sum_{j=1}^n (T_{sij} - T_{sej})}{\sum_{j=1}^n q_j}$$

Lorsque la température moyenne radiante vue par la surface peut être définie, la densité du débit de chaleur q peut être définie par :

$$q = E \cdot h_r \cdot (T_r - T_s) + h_c \cdot (T_a - T_s)$$

Avec :

T_r : est la température moyenne radiante vue par la surface (C° ou K).

T_a : est la température de l'air à proximité de la surface (C° ou K).

T_s : est la température de surface (C° ou K).

E : est l'émittance spatiale (sans dimension); elle intègre les facteurs de vue et les émissivités de toutes les surfaces concernées. Par exemple pour le polystyrène (E= 0.97).

h_r : est le coefficient de transfert de rayonnement, il est calculé par la formule suivante :

$$h_r = 4\sigma T_m^3$$

Avec :

$T_m = \frac{1}{2} (T_r + T_s)$ exprimé en kelvins.

σ est la constante de Stefan-Boltzmann : $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ (W / (m² · K⁴))

h_c : est le coefficient de transfert de convection, calculé par le modèle donné par McAdams qui définit h_c extérieur selon la texture lisse ou rugueuse de la paroi :

$$h_c = 5.678 \left[m + n \left(\frac{V_f}{0.3048} \right)^p \right]$$

où m, n, p sont les paramètres de rugosité des surfaces lisses et rugueuses données dans le tableau suivant :

type de surface	$V_f < 4.88$ m/s			4.88 m/s $\leq V_f < 30.48$ m/s	
	<i>m</i>	<i>n</i>	<i>p</i>	<i>m</i>	<i>n</i>
Lisse	0.99	0.21	1	0 0.78	0.50
Rugueux	1.09	0.23	1	0 0.78	0.53

Il est à noter que selon le modèle donné par McAdams, le $h_{c,ext}$ pour les surfaces rugueuses n'est que d'environ 6 à 10% plus élevé que pour les surfaces lisses, pour une vitesse du vent de 0 à 15 m/s.

Selon la norme (ISO 9869-Partie 1: 2014) la transmittance thermique (U) est donné par les formules ci-dessous :

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{ij} - T_{ej})}$$

Les critères de convergence spécifiés par les normes (ISO 9869-Partie 1: 2014) ont été respectés. Afin de rapporter une valeur R_c acceptable, les principales conditions afin de retenir la mesure sont :

La période de mesure, l'intervalle d'échantillonnage et d'enregistrement, La valeur R_c obtenue à partir des deux derniers jours de mesure ne doit pas différer de plus de 5%, La valeur cumulée R_c est rapportée pour chaque jour (y compris la moyenne des jours précédents), Au fur et à mesure que ce processus se poursuit, la courbe des valeurs R_c rapportées converge vers une certaine valeur, qui est la moyenne de toute la période de mesure.

Pour éviter les problèmes observés dans la pratique (la longue durée et le problème de précision). Cette étude s'est référée à une méthode décrite par (Arash et al. 2018), cette méthode dévoile la contribution des modifications apportées à la norme (ISO 9869-Partie 1: 2014) à l'amélioration des résultats des mesures in situ en termes de durée et de précision.

La méthode modifiée aide à obtenir la résistance thermique avec une plus grande précision dans un temps plus court.

À court terme, en mesurant le flux de chaleur q de part et d'autre de la paroi semble donner des résultats plus précise de R_c que si en le mesurant sur la paroi intérieure uniquement. Les deux valeurs de R_c devraient converger vers la même valeur finale sur une période suffisamment longue.

Si R_{c-in} et R_{c-out} sont les valeurs R_c obtenues sur la base du flux thermique cumulé à la surface intérieure et extérieure, la formule donnée par (Arash et al. 2018) est :

$$R_{c-ave} = (R_{c-in} + R_{c-out}) / 2 = \left[\frac{\sum_{j=1}^n (\Delta T)_{in}}{\sum_{j=1}^n q_{j,in}} + \frac{\sum_{j=1}^n (\Delta T)_{out}}{\sum_{j=1}^n q_{j,out}} \right] / 2$$

(Arash et al. 2018) a pour objectif d'aborder les deux problèmes susmentionnés (longue période et précision) et de montrer l'efficacité de l'utilisation de deux valeur de R_c (extérieur et intérieur) dans la méthode moyenne (ISO 9869), cette méthode semble être la solution la plus raisonnable, car la valeur moyenne R_c se converge beaucoup mieux et sera plus proche de la valeur finale donc plus fiable que les deux autres. De plus, l'utilisation de la valeur moyenne R_{c-ave} est une alternative pour augmenter la précision afin d'éviter de trouver deux valeurs différentes hors de la plage de précision.

ANNEXE B

Spécifications et détails des appareils de mesure

Tableau B. 1 : Spécifications de l'appareil HOBO H21-USB Data Logger

Operating Range	-20° to 50°C (-4° to 122°F) with alkaline batteries -40 to 70°C (-40 to 158°F) with lithium batteries
Smart Sensor Connectors	5
Smart Sensor Data Channels	Maximum of 15 (some smart sensors use more than one data channel; see sensor manual for details)
Smart Sensor Network Cable Length	100 m (328 ft) maximum
Logging Interval	1 second to 18 hours
Start Modes	Immediate, at interval, push button, or delayed start
Memory Modes	Stop when full or wrap when full
Memory	512 KB nonvolatile flash data storage
Time Accuracy	0 to 2 seconds for the first data point and ±5 seconds per week at 25°C (77°F)
Battery Type	Four AA 1.5 V alkaline batteries for operating conditions of -20° to 50°C (-4° to 122°F); four AA 1.5 V lithium batteries for operating conditions of -40 to 70°C (-40 to 158°F)
Battery Life	1 year, typical use (up to five sensors with 1 minute or greater logging interval)
Communication Type	USB 2.0 interface
Full Memory Download Time	4 minutes
Enclosure Access	Hinged door secured by one latch with eyelet for use with user-supplied padlock
Materials	Outer enclosure: Polycarbonate/PBT blend with stainless steel hinge pins; Gaskets: Silicone rubber; Cable channel: EPDM rubber
Dimensions	17.04 x 11.94 x 4.47 cm (6.71 x 4.70 x 1.76 in.) see diagrams in manual Padlock hole diameter: 0.58 cm (0.23 in.)
Weight	414g (14.6 oz.)
Environmental Rating	Weatherproof enclosure, NEMA 4X and IP66
CE	The CE Marking identifies this product as complying with all relevant directives in the European Union (EU).

Tableau B. 2 : Spécifications de l'appareil HOBO S-LIB-M003 Sensor

Specifications	Silicon Pyranometer Smart Sensor
Measurement Range	0 to 1280 W/m ²
Spectral Range	300 to 1100 nm (see Figure 4)
Accuracy	Typically within ± 10 W/m ² or ± 5%, whichever is greater in sunlight; Additional temperature induced error ± 0.38 W/m ² /°C from +25°C (0.21 W/m ² /°F from +77°F)
Angular Accuracy	Cosine corrected 0 to 80 degrees from vertical (see Figure 5); Azimuth Error < ±2% error at 45 degrees from vertical, 360 degree rotation
Resolution	1.25 W/m ²
Drift	< ±2% per year
Calibration	Factory recalibration available
Operating Temperature Range	-40° to +75°C (-40° to +167°F)
Environmental Rating	Weatherproof
Housing	Anodized aluminum housing with acrylic diffuser and O-ring seal
Dimensions	4.1 cm height x 3.2 cm diameter (1 5/8 in. x 1 1/4 in.)
Weight	120 g (4 oz)
Bits per Sample	10
Number of Data Channels *	1
Measurement Averaging Option	Yes
Cable Length Available	3.0 m (9.8 ft)
Length of Smart Sensor Network Cable *	3.0 m (9.8 ft)
Part Number	S-LIB-M003

Tableau B. 3 : Spécifications de l'appareil HOBO U12-012 Data Logger

Measurement Range

Temperature: -20° to 70°C (-4° to 158°F)

RH: 5% to 95% RH

Light intensity: 1 to 3000 footcandles (lumens/ft²) typical; maximum value varies from 1500 to 4500 footcandles (lumens/ft²)

Analog channels: 0 to 2.5 Vdc (w/CABLE-2.5-STEREO); 0 to 5 Vdc (w/CABLE-ADAP5); 0 to 10 Vdc (w/ CABLE-ADAP10); 4-20 mA (w/CABLE-4-20MA)

Accuracy

Temperature: ± 0.35°C from 0° to 50°C (± 0.63°F from 32° to 122°F), see Plot A in manual

RH: ± 2.5% from 10% to 90% RH typical, to a maximum of ±3.5% including hysteresis at 25°C (77°F); below 10% and above 90% ±5% typical, see Plot B in manual

Light intensity: Designed for indoor measurement of relative light levels, see Plot D in manual for light wavelength response

External input channel (see sensor manual): ± 2 mV ± 2.5% of absolute reading

Resolution

Temperature: 0.03°C at 25°C (0.05°F at 77°F), see Plot A in manual

RH: 0.05% RH

Sample rate: 1 second to 18 hours, user selectable

Drift

Temperature: 0.1°C/year (0.2°F/year)

RH: <1% per year typical; RH hysteresis 1%

Response Time in Airflow of 1 m/s (2.2 mph)

Temperature: 6 minutes, typical to 90%

RH: 1 minute, typical to 90%

Time accuracy: ± 1 minute per month at 25°C (77°F), see Plot C in manual

Operating Temperature

Logging: -20° to 70°C (-4° to 158°F); 0 to 95% RH (non-condensing)

Launch/readout: 0° to 50°C (32° to 122°F), per USB specification

Battery life: 1 year typical use

Memory: 64K bytes (43,000 12-bit measurements)

Weight: 46 g (1.6 oz)

Dimensions: 58 x 74 x 22 mm (2.3 x 2.9 x 0.9 inches)

Tableau B. 4 : Spécifications de l'appareil TESTO -IAQ- Data Logger

Température CTN (avec la sonde correspondante)		Données techniques générales	
Étendue de mesure	-40 ... +150 °C	Raccords pour sondes	4 TUC*, 2 TC de type K
Précision (±1 digit)	±0,2 °C (-25,0 ... +74,9 °C) ±0,4 °C (-40,0 ... -25,1 °C) ±0,4 °C (+75,0 ... +99,9 °C) ±0,5 % v.m. (étendue restante)	Interface	USB
Résolution	0,1 °C	Température de service	-5 ... +45 °C
Température TC de type K (avec la sonde correspondante)		Température de stockage	-20 ... +60 °C
Étendue de mesure	-200 ... +1 370 °C	Alimentation électrique	Alimentation électrique externe bloc d'alimentation
Précision (±1 digit)	±(0,3 °C + 0,1 % v.m.)	Mémoire	1,5 MB= 360 000 valeurs de mesure
Résolution	0,1 °C	Indice de protection	IP 20
		Dimensions	136 x 89 x 39 mm
		Poids	162 g

Tableau B. 5 : Spécifications de l'appareil TESTO 480

Type de capteur	Pression différentielle, intégrée	Pression absolue, intégrée et externe	Type K (NiCr-Ni)
Etendue de mesure	-100 ... +100 hPa	700 ... 1100 hPa	-200 ... +1370 °C
Précision ± 1 digit	± (0.3 Pa + 1 % v.m.) (0 ... +25 hPa) ± (0.1 hPa + 1.5 % v.m.) (+25 001 ... +100 hPa)	± 3 hPa	± (0.3 °C + +0.1% v.m.)
Résolution	0 001 hPa	0.1 hPa	0.1 °C
Type de capteur	Température de rayonnement, globe	Pt100	Hélice, 16 mm
Etendue de mesure	0 ... +120 °C	-100 ... +400 °C	+0.6 ... +50 m/s
Résolution	0.1 °C	0.01 °C	0.1 m/s
Type de capteur	Hélice, 100 mm	Fil chaud, boule chaude	Sonde de bien-être
Etendue de mesure	+0.1 ... +15 m/s	0 ... +20 m/s	0 ... +5 m/s
Résolution	0.01 m/s	0.01 m/s	0.01 m/s
Type de capteur	Capteur d'humidité capacitif Testo	CO ₂	Lux
Etendue de mesure	0 ... 100 %HR	0 ... 10 000 ppm CO ₂	0 ... 100 000 Lux
Résolution	0.1 %HR	1 ppm CO ₂	1 Lux

Tableau B. 6 : Spécifications du Thermomètre globe 0602 0743

Propriété	Valeurs
Plage de mesure	0 ... +120 °C
Précision à 22 °C ± 1 digit	Thermocouple de type K classe 1
Temps de réponse	env. 30 min.

Tableau B. 7 : Spécifications de la Caméra thermique FLIR Caméra thermique

Color Alarm (Isotherm)	•Above •Below •Interval •Condensation (moisture/humidity/dewpoint) •Insulation
Difference Temperature	Yes
Display	4", 640 x 480 pixel touchscreen LCD with auto-rotation
Display Technology	IPS
Housing material	PCABS with TPE, magnesium
Laser Alignment	Position is automatically displayed on the infrared image
Laser Pointer	Class 2, 0.05–40 m (0.16–131 ft.) ±1% of measured distance
NETD	<50 mK
Packaging Size	500 x 190 x 370 mm (19.7 x 7.5 x 14.6 in.)
Programmable Buttons	2
Resolution	464 x 348 pixels (VGA)
Size (L x W x H)	Lens horizontal: 140 x 201.3 x 167.3 mm (5.5 x 7.9 x 6.6 in.)
Time Lapse [Infrared]	10 sec to 24 hrs
Voice	60 sec. recording added to still images or video via built-in mic (has speaker) or via Bluetooth®
Warranty	http://www.flir.com/warranty/
Weight & Dimensions (without lens)	1.3 kg (2.9 lbs), 140 x 201 x 84 mm (5.5 x 7.9 x 3.3 in)

ANNEXE C

Données climatiques de Constantine

Tableau C. 1 : Données climatiques de Constantine

WEATHER DATA SUMMARY												LOCATION: Constantine (Ain El), -, -	
												Latitude/Longitude: 36.283° North, 6.617° East, Time Zone from Greenwich 1	
												Data Source: MN7 604190 WMO Station Number, Elevation 694 m	
MONTHLY MEANS	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	
Global Horiz Radiation (Avg Hourly)	268	315	393	450	495	541	578	525	453	374	297	253	Wh/sq.m
Direct Normal Radiation (Avg Hourly)	389	393	423	448	476	546	649	578	494	453	429	443	Wh/sq.m
Diffuse Radiation (Avg Hourly)	107	123	148	159	175	151	115	142	145	138	109	86	Wh/sq.m
Global Horiz Radiation (Max Hourly)	635	734	917	1100	1076	1101	1053	964	925	851	648	577	Wh/sq.m
Direct Normal Radiation (Max Hourly)	989	996	990	1003	1015	1012	971	901	980	996	989	971	Wh/sq.m
Diffuse Radiation (Max Hourly)	280	330	417	459	486	486	359	434	446	378	304	251	Wh/sq.m
Global Horiz Radiation (Avg Daily Total)	2639	3359	4656	5831	6915	7810	8208	7009	5545	4129	2999	2422	Wh/sq.m
Direct Normal Radiation (Avg Daily Total)	3838	4193	4994	5806	6643	7889	9224	7703	6033	4979	4321	4246	Wh/sq.m
Diffuse Radiation (Avg Daily Total)	1055	1307	1754	2065	2445	2188	1629	1902	1786	1529	1098	829	Wh/sq.m
Global Horiz Illumination (Avg Hourly)	28857	33966	42412	48771	53975	58877	62832	57695	49910	41121	32427	27399	lux
Direct Normal Illumination (Avg Hourly)	35441	36672	39366	42780	44926	53051	63867	54997	47803	42417	39779	40054	lux
Dry Bulb Temperature (Avg Monthly)	6	7	10	13	18	23	27	25	20	17	11	7	degrees C
Dew Point Temperature (Avg Monthly)	3	3	5	7	11	12	13	14	13	11	6	4	degrees C
Relative Humidity (Avg Monthly)	81	76	71	71	66	53	46	52	66	67	76	81	percent
Wind Direction (Monthly Mode)	260	250	240	250	290	60	30	10	180	270	250	270	degrees
Wind Speed (Avg Monthly)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	m/s
Ground Temperature (Avg Monthly of 1 Depths)	13	11	10	11	13	15	18	20	21	20	18	15	degrees C

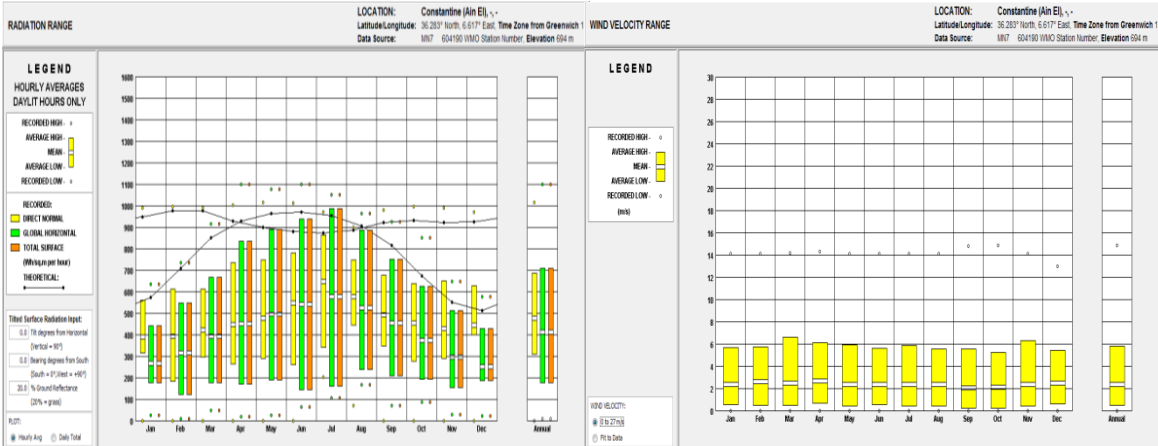
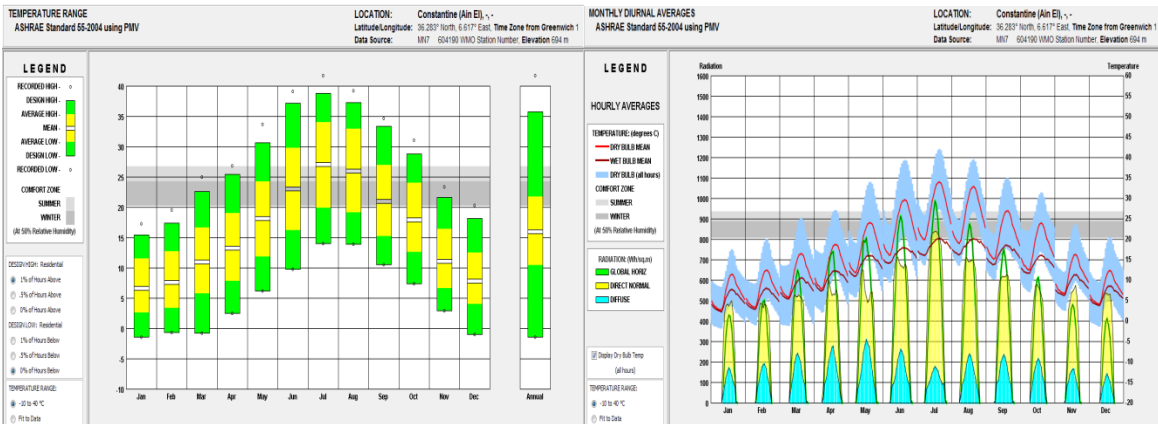


Figure C. 1 : Variation des données climatiques de Constantine

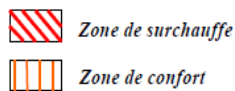
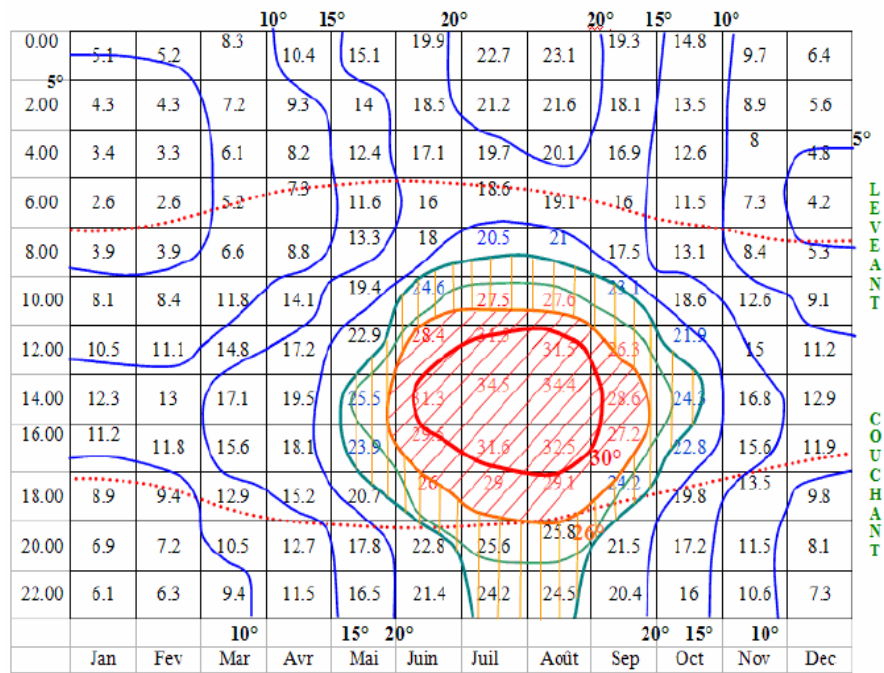


Figure C. 2 : Isothermes de Constantine

a) Calcul de la température neutre T_n d'après la formule suivante :

$$T_n = 11.9 + 0.534 T_0$$

Où T_n : la température neutre en °c

T_0 : la température extérieure moyenne du mois en question en °c.

$$T_0 = 26.1^\circ\text{c}$$

$$T_n = 25,8^\circ\text{c}$$

b) Les températures limites de confort T_c

$$T_c = T_n \pm 2 \text{ K.}$$

$T_c = T_n + 2\text{K} = 27.8^\circ\text{c}$ c'est la limite supérieure du confort.

$T_c = T_n - 2\text{K} = 23.8^\circ\text{c}$ c'est la limite inférieure du confort.

La plage de confort est située entre $23,8^\circ\text{c}$ et $27,8^\circ\text{c}$

Article

Experimental Study on the Thermal Behavior of Exterior Coating Textures of Building in Hot and Arid Climates

Islam Boukhelkhal *  and Fatiha Bourbia

Bioclimatic Architecture and Environment Laboratory ABE, University Constantine 3, Constantine 25000, Algeria; fatiha.meghezzi@univ-constantine3.dz

* Correspondence: islam.boukhelkhal@univ-constantine3.dz; Tel: +213-661-864-280

Abstract: The building envelope is the barrier between the interior and exterior environments. It has many important functions, including protecting the interior space from the climatic variations through its envelope materials and design elements, as well as reduction of energy consumption and improving indoor thermal comfort. Furthermore, exterior building sidings, in addition to their aesthetic appearance, can have useful textures for reducing solar gains and providing good thermal insulation performance. This research examined and evaluated the effect of external siding texture and geometry on energy performance. For this objective, a field in situ testing and investigation of surface temperature was carried out on four samples (test boxes) with different exterior textures and different orientations, under the climate zone of Constantine–Algeria during the summer period. The results indicated significant dependability between the exterior texture geometry, the percentage of shadow projected, and external surface temperature. The second part of the research involved a similar approach, exploring the effect of three types of particles with the same appearance but with different thermal characteristics. It was concluded that the natural plant aggregates “palm particles” had the best performance, which contributed to a significant reduction of external surface temperature reaching 4.3 °C, which meant decreasing the energy consumption.

Keywords: solar radiation; surface temperature; coating texture; shade; palm particles; thermal comfort



Citation: Boukhelkhal, I.; Bourbia, F. Experimental Study on the Thermal Behavior of Exterior Coating Textures of Building in Hot and Arid Climates. *Sustainability* 2021, 13, 4175. <https://doi.org/10.3390/su13084175>

Academic Editor: Mariateresa Lettieri

Received: 19 February 2021

Accepted: 2 April 2021

Published: 9 April 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Climate change is one of the most debated topics of the 21st century. The planet has experienced phenomena caused by this change, such as rising temperatures, heat waves, rising sea levels, more intense storms, and forest fires. Since 1930, Over 100,000 new chemical compounds have been developed, and there has been missing information on the health assessment of such chemicals, of which a large portion are used in construction products. For example, Portland cement concrete, which is the most widely used material on the planet (10,000 million tons/year, and which, in the next 40 years, will increase by about 100%), contains chemicals used to modify their properties, fresh or hardened, whose effects on health and the environment are not yet fully understood [1].

The building envelope is an outer skin enclosure that can exclude unwanted effects while admitting desirable ones; it plays a crucial role in improving building energy efficiency and indoor comfort for the occupants. The choice of the external envelope is the first issue to be considered in the building energy-saving design. The next decision is to determine the suitable exterior cladding material and texture for optimizing energy efficient. These elements come in diverse categories (slate, brick, cement, plaster, marble, painting,) used for covering outside, consolidating, protecting, or decorating walls. These can also influence the energy consumption and improve indoor thermal comfort through their texture. To approach this research, we will review the three primary related areas: external coating, self-shading, coating colors, and smart kinetic coating. A number of studies discuss traditional brick properties and patterns.

The thermal design of the building envelope is optimized in order to pursue two objectives: the minimization of primary energy demand for the annual space conditioning and the minimization of thermal discomfort hours.

Ascione et al. [2] presented a study on external coating of the building envelope for two different cities, Naples and Istanbul, characterized by Mediterranean climates, in order to minimize the annual energy demand and maximize indoor comfort. The research explored different thermal properties of the coating, such as their aptitude to absorb or reflect the solar radiation, the infrared emission of the insulation, and the density and thickness of the masonry layers. The results in general showed that cool colors and cool materials were always suitable for hot climates, and peculiarly, the insulation of the walls should be high but not excessive. The high-reflective coating was also useful and reflected solar radiation, improving the cooling demand. Similarly, Yuxuan et al. [3] studied the energy saving performance of thermochromic coatings with different colors for buildings in Shanghai. It was observed that the surface temperature of thermochromic coatings was lower than the ordinary coating during cooling period and higher than the ordinary coating during heating period. The results indicate that thermochromic coatings have better energy saving effects, especially for areas with hot summers and cold winters. Ibrahim et al. [4] studied the thermal performance of exterior walls covered with a silica-aerogel-based coating. The results of this study showed that, for most of the cases studied, the aerogel-based coating showed better performance than other coating materials. Gagliano et al. [5] studied synergistic effects of thermal mass and natural ventilation on the thermal behavior of traditional massive buildings in Italy; the results highlighted that the massive envelope of traditional buildings helped in maintaining small fluctuations of indoor temperature. This research also indicated that, for a Mediterranean climate, the increase in thermal insulation does not always induce positive effects on the thermal performance in summer, and that it might even produce an increase in the heat loads due to the transmission through the envelope. Joudi et al. [6], in turn, studied the use of reflective exterior coatings to improve the thermal performance of buildings through different scenarios with reflective coatings. The results showed a correlation between the energy efficiency of the building and reflective coatings. Khadraoui et al. [7] evaluated the impact of coating in the form of a ventilated façade on thermal comfort in arid areas. The study showed that the building with this system was more efficient than a reference building. The arrangement of terracotta elements is very effective as a multifunctional envelope, serving to protect the building, increasing its energy performance, and improving its aesthetic appearance.

Several studies have also evaluated the thermal performance of exterior coatings through self-shading walls. In Israel, Capeluto [8] studied the energy performance of a self-shading building envelope; the results revealed that, for all the orientations, there was an important improvement in the energy performance of the building, particularly for east and west orientations. Other research, conducted by Alhuwayil et al. [9], studied the impact of an external shading strategy on the energy performance of building in hot-humid climates; the results showed that the proposed shading could save the annual energy consumption of the building by 20.5% compared to the base case. The payback period for the additional investment required for incorporating the self-shading strategy is estimated to be 2 years. Liu et al. [10], in turn, studied the impact of self-shading on buildings in Hong Kong; this study proposed the adoption of shading devices on opaque façades and evaluated their energy saving potentials in summer conditions. The results showed that, with the optimization of variables, such as the length, the number, and the angle of inclination of the shading panels on facades facing west, an energy saving potential up to 8.0% was possible. In other research, Kandar et al. [11] studied the influence of self-shading strategy of inclined walls on the energy performance of buildings in hot and humid climates. The results showed that the self-shading projection with an angle of more than 45 °C could reduce the heat gains of the building envelope; an optimization with an angle of 65 °C to the horizontal plane gave the best performance results, which led to a decrease in energy consumption. Merhan [12] studied the self-shading walls to improve

environmental performance in desert buildings; the study aimed to present proposals to create shadows on opaque solid walls. The results showed that the self-shading wall strategy succeeded in reducing the outer surface temperature and incident solar radiation compared to the base case.



Other explorations have studied the effect of albedo on the external surface temperature, neglecting the texture of this colored face. Among these researchers, Mansouri et al. [13,14] evaluated the effect of the albedo in the exterior envelope on reducing the energy needs of buildings while varying the color. The results showed that the building envelope with a high albedo (0.9) recorded much lower values compared to the reference building with an albedo of (0.5). Bansal et al. [15], through an experimental study of samples, found that a black wall recorded a surface temperature 7 °C higher than a white wall during the hot period of the day, which means that the albedo plays a major role in determining the surface temperature. Taha et al. [16] carried out a study on exterior coatings characterized by high albedo. The results showed that, in summer, white elastomeric coatings were cooler than black elastomeric coatings. Coatings with high albedo in hot climates reduced the amount of incoming solar radiation and kept the building surfaces cool.

Other researchers are studying revolutionary technologies, such as phase-change materials, smart and kinetic envelopes, and design of a solar envelope, because their application improves building energy efficiency, which is a challenge that architects face today. The study by Tarabieh et al. [17] explored the impact of brick bond types on building energy. The brick wall models were classified into three cases: $\frac{1}{4}$ brick extrusion, $\frac{1}{2}$ brick extrusion, and base case (smooth) for each brick bond (Running, English, and Flemish). The results showed that the Flemish bond case was the best performing, followed by the English bond. The percentage of extrusion seems to play a very important role in the results. Ben Bacha et al. [18] simulated the effect of shading devices on the building envelope with a kinetic system that actively reacted with weather conditions. The results obtained from this research showed that kinetic facades equipped with PV modules reduced direct radiation by 17.9%, which contributed to a decrease of indoor air temperature ranging between 4.0 °C to 4.8 °C. Other research, conducted by Ercan et al. [19], presented a parametric numerical simulation methodology. This study generated shading devices in the building envelope in hot and humid climates that could optimize daylight while blocking excessive solar heat gain. The design alternatives have been generated by scalable algorithms in accordance with daylight performance requirements. Research conducted by Nocera et al. [20] studied the adaptation of historic buildings reused as school buildings in order to optimize daylight; the results of this study proposed different technological and modernization solutions at the level of coating and built the envelope to improve visual comfort while respecting the cultural and historical value of the building heritage. Thus, these interventions can also be used in other regions of Europe with similar climatic conditions. Rodonò et al. [21], in turn, presented a method for the production of composite materials and their mechanical and physical characterization; the objective of this research was to create a new composite material that could be folded and unfolded easily in order to give lightweight solutions for exterior building envelopes.

In addition, several experimental studies were done using ecological, organic, or recycling components in the building envelope, in particular, using plant components such as palm particles, because of these thermal and volume characteristics. This material has been used as aggregate in concrete, in wall structures, and as thermal insulation, but has not been used as a component for exterior coating. Benmansour et al. [22] presented an investigation of new material, composed of natural cement, sand fibers, and date palm particles, in order to assess the usage possibilities of this new material as thermal insulation in the concrete. Several composites were prepared for different mass concentrations (from 0% to 30%). The results revealed that the incorporation of date palm particles, loading lower than 15%, satisfied both thermal and mechanical requirements of construction materials, and they could be used for wall structures. Other research done by Oushabi et al. [23] investigated

the morphological and thermal properties of polyurethane composites reinforced with date palm particles as new ecological thermal insulation materials in buildings. The composites were prepared with different loadings; 5%, 10%, and 20%. The results showed that the mechanical and thermal performance of this new insulation was competitive with those of other insulators available in the market. From this investigation, it could be deduced that palm particles reduced the thermal conductivity of the composite while reducing its weight, and they could be used for wall structures. Thus, its use as filler in the mortar seems to be a very promising option, which allows it to be applied as a thermal insulation material. In another similar approach, Záleská et al. [24] studied the recycling of pneumatic waste (tire) mixed with cement concrete. The results indicate that the addition of these aggregates resulted in a decrease in weight, a deterioration of mechanical parameters, and a significant reduction in the thermal conductivity of concrete.

Based on the previous review, external coating plays a crucial role in improving building energy efficiency and indoor comfort for the occupants. Therefore, the choice of the external envelope is the first issue to be considered when making an energy saving building. In Algeria, the use of coating texture as a decorative element appears in a number of traditional architectural styles, especially in the southern part of the Algerian Desert, characterized by a hot and arid climate. In this part of Algeria, traditional buildings are built to cope with the harsh climatic conditions.

Therefore, the objective of this study is to evaluate the thermal behavior of the exterior walls with different coating textures inspired by traditional wall construction methods, as shown in Figure 1. Traditional construction used self-shading walls as a cooling strategy for reducing the amount of incoming solar radiation. Therefore, it is important to determine the suitable exterior wall cladding texture and material for optimizing energy efficient buildings for hot climates.

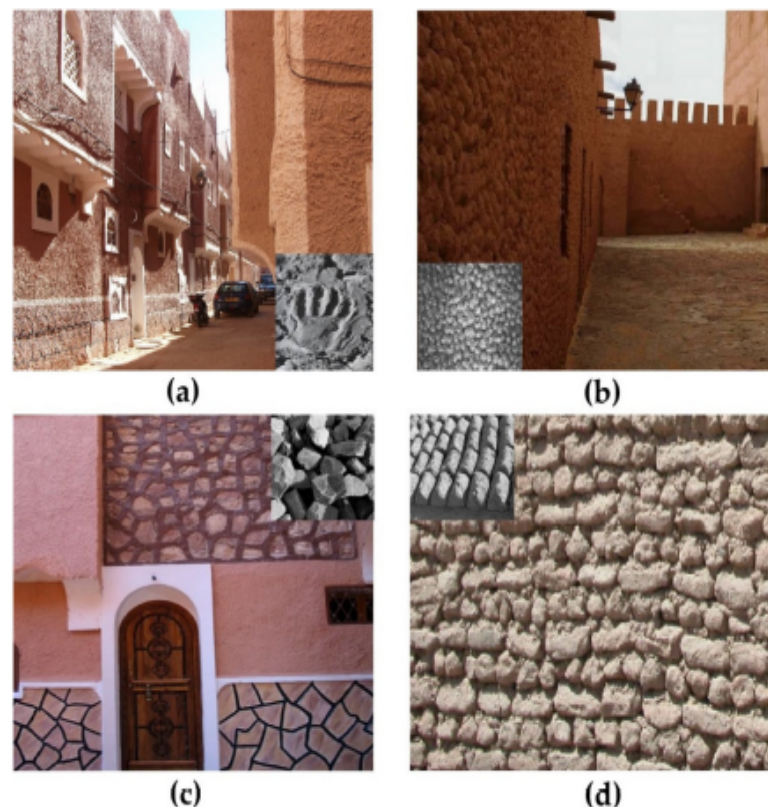


Figure 1. Traditional wall texture design in the great south of Algeria. (a: Ghardaia region)—(b: Timimoun region)—(c: Hoggar region)—(d: Taghit region). (Source: Authors, 2015).

2. Materials and Methods

The overall approach methodology of this research is illustrated by Figure 2:

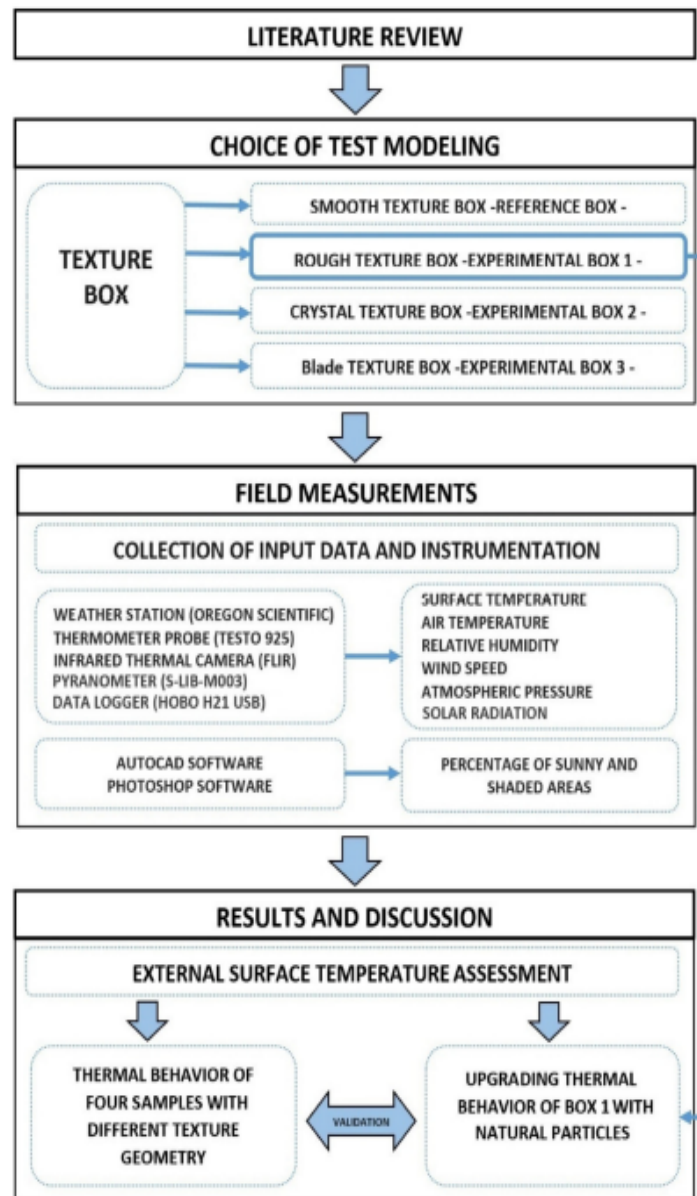


Figure 2. Conceptual Framework Study.

In this paper, the methodology we followed was based on the sequence of previous reviews. We started by studying the effect of wall texture geometry in decreasing the intensity of incoming long wave radiation in summer and lowering the external surface temperature. Then, another important motivation for upgrading the thermal characteristics of the investigated walls, we tried to incorporate natural particles (ecological, organic, waste, and recycling components) into exterior coating material. This research is beneficial for optimizing the thermal behavior of the building envelope in order to reduce energy use and provide comfort to occupants.

The present study consisted of two steps. The first series of measurements were carried out on four boxes with a one-meter dimension for each side (1 m^3). After searching and investigating on the traditional texture in the south of Algeria [25,26], the choice was made

on four types of textures, smooth texture (STB) as reference texture, rough texture (RTB), crystal texture (CTB), and blade texture (BTB), as shown in the Figure 3. This operation was developed with the presence and assistance of a qualified builder. At this stage, the material chosen for building the exterior wall coating was composed of cement mortar with a thickness of 30 mm. The boxes were first tested and some thermal measurements were done before laying any texture coatings in order to avoid any kind of mistake. The four samples were provided with insulation at roof and floor level; the thermal transmission was almost zero. The obtained results without coating were similar.

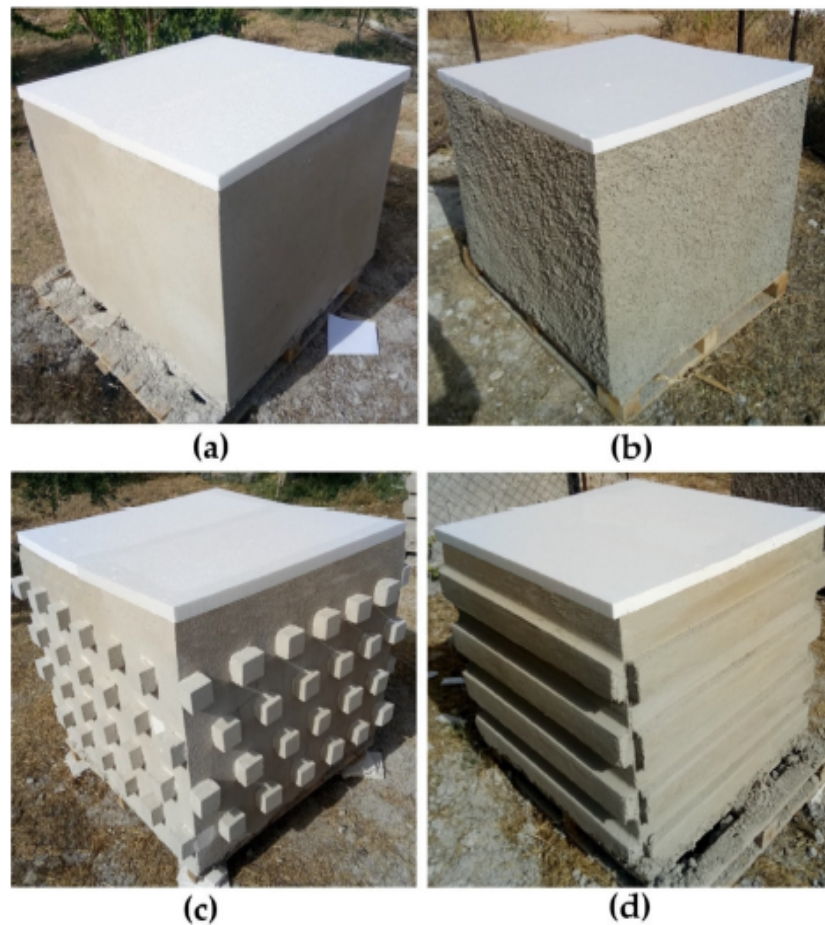


Figure 3. The selected textures for surface temperature measurements. (a) smooth texture (STB)—(b) rough texture (RTB)—(c) crystal texture (CTB)—(d) blade texture (BTB). (Source: by Authors, 2019).

The second step of this research consisted of studying the effect of incorporating natural particles (ecological, organic, waste, and recycling components) into exterior coatings. After research and development in improving thermal performance of the exterior envelope of buildings, a variety of particles were tested, and the selection was made of three types with different thermal characteristics: Figure 4 shows a component from sand quarries, a component from ecological recycling (pneumatic waste), and a component obtained from collected date palm waste (palm particles). These waste materials were washed with distilled water to remove surface impurities and salt, then oven dried. These components were crushed and separated into different sizes, similar to the sand aggregate.

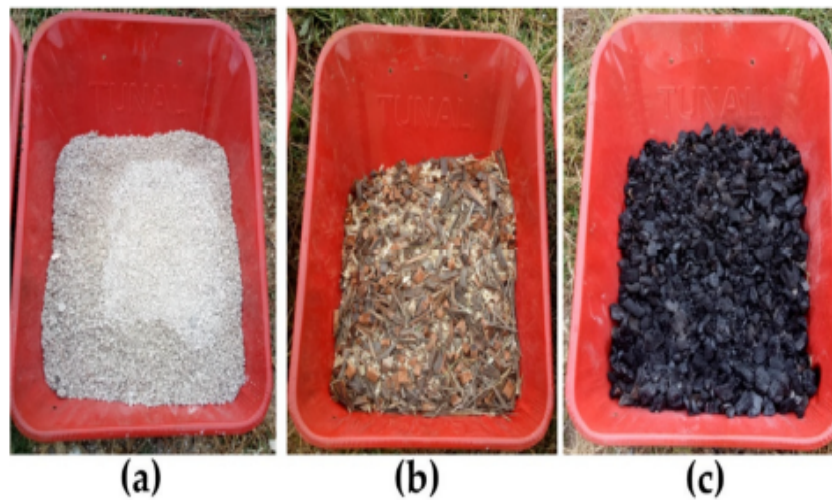


Figure 4. Evaluation of the thermal behavior of the tested aggregate. (a: sand aggregates)—(b: palm particles)—(c: tire waste). (Source: by Authors, 2020).

After many in situ test measurements, the choice was made on the palm particles, which showed the capacity to reduce the surface temperature more than the pneumatic waste aggregates. This choice was based on the ability to keep better thermal properties in order to reuse it as mortar aggregates in the manufacture of exterior coating textures. This material has been the subject of several research studies. It has shown high heat capacity due to its characteristics in reducing thermal conductivity, compressive strength, and weight reduction [22,23]. In addition, this material is widely available from date palms in the region of the great south of Algeria [27]. Figure 5 shows the surface temperature difference of the three samples.

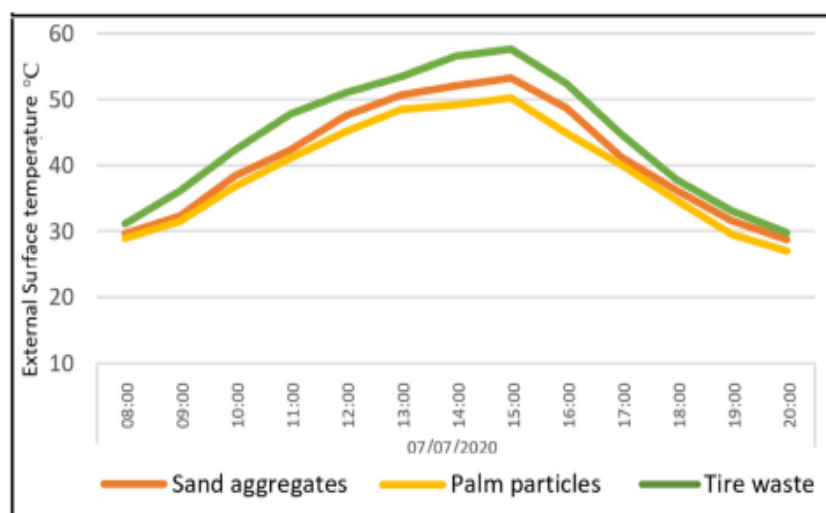


Figure 5. Surface temperature values of the three samples.

In order to evaluate the thermal behavior of the exterior wall textures, three boxes with a rough texture of (1 m³) each were constructed separately: (RTB), (RTB1), and (RTB2). Each box was made with different concentrations of palm particle aggregates (0%, 30%, and 70%) respectively. Figure 6 shows the rough texture with different concentration of palm particles aggregate (0% and 30%) respectively.



Figure 6. Rough texture with different concentration of palm particles aggregate.

Field Measurements and Instrumentation

In this experimental study, measurements were carried out in order to evaluate the thermal behavior of the exterior coating texture. This study was executed in Constantine city, situated in the northeast part of Algeria (latitude: 36.9126° N, longitude: 7.0213° E). Constantine is characterized by a hot and dry climate in summer. The experimental system (TEST BOX) was installed on a private garden in a cleared area, using different measuring instruments (FLIR type thermal camera—thermometers with connectable probe type (TESTO 925)) used for wall surface temperature. The external measurements were done by an (Oregon Scientific) type weather station used for collecting external climatic data and pyranometer (S-LIB-M003) with data logger (HOBO H21 USB). Figure 7 shows the scientific instruments used for in situ measurements.



Figure 7. Scientific instruments used for in situ measurements.

The measurements for the first phase of this study were taken on 2019 during the summer from June 23 to June 30 (08 days), the longest days of the year, where the hottest days were recorded on June 25, 26, 27, 2019. During this period, the weather station (Oregon Scientific) was installed in proximity to the test boxes and recorded a maximum of air temperature (AT) reaching 48.2 °C at 1:00 pm, a minimum of humidity of 6%, and an atmospheric pressure around 646 hPa. The solar radiation on a vertical plane recorded by the pyranometer was around 361 (Wh/m²) at midday.

The second phase of measurements was done during the summer period of 2020, choosing the same period, from June 23 to June 30. The output data were recorded from 12 h (8:00 a.m.) to (8:00 p.m.) with an interval of 60 min. The maximum air temperature (AT) recorded by the weather station (Oregon Scientific) was around 44.6 °C at 2:00 pm. The

solar radiation on a vertical plane recorded by the pyranometer was around $328 \text{ (W/m}^2\text{)}$ at midday.

3. Results and Discussion

3.1. Effect of Texture Geometry on Surface Temperature

The results of the measurements during the summer showed some variations in external surface temperature (EST) for the four different samples when compared with each another for all orientations. The results of the external surface temperature (EST) tested by (FLIR) thermal camera and (TESTO 925) are shown in the Figures 8–11. We took the south facade as an example, showing the different textures, the projected shadow, and the surface temperature for the selected hours of the chosen investigation days:

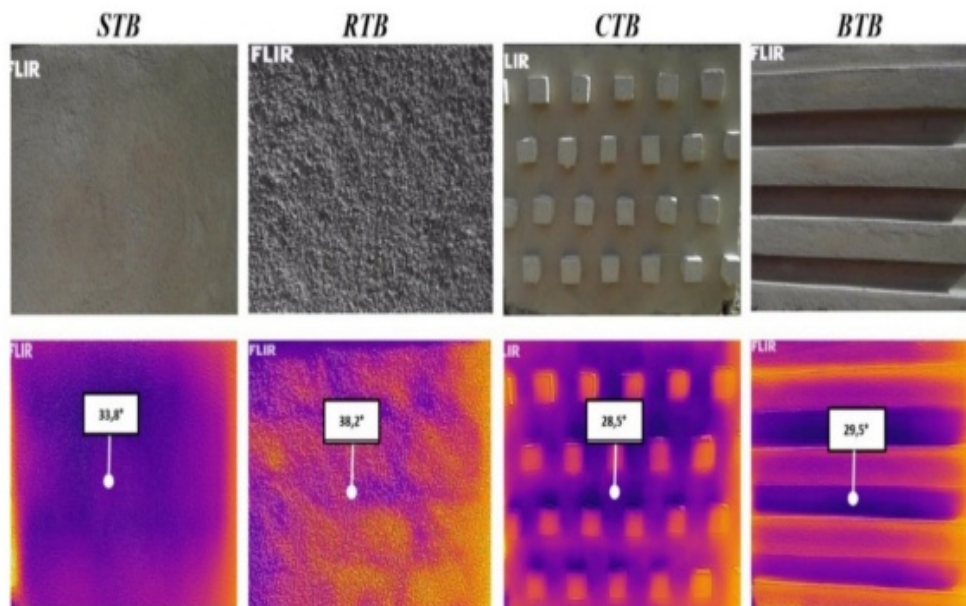


Figure 8. External surface temperature of the south orientation at (9:00 a.m.).

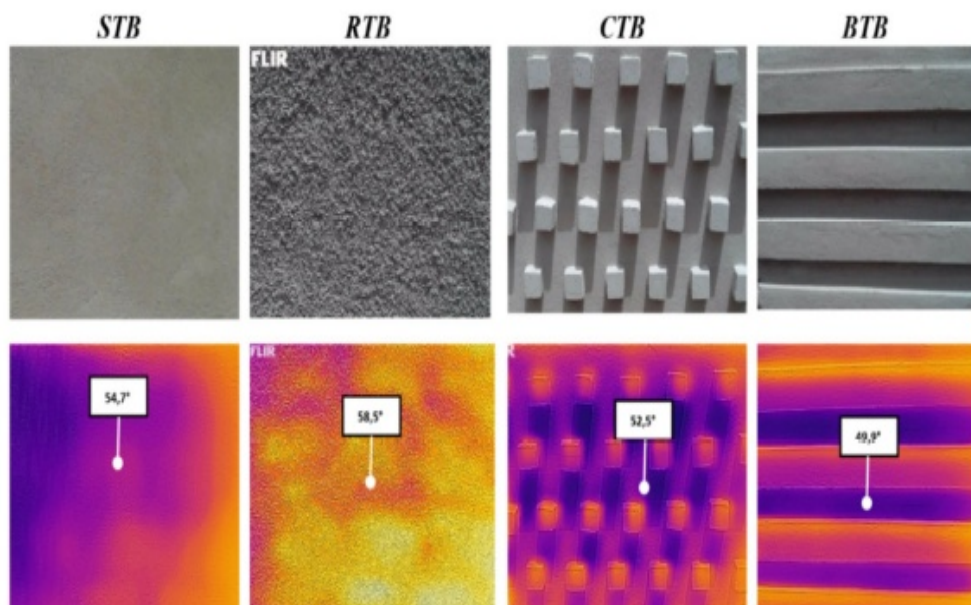


Figure 9. External surface temperature of the south orientation at midday.

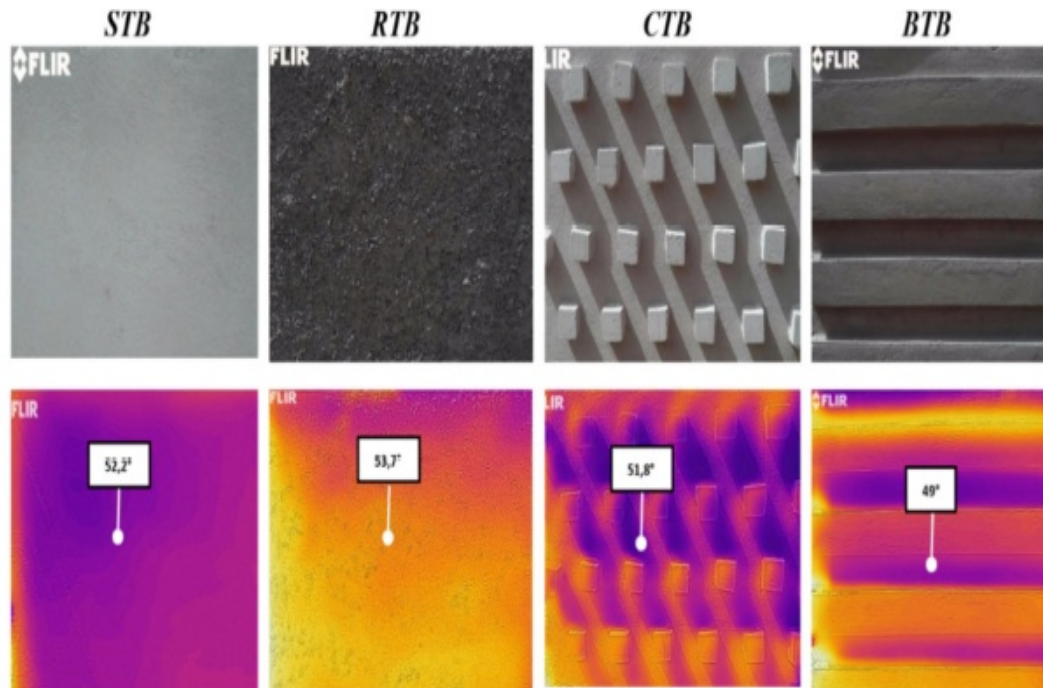


Figure 10. External surface temperature of the south orientation at (3:00 p.m.).

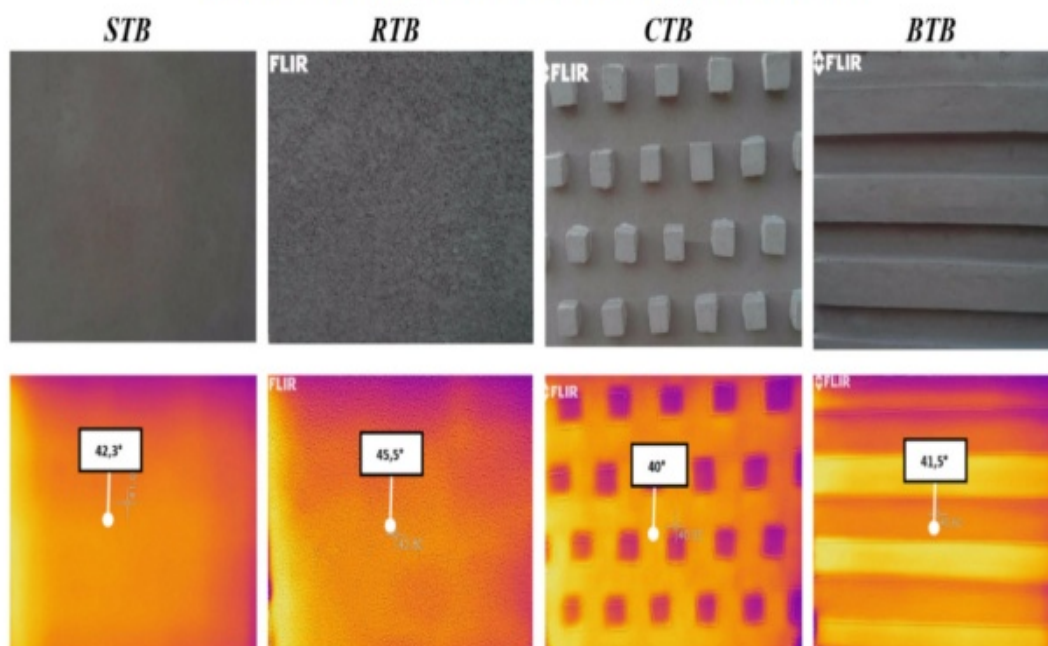


Figure 11. External surface temperature of the south orientation at (6:00 p.m.).

As indicated in Figures 8–11, the textures that represent the lowest value of the external surface temperature (EST) are the blade texture (BTB) and the crystal texture (CTB) during the summer period. It is important to determine the shadow fraction (SF), which is the ratio between the direct solar radiation received by any surface under the obstruction and the same surface fully exposed to direct solar radiation, because, in hot dry climates, minimization of solar radiation and increasing shade are desirable measures for reducing thermal stress.

At 9:00 a.m., the air temperature (AT) recorded by the weather station (Oregon Scientific) was 33.3 °C, the relative humidity was around 20%, and the solar radiation on a vertical plane recorded by the pyranometer was approximately 224 (W/m²). Meanwhile, the crystal texture represented the lowest value of external surface temperature (EST) = 28.5 °C. This was mainly caused by the texture and the size of shadowed area, with SF equal to 95% compared to the total surface of the wall, followed by the blade texture, EST = 29.5 °C with SF = 37% on the total surface of the wall. The most critical value was recorded at the rough texture (RTB), with EST = 38.2 °C, whether because of the shaded or exposed surface, it represented a greater percentage of shade than the blade texture.

This observation was made throughout the day. At midday, the air temperature (AT) recorded by the weather station (Oregon Scientific) was 46.3 °C, the relative humidity was around 9%, and the solar radiation on a vertical plane recorded by the pyranometer was approximately 377 (W/m²). Meanwhile, the lowest value of external surface temperature was recorded at the level of the blade texture (BTB), approximately 49.9 °C presenting a 41% SF, followed by the crystal texture (CTB), approximately 52.5 °C presenting 40% SF. The smooth texture (STB) marked a value of 54.7 °C, while the rough texture (RTB) always scored the highest value (EST) = 58.5 °C.

At 3:00 p.m., for example, the blade texture (BTB) recorded the lowest value of external surface temperature, (EST) = 49 °C with (SF) = 40%. Otherwise, the rough surface always recorded the most critical value, (EST) = 53.7 °C, which was higher compared to the smooth surface, (EST) = 51.2 °C, while the latter had been totally exposed to solar radiation. Meanwhile, the weather station (Oregon Scientific) recorded an air temperature (AT) of about 47.8 °C and a relative humidity of 06%. Thus, the solar radiation on a vertical plane recorded by the pyranometer was of the order of 156 (W/m²). On the basis of the obtained results, we deduced that there is a correlation between EST and SF. As mentioned in Figure 12, the rough texture (RTB) presented the lowest correlation compared to the other textures.

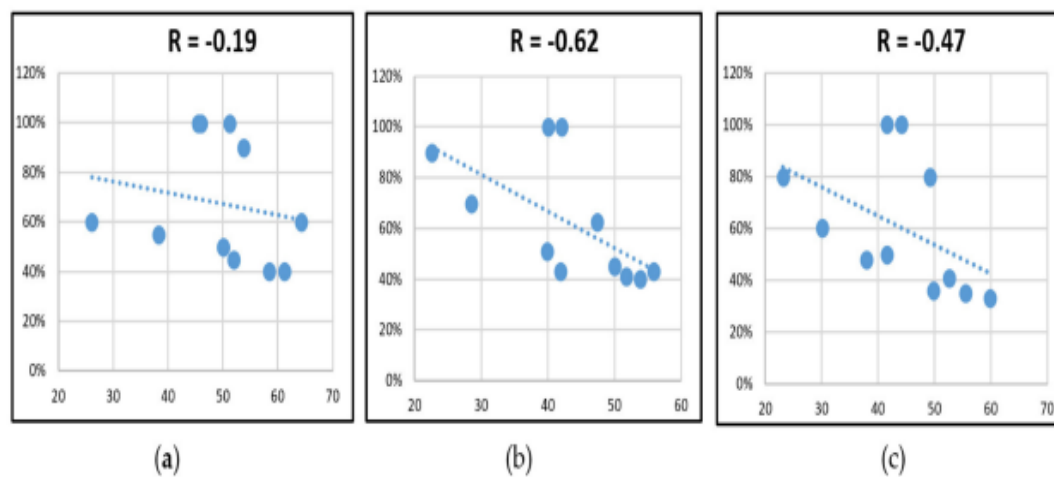


Figure 12. Correlation results of external surface temperature (EST) and shadow fraction (SF) for (a-RTB)—(b-CTB)—(c-BTB).

Table 1 shows the different results recorded for the external surface temperature for the four studied textures, considering all orientations.

Through these tables, we noticed that the most critical number of hours (in red) in the south orientation was much higher for the rough texture (RTB) (seven hours from 10:00 a.m.), followed by the smooth texture (STB) with a mean of five hours, then the other two types of texture (four hours). The hottest hours were recorded between 10:00 a.m. and 4:00 p.m. The rough texture (RTB) always marked the highest number of hot hours.

Table 1. External surface temperature for the listed orientations (North, East, South, West).

North				East					
Hours	(STB)	(RTB)	(CTB)	(BTB)	Hours	(STB)	(RTB)	(CTB)	(BTB)
8	25.7	25.8	25.4	23.6	8	40	48	36.9	38.7
9	29.9	32	29.6	27.8	9	46.7	57.2	43.4	47.4
10	33.8	39.9	33.6	36.5	10	52.3	61.9	47.9	53.5
11	38.4	40.9	38.3	37.4	11	52	58.9	50.3	53.6
12	48	49.4	45.2	46.2	12	54.5	58.2	55.3	56.4
13	52.8	54.5	48.1	47.4	13	57.9	58.4	52.1	55.8
14	58.7	59.3	52.2	51	14	58.6	60.7	53.1	52.3
15	51.6	53.3	50	48.1	15	50.2	53.3	48.8	48
16	49.4	51.2	49.1	49.2	16	47.8	48.3	47	46
17	46	48	44	44.4	17	48	44	44	42.3
18	44.4	46.4	42.7	42.1	18	43.1	42.2	41.5	39.1
South				West					
Hours	(STB)	(RTB)	(CTB)	(BTB)	Hours	(STB)	(RTB)	(CTB)	(BTB)
8	26.6	26.1	22.5	23.1	8	25.5	28.8	23.5	24.5
9	33.8	38.2	28.5	30.1	9	29.8	32.1	27.1	30.4
10	41.5	50.1	39.8	37.9	10	35.6	40.8	33.5	36.9
11	45.1	52	41.8	41.5	11	40.2	40.3	36.7	41
12	54.7	58.5	53.9	52.6	12	44.6	49.5	50.5	47
13	57.1	61.2	51.7	55.4	13	54.1	58.2	49.7	55.4
14	60.9	64.3	55.9	59.9	14	64.1	68.8	57.2	60.3
15	51.2	53.7	50	49.7	15	60	66.1	57.5	58.8
16	50.1	51.2	47.3	49.1	16	59.1	62	57.1	59.3
17	45	46	42	44.1	17	55.7	57	50	52
18	42.3	45.5	40	41.5	18	50	52	48.2	48.5
EST	Slightly warm		Warm		Hot		Very hot		

Figure 13 represents a grouped histogram of the change in the SF of the southern facade in the four types of texture from 8:00 a.m. to 6:00 p.m.:

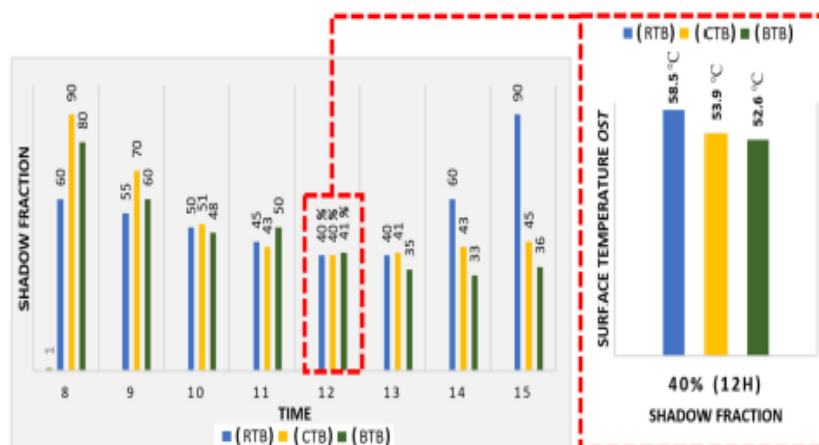


Figure 13. External surface temperature at midday compared to SF percentage (south orientation).

Based on Figure 13, we noticed that, at midday, the percentage of SF on the south wall was the same (around 40%) for the three textures RTB, CTB, and BTB. By comparing the results of external surface temperature (EST) recorded at midday, we found that these values are of the order of 52.6 °C for the blade texture (BTB), 53.9 °C for the crystal texture (CTB), and 58.5 °C for rough texture (RTB), although all textures had the same percentage of SF. This can be explained by the fact that the rough texture (RTB) presented small spots of shadows not exceeding 1 cm² and with random positions, which favored small reflections and absorption of solar radiation, unlike crystal (CTB) and blade (BTB) textures, which featured larger, more authentic shaded surfaces acting as small canopies that protected the wall itself.

The analysis and the comparison of the four textures are shown in Figure 14. The comparison of diagrams between each type of texture with the different orientations investigated (North, East, South, and West) will clarify and solidify the obtained results. The obtained results confirmed that the coating texture affected the external surface temperature, which in turn, plays an important role in improving building environments and reducing energy consumption.

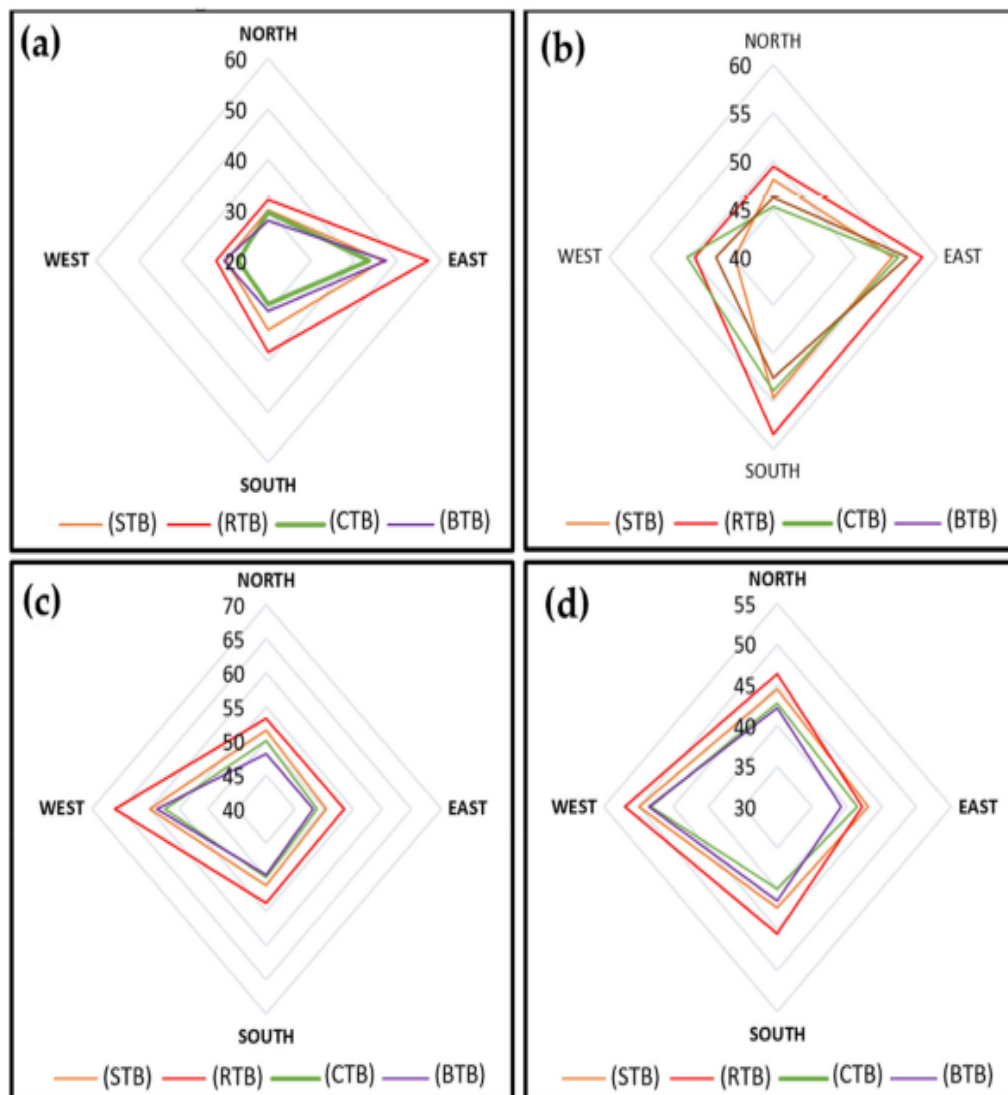


Figure 14. External surface temperature for all textures and orientations. (a: 9:00 a.m.)—(b: Midday.)—(c: 3:00 p.m.)—(d: 6:00 p.m.)

3.2. Effect of Texture Particles on Surface Temperature

The results showed that the rough texture recorded the most critical results for the external surface temperature. As this texture is used for most building coating textures in Algeria, the improvement of its thermal behavior will be essential by adding new components favorable for the harsh climate of the region. This method was done by using natural aggregates, such as palm particles, to optimize the thermal efficiency of this texture. Figure 15 shows the external surface temperature (EST) obtained after adding the palm particles with different percentages to the rough wall texture.

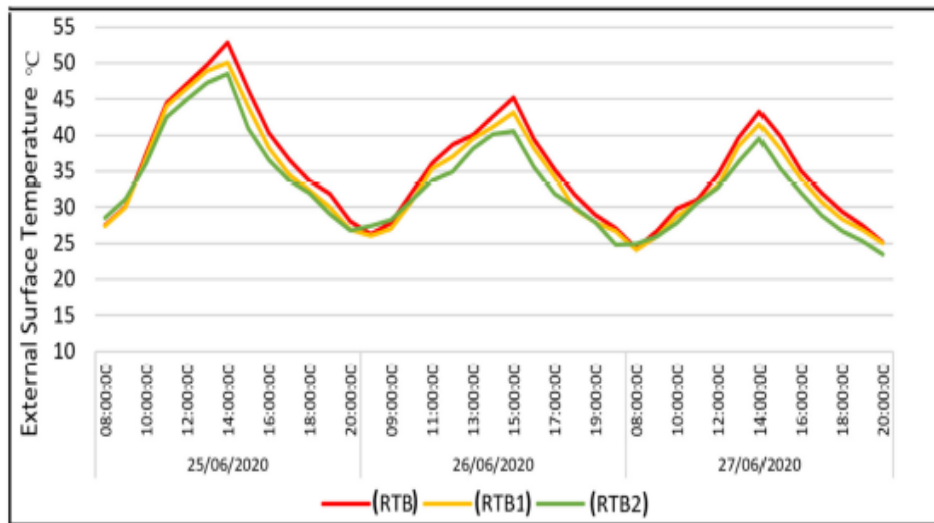


Figure 15. External surface temperature of rough textures made up of palm particles with different concentrations of aggregates.

The palm particle aggregate was added respecting different percentage, as explained in the Methodology section [16,17], starting with RTB of 100% sand aggregate, RTB1 of 30% palm particles and 70% sand aggregate, and finally, RTB2 of 70% palm particles and 30% sand aggregates, respectively.

Based on this diagram, we noticed that the highest external surface temperatures (EST) were recorded at the RTB reference coating level between 2:00 p.m. and 3:00 p.m., of which we note that the most critical value was recorded during the day of June 25: (EST) = 52.8 °C with a difference of 2.7 °C compared to RTB1 and 4.3 °C compared to RTB2.

These results prove that the use of palm particles in several densities can significantly reduce the external surface temperature (EST) at the level of the rough texture, of which we noticed a difference of EST up to 4.3 °C.

4. Conclusions

Natural cooling can be achieved by several strategies; in summer, shading is the most effective method to cool a building and reduces the cooling load in buildings. This study evaluated the effect of the wall texture coating in order to block the sun before it can get into the building, minimizing the short-wave solar radiation to decrease wall surface temperature. The experimental results report that there is a correlation between the texture geometry, the projected shadow percentage, and the surface temperature of the wall. The direct radiation has a big influence on surface temperature and conducts more heat to the building interior. This is well represented by rough texture, where the percentage of shading was lower and the surface temperature marked the highest values for the four studied orientations. However, crystal texture marked higher shading percentage and lower surface temperature, followed by the blade texture. The values of the wall surface temperature showed a considerable decrease after increasing the shading fraction, which caused a difference up to (5.4 °C) between the crystalline texture and the reference texture

(smooth), and also had a difference of up to (9.5 °C) between the crystalline texture and the rough texture. Accordingly, the increase in the percentage of shading by the coating texture design can promote better results in lowering surface temperature; which has an impact in reducing the cooling requirements and increasing the thermal performance of the building.

For improving the studied walls efficiency and further reducing the cooling demand, the use of natural aggregates, such as palm particles with different concentrations, could provide significant advantages over sand aggregates used in the development of exterior coatings. The results showed that the use of palm particles as an exterior coating led to a surface temperature difference of up to (4.3 °C) compared to the reference texture. Therefore, using the right concentration of palm particles allows better surface temperature results in case they are mixed with adjuvants to avoid deterioration caused by weather conditions.

The future development of this experimental study is to establish further work that could include numerical simulations to assess the effect of exterior cladding texture on the thermal performance of walls. This survey opens up other research for different climatic zones of Algeria and other countries.

The present work falls within the framework of the preservation and enhancement of the building heritage in southern Algeria in order to contribute to the sustainable development of these regions characterized by a hot and arid climate.

Author Contributions: Conceptualization, I.B.; methodology, I.B. and F.B.; validation, I.B. and F.B.; formal analysis, I.B. and F.B.; investigation, I.B.; resources, I.B.; data curation, F.B.; writing—original draft preparation, I.B. and F.B.; writing—review and editing, I.B. and F.B.; visualization, I.B.; supervision, F.B.; project administration, I.B.; funding acquisition, F.B. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Data are contained within the article. They are also available on request from the main and the corresponding authors.

Acknowledgments: We would like to acknowledge the Bioclimatic Architecture and Environment laboratory (ABE) at the University of Constantine 3, Algeria for the use of the equipment in this research and valuable support during the experiments. We would like also to acknowledge the Sustainable Building Design (SBD) Laboratory at the University of Liege for the use of the equipment in this research and valuable support during the experiments and data analysis. The authors would also like to thank the University of Constantine 3, Algeria and the Liege University, Belgium for their assistance in administrative procedures.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the study's design; in the collection, analysis, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

Nomenclature

STB	Smooth texture box
RTB	Rough texture box
CTB	Crystal texture box
BTB	Blade texture box
RTB1	Rough texture box with 30% palm particles
RTB2	Rough texture box with 70% palm particles
AT	Air temperature (°C)
EST	External surface temperature (°C)
IST	Internal surface temperature (°C)
SR	Solar radiation (W/m ²)
SF	Shadow fraction
R	Correlation coefficient



Nom et Prénom : Islam BOUKHELKHAL
Titre : Texture de l'enveloppe et son influence sur la performance
énergétique du bâtiment dans le climat chaud et aride.
Thèse en vue de l'Obtention du Diplôme de Doctorat en
Sciences en Architecture, en Architecture Bioclimatique et environnement

Résumé

La présente recherche aborde la question de l'efficacité de la texture des revêtements extérieurs dans le bâtiment en tant que procédé de rafraîchissement passif sous un climat chaud et aride. Elle vise l'évaluation des performances thermiques et énergétiques des façades avec différentes textures de revêtements extérieurs par le biais de l'étude expérimentale. Les différents modèles choisis de texture sont inspirés de l'architecture traditionnelle dans le grand Sud de l'Algérie, qui présente une identité architecturale pour chaque région. Les modèles choisis sont considérés comme l'une des solutions les plus utiles pour le refroidissement des bâtiments en été, et constituent aussi une alternative au refroidissement passif dans les régions du Sud de l'Algérie.

Pour cela, ce travail a été basé sur deux volets expérimentaux. Premièrement, des mesures in-situ en compagnie d'une étude de la température de surface, en utilisant l'imagerie thermique, afin d'évaluer le comportement thermique de la texture de l'enveloppe extérieure. Cette phase est complétée par une approche similaire, en explorant l'effet de trois types de particules ayant le même aspect mais avec des caractéristiques thermiques différentes. Par conséquent, l'intégration des particules de palmier dans les façades texturées, peut contribuer à la diminution de la température surfacique extérieure. Ce travail a été poursuivi par l'exploration de l'effet des textures évaluées dans l'étude expérimentale initiale, sur le confort thermique intérieur et le transfert de chaleur par le moyen des chambres expérimentales. Cette deuxième phase de l'étude expérimentale vise à étudier l'effet des textures déjà testées dans la première phase expérimentale au moyen de standards internationaux.

Les résultats indiquent une crédibilité et une relation significative entre la géométrie de la texture, le pourcentage d'ombre projetée, la température de surface extérieure, le transfert de chaleur à travers l'enveloppe texturée et le confort thermique intérieur. Les résultats expérimentaux ont révélé que l'adoption de la texture du revêtement extérieur dans la façade, à travers ses variables, est capable de limiter les surchauffes, réduire les gains de chaleur et la température surfacique extérieure. Elle peut donc avoir un effet thermique positif pour les bâtiments sous climat chaud et aride durant la période estivale. A travers l'évaluation de la résistance thermique et la température opérative, les résultats ont indiqué une corrélation entre la texture, la température surfacique extérieur, la température opérative et la résistance thermique de la paroi. Ce qui prouve et met en évidence l'évaluation proposée par la norme internationale ISO 9869- :2014 sur la texture de l'enveloppe extérieur.

Cette étude fournit une feuille de route et permet d'établir des lignes directrices et des recommandations sur la texture du revêtement extérieur, qui s'avère l'une des solutions les plus utiles, en intégrant la notion d'efficacité énergétique dans la conception des enveloppes extérieures des bâtiments. La synthèse de cette étude pourrait être utilisée par les architectes, les constructeurs et les concepteurs.

Mots clés : Texture du revêtement ; Température de surface ; Radiation solaire ; Ombre ; Particules de palmier ; Confort thermique ; Norme ISO 9869- 2014.

Directeur de thèse : Fatiha BOURBIA – Université Constantine 3

Année Universitaire : 2021-2022

