

Université Mohamed Boudiaf - M'sila
Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique



Numéro de série.....

Numéro d'inscription.....

Thèse

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT LMD

Filière : Génie mécanique.

Spécialité : Energétique.

THÈME

Étude des propriétés thermiques et mécaniques des
matériaux de construction.

Présenté par

Chouidira Mohamed.

Soutenue le : 04 / 10 / 2024

Devant le jury composé de :

<u>Nom & Prénom</u>	<u>Grade</u>	<u>Établissement</u>	<u>Qualité</u>
Younes Benarioua	Professeur	Univ. de M'sila	Président
Ihaddadene Nabila	Professeur	Univ. de M'sila	Encadreur
Hauari Zeggane	MCB	Univ. de M'sila	Co-Encadreur
Guerirra Belhi	Professeur	Univ. de Biskra	Examineur
Ghemari Zine	Professeur	Univ. de M'sila	Examineur

Année Universitaire : 2023/2024 .

REMERCIEMENTS

Bien qu'il s'agisse de l'une des premières pages de ce manuscrit de thèse, c'est aussi la dernière page que j'ai rédigée. C'est à ce moment que je me suis rendue compte que cette aventure ardue était terminée.

Enfin, j'ai simplement souhaité remercier tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la concrétisation de ce travail.

J'exprime mes sincères remerciements à mon directeur de thèse, le professeur

IHADDADENE NABILA.

Je tiens également à remercier les membres du jury d'avoir accepté d'être les examinateurs de ce travail, en espérant que je pourrai tirer profit de leurs remarques, conseils et orientations pour la continuité de ma recherche.

*J'adresse mes remerciements à tout le personnel du laboratoire **D'USINE DE LA CIMENTERIE LAFARGE** de **HAMAM DALA**, qui a mis à notre disposition tout le matériel nécessaire.*

Enfin, et surtout, je tiens à remercier ma famille et mes amis pour m'avoir soutenue tout au long de mon travail.

Et à tous ceux qui m'ont aidée à élaborer ce travail, pour leurs soutiens et leurs encouragements.

Résumé

Le secteur de la construction est un contributeur majeur au réchauffement climatique en raison de sa forte consommation énergétique et de l'épuisement des ressources naturelles. Cette étude vise à améliorer la performance environnementale des bâtiments en analysant les propriétés thermiques et mécaniques des matériaux de construction traditionnels et modernes tels que l'argile, la pierre et la brique.

Des tests en laboratoire et sur le terrain ont été réalisés pour évaluer ces matériaux. Les résultats ont permis de classer les matériaux en fonction de leurs performances thermiques et mécaniques. Parallèlement, de nouveaux dispositifs et logiciels ont été développés pour améliorer l'efficacité de l'étude et ont fait l'objet de demandes de brevet.

L'étude démontre la possibilité de réduire l'empreinte carbone du secteur de la construction grâce à un choix judicieux des matériaux. Les innovations proposées offrent des solutions concrètes pour construire des bâtiments plus durables et moins énergivores.

Cette étude contribue grandement à la transition vers un secteur de la construction plus respectueux de l'environnement. Elle souligne l'importance d'évaluer les matériaux de construction de manière approfondie pour sélectionner ceux qui offrent les meilleures performances thermiques et environnementales.

The construction sector is a major contributor to global warming due to its high energy consumption and the depletion of natural resources. This study aims to improve the environmental performance of buildings by analyzing the thermal and mechanical properties of both traditional and modern construction materials such as clay, stone, and brick.

Laboratory and field tests were conducted to evaluate these materials. The results allowed for the classification of materials based on their thermal and mechanical performance. In parallel, new devices and software have been developed to improve efficiency, and patents have been filed for these innovations.

The study shows the potential for reducing the carbon footprint of the construction sector through the careful selection of materials. The innovations presented offer practical solutions for constructing more sustainable and energy-efficient buildings.

This research makes a significant contribution to the transition to a more environmentally-friendly construction sector. It underscores the importance of thoroughly evaluating building materials in order to select those that offer the best thermal and environmental performance. .

قطاع البناء هو مساهم رئيسي في الاحتباس الحراري بسبب استهلاكه العالي للطاقة واستنزاف الموارد الطبيعية. تهدف هذه الدراسة، إلى تحسين الأداء البيئي للمباني من خلال تحليل الخصائص الحرارية والميكانيكية للمواد التقليدية والحديثة المستخدمة في البناء مثل الطين والحجر والطوب.

تم إجراء اختبارات في المختبر وفي الميدان لتقييم هذه المواد. وقد سمحت النتائج بتصنيف المواد وفقاً لأدائها الحراري والميكانيكي. بالتوازي مع ذلك، تم تطوير أجهزة وبرامج جديدة لتحسين كفاءة الدراسة وتم تقديمها للحصول على براءات اختراع.

تُظهر الدراسة إمكانية تقليل البصمة الكربونية لقطاع البناء من خلال اختيار المواد المناسبة. وتقدم الابتكارات المطروحة حلاً عملياً لعملية لبناء مباني أكثر استدامة وأقل استهلاكاً للطاقة.

تساهم هذه الدراسة بشكل كبير في الانتقال إلى قطاع بناء أكثر احتراماً للبيئة. وتؤكد على أهمية تقييم مواد البناء بشكل عميق لاختيار تلك التي توفر أفضل أداء حراري وبيئي.

Table des matières

Introduction générale.....	1
I. CHAPITRE I : TRANSITION ENERGETIQUE DANS LE SECTEUR DU BATIMENT EN ALGERIE, ANALYSE DES DYNAMIQUES DE CONSOMMATION, DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION ET DES POLITIQUES PUBLIQUES.	
Dynamiques de consommation énergétique, perspectives d'évolution et politiques publiques.....	3
I.1.1. Introduction	3
I.1.2. Importance du secteur énergétique dans l'économie algérienne.....	3
I-1-3). L'énergie, moteur vital de l'économie algérienne	4
I-1-4). Analyse de la consommation énergétique en Algérie.....	5
I-1-5). Évolution de la consommation énergétique	5
I-1-6). Perspectives d'évolution de la consommation énergétique en Algérie	6
I-1-7). Bilan énergétique et comparaison internationale.....	7
I-1-8). Facteurs influençant la consommation énergétique en Algérie	7
I-1-9). Consommation énergétique dans le secteur résidentiel	8
I-1-10). Analyse des types d'habitations et des modes de vie en Algérie.....	8
I-1-11). Caractéristiques des bâtiments résidentiels en termes d'efficacité énergétique	9
I-1-12). Bilan des consommations énergétiques dans le secteur résidentiel	9
I-1-13). Politique énergétique algérienne	9
I-1-14). Plans d'action et programmes mis en place	11
I-1-15). Solutions et innovations pour l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments.....	11
I-1-16). Réglementation thermique Algérienne	11
I-1-17). Mise en application de la réglementation thermique des bâtiments.....	11
I-1-18). Rôle des différents acteurs impliqués.....	12
I-1-19). Évaluation de l'efficacité des politiques mises en place	12
I-1-20). Projets pilotes	12
I-1-21). Défis et perspectives.....	12
Conclusion.....	13
I-2-Propriétés, empreinte environnementale et performance énergétique des matériaux de construction en Algérie	
I-2-1). Introduction	14
I-2-2). Matériaux de construction utilisés dans l'Antiquité en Algérie	14
I-2-3). Propriétés, avantages et inconvénients des matériaux de construction utilisés dans l'Antiquité en Algérie	
I-2-4). L'empreinte énergétique et environnementale des matériaux de construction dans l'Antiquité	17
I-2-5). Pollution et gaz à effet de serre	18
I-2-6). Construction en brique cuite et parpaing en Algérie	18
I-2-7). Comparaison de la consommation énergétique en brique cuite et en parpaing.....	20
I-2-8). Caractéristiques mécaniques des matériaux de construction	20

I-2-9). Applications	22
I-2-10). Études faites sur la détermination des propriétés mécaniques des matériaux de construction	22
I-2-11). caractéristiques thermique des matériaux et leurs impact sur la consommation énergétique des bâtiments	25
1-2-12. Etudes faites sur la détermination des propriétés thermiques des matériaux de construction	29
conclusion.....	31

CHAPITRE II : APPROCHE METHODOLOGIQUE ET PROTOCOLE EXPERIMENTAL

II-1) Introduction.....	32
II-2) Ddispositifs expérimental	33
II-3) Procédure expérimentale	34
II-4) Analyses statistiques	35
II-5) Comportement thermique estival des parois d'une chambre orientées vers les principaux points cardinaux	35
II-5.1) Chambre et murs.....	36
II-5.2) Système d'acquisition numérique (DMST1.0)	36
II-5.3). Procédure expérimentale	37
II-5.4) Effet de la trajectoire de la position du soleil	37
II-6). Effet des matériaux de construction sur l'évolution de la température intérieure.....	39
II-6-1). Pièces (chambres).....	39
II-7). Etude de caractéristique thermique et mécanique d'autre matériaux de construction (qu'on a pu assurer)	40
II-7-1). Extraction de matière primaire.....	40
II-7-2). Outillage d'étude.....	42
II-8). Analyses chimiques	45
II-8-1). Préparation des pastilles	45
II-8-2). l'analyse chimique	45
II-8-2-a). Description de l'appareil	46
II-9). Calcule de la chaleur spécifique des échantillon (pierres et argiles).....	47
II-9-1). Equipment utilisé	47
II-9-2). Mesure de la chaleur spécifique des argiles.....	48
II-9-2). Pour la mesure de chaleur spécifique des pierres.....	48
II-10). Etude des caractéristiques thermiques des matériaux.....	48
II-11). Étape de l'étude	49
Conclusion.....	50

CHAPITRE III : DEVELOPPEMENT D'OUTILS DE CARACTERISATIONS EXPERIMENTALES.

III-1). Principes, outils et applications de la thermométrie	51
Introduction.....	51
III-2). Rappels sur les principaux concepts de la température	51
III-3). Mesure de la température	51
III-4). Mesure de la conductivité thermique	52
III-4-1). Différentes techniques et appareils existent pour mesurer la conductivité thermique	52
III-2-1). le DMST 1.0	55
III-2-3)..Smart DMST 1.0.....	55
III-2-4). Fiabilité de l'appareil	56
III-2-5). Caractéristique de DMST 1.0	57
III-2-6). Domaine d'application.....	57
III-2-7). Présentation de la surface inélégante	57
III-2-8). caractéristiques de l'interface	58
CONCLUSION	69

CHAPITRE IV : AUTRES APPAREIL DEVELOPPER AU COURS DE CETTE THESE.

IV-1). Dispositif d'études des caractéristiques thermique.....	70
IV-2). Outil polyvalent pour le suivi, l'affichage et le calcul des valeurs physiques dans divers contextes expérimentaux (eddis1.0)	73
Conclusion	75

CHAPITRE V :RESULTATS ET DISCUSSION

Introduction	76
V-1) Analyse de la résistance à la compression et à la flexion	78
V-2) Analyse de la composition chimique	79
V-2 -1). Impact de la composition chimique sur les propriétés thermiques et mécaniques des argiles jaune , argile de gabouhiya et argile de zirarka	81
V-2-2). Analyse de la composition chimique Les deux type de pierre (pierre eddis, pierre alig).....	84
V-2-3). Impact de la composition chimique sur les propriétés thermiques et mécaniques des pierres de l'alig et pierre d'eddis.....	85
V-2 -4).Analyse de la composition chimique des parpaing et brique rouge	86
V-3). Analyse du comportement thermique des matériaux testés.....	87
V-3-1) . Comportement thermique au chauffage.....	89
V-3-2).Comportement thermique au refroidissement.....	94

V-4). Impact du matériau de construction sur l'évolution de la température intérieure	99
V-5). L'effet de l'orientation sur la température des parois Etude expérimentale	107
V-5-1) . Présentation et analyse des résultats expérimentales.....	108
V-6).Présentation et analyse des résultats d'une étude de l'effet de la direction et de l'inclinaison de la surface sur la quantité de rayonnement solaire incident	124
V-6-1). L'effet de l'orientation des surfaces exposées au soleil sur le rayonnement solaire incident	123
V-6-2) . Effet de l'inclinaison sur l'irradiation solaire incidente	130
Conclusion.....	136
Conclusions générales.....	138
Annex 1.....	140
Annex 2.....	142
Annex 3.....	143.

LISTES DES FIGURES

Figure 1: construction en pierre.....	14
Figure 2: construction en terre.....	14
Figure 3: toiture en bois (maison ancien)	15
Figure 4:(A): gypse (B): chaux.....	15
Figure 5: construction en brique cuite	17
Figure6: parpaing.....	18
Figure7: Un changeur d'inclinaison, (rapporteur).....	31
Figure 8 :Capteur solaire ET 200 et le solarimètre	32
Figure 9: montage expérimental	33
Figure 10 : Chambre creuse en brique rouge.....	34
Figure 11: Système d'acquisition numérique utilisé (DMST1.0).....	34
Figure 12 : Chambre construite dans son environnement de test.	35
Figure 13: Trajectoire du soleil.....	36
Figure 14: Comparaison entre les lectures du mini thermomètre numérique Tihebeyan et celles de notre système d'acquisition de la température de l'air.....	36
Figure 15: Mini thermomètre numérique Tihebeyan.....	37
Figure 16: Quatre chambres différentes faites de laine de mouton (1) (tente), de brique ordinaire (2), de brique de terre (3) et de calcaire (4).....	37
Figure 17 : Zones d'où les matières premières ont été extraites	39
Figure 18: Lieux d'une ancienne maison d'extraction de certains matériaux argiles.....	39
Figure 19: Echantillons préparés par : Argiles pierres	40
Figure 20: Le moule en bois utilisé pour fabriquer les échantillons.....	40
Figure 21: Machine pour les essais de flexion.....	41
Figure22 : Machine de compression et flexion.....	41
Figure 23: Machine des essais de compression.	41
Figure24: Disque mile.	42
Figure 25 : broyeur a disque vibrant.....	42
Figure 26 : Exemple d'échantillons après broyage.....	43
Figure 27: Presse manuelle de pastilles.	43
Figure 28: Mise en Forme des pastilles	43
Figure29: Sifflage et traitement de surface des pastilles.	43
Figure 30: Appareil de fluorescence des rayons X S8 disponible au laboratoire d'analyse de LAFARGE	44
Figure 31: emplacement des pastilles au niveaux de x ray fluorescence s8.	44
Figure 32: Affichage des résultats sur le S8.....	45
Figure33 : Principe de mesure Ohmétrique de la résistance d'une solution.....	45

Figure 34 : mesure de T_i de chaque échantillant (pierres et argiles).....	46
Figure 35 : suivie de développement de T° de chaque échantillant dans un système isolé.....	46
Figure 36: DMST1.0.....	54
Figure 37 : smart DMST1.0 (interface de logiciel).....	54
Figure 38: test de fiabilité.....	55
Figure 39 : Première fenêtre de travail de l'interface développée.....	56
Figure 40 :Premiers résultats des données traitées par l'interface développée	57
Figure 41 : Sélection du paramètre d'étude à analyser.....	57
Figure 42 : Résultats de l'analyse des données de T_{max} pour le 18 juillet sur toute la journée	58
Figure 43 : Résultats de l'analyse des données temporelles de T_{max} pour le 18 juillet sur toute la journée	58
Figure 44: Résultats de l'analyse des données de T_{min} pour le 30 août.....	59
Figure 45 : Résultats de l'analyse des données temporelles de T_{min} pour le 30 août sur toute la journée	59
Figure 46 : Résultats de l'analyse des données de $T_{avg.}$ pour la matinée du 23 juin.	60
Figure 47 : Résultats de l'analyse des données de $(T_{max}-T_{min})$ dans la nuit du 23 juin.....	61
Figure 48: Résultats de l'analyse des données de $(T_{max}-T_{avg.})$ pour la matinée du 23 juin	62
Figure 49 :Résultats de l'analyse des données de l'écart type pour toute la journée du 11 septembre.....	63
Figure 50 : Résultats de l'analyse du profil de courbe pour toute la journée du 11 septembre.....	63
Figure 51: Échange thermique entre l'espace intérieur de la chambre et les surfaces extérieures	65
de ses murs pendant les jours et les nuits d'été.....	65
Figure 52 : Échange thermique matinal entre l'espace intérieur de la chambre et les surfaces extérieures de ses parois pendant l'été	66
Figure 53 : Échange thermique l'après-midi entre l'espace intérieur de la chambre et les surfaces extérieures de ses parois pendant l'été.....	67
Figure 54 :Dispositif de détermination des propriétés thermiques des matériaux de construction (Conductivité thermique, diffusivité thermique, capacité thermique).....	69
Figure 55 :EDDIS 1.0.....	72
Figure 56 : Evolution de la Température des 04 échantillons pendant les phases de chauffage et de refroidissement.	88
Figure 57 : Évolution de la température moyenne des surfaces exposées au rayonnement de la lampe pour les quatre matériaux testés.....	89
Figure 58 : Taux de variation de la température de la face exposée au rayonnement de la lampe des quatre matériaux testés.....	90
Figure 59 : Taux de variation de la température de la face exposée au rayonnement des quatre matériaux testés.....	92

Figure 60: Variation de l'écart de température et de la résistance thermique des briques composées des matériaux testés dans leurs dimensions réelles.....	93
Figure 61 : Evolution de la température des faces extrêmes des briques des matériaux testés après l'extinction de la lampe	94
Figure 62 : Évolution de la température des faces des quatre briques exposées directement à la lampe après son extinction.....	96
Figure 63 : Évolution de la température des faces non exposées à la lampe des quatre briques après son extinction.....	97
Figure 64: Evolution de la température intérieure d'une tente et d'une chambre ordinaire en brique, ainsi que l'évolution de la température extérieure au cours d'une journée (24 heures)	101
Figure 65: Une tente saharienne traditionnelle.....	103
Figure 66 : Evolution de la température intérieure des chambres en pierre calcaire et en briques ordinaires, ainsi que évolution de la température extérieure sur une journée (24 heures).....	103
Figure 67 : Applications actuelles et historiques du calcaire dans le secteur de la construction.....	104
Figure 68 : Évolution de la température intérieure des chambres en briques de terre et en briques ordinaires, ainsi que évolution de la température extérieure sur une journée (24 heures).....	105
Figure 69 : Évolution de la température le 23 juin 2020 au milieu des faces extérieures des parois de la chambre orientées dans les quatre directions principales.....	109
Figure 70 : Température intérieure moyenne de la chambre, ainsi que température moyenne de ses quatre surfaces extérieures pendant la journée, la nuit et toute la journée du 23 juin 2020.....	110
Figure 71 : Direction du transfert de chaleur à travers l'enveloppe de la chambre le 23 juin 2020.....	111
Figure 72 : Évolution de la température le 18 juillet 2020 au milieu des faces extérieures des parois de la chambre orientées dans les quatre directions principales	112
Figure 73 : Température intérieure moyenne de la chambre, ainsi que température moyenne de ses quatre surfaces extérieures pendant la journée, la nuit et toute la journée du 18 juillet 2020.....	113
Figure 74 : Direction du transfert de chaleur à travers l'enveloppe de la chambre le 18 juillet 2020.....	114
Figure 75 : Évolution de la température au 30 août 2020 au milieu des faces extérieures des parois de la chambre orientées dans les quatre directions principales.	115
Figure 76 : Température intérieure moyenne de la chambre, ainsi que température moyenne de ses quatre surfaces extérieures pendant la journée, la nuit et toute la journée du 30 août 2020	116
Figure 77 : Direction du transfert de chaleur à travers l'enveloppe de la chambre le 30 août 2020.....	117

Figure 78 : Évolution de la température le 11 septembre 2020 au milieu des faces extérieures des parois de la chambre orientées dans les quatre directions principales.....	118
Figure 79 : Température intérieure moyenne de la chambre, ainsi que température moyenne de ses quatre surfaces extérieures pendant la journée, la nuit et toute la journée du 11 Septembre 2020.....	119
Figure 80 : Direction du transfert de chaleur à travers l’enveloppe de la chambre le 11 septembre 2020.....	120
Figure 81 : Maisons en brique en Algérie.....	121
Figure 82 : Irradiation solaire incidente sur une surface inclinée à 40° dirigée vers quatre points cardinaux au cours des cinq jours d'étude.....	126
Figure 83 : Effet de l'élévation du soleil dans le ciel sur l'énergie solaire interceptée pour différentes orientations et angles d'inclinaison.....	129
Figure 84. Effet de l'orientation et de l'inclinaison de la surface sur l'énergie solaire incidente rayonnement de l'air de février à juin.	131
Figure 85 : Effet de l'angle d'inclinaison sur l'irradiation solaire incidente pour les quatre orientations principales (Est, Ouest, Nord et Sud)	133
Figure 86 : profile de variation de température au milieux de quatre thermos (système fermé isolé thermiquement) des quatre argiles durant 1 h d'expérience	140
Figure 87 : photo réel de site d'expérience	143
Figure 89 : profile de température obtenue a une maison ancienne a Maarif de 00:00 le 27- jus qu'a 00:00 le 28se 2023	143
Figure 90 : Un exemple d'utilisation de DMST 1.0 pendant six jours consécutifs.....	144

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

mégatonne équivalent pétrole		MTep
A	surface de l'échantillon exposée	m ²
Q	Quantité de chaleur	J
t	Temps	S
RTH	Résistance thermique	m ² ·K·W ⁻¹
e	Épaisseur	m
S	Surface	m ²
T	Température	°C
α	Diffusivité thermique	m ² .s ⁻¹
ρ	Densité	Kg/m ³
λ	Conductivité thermique	W m ⁻¹ K ⁻¹
σ	Contrainte en traction	MPa
F	Force appliquée	N
A	Surface de section	mm ²
Rt	Résistance à la traction	MPa
σ_{max}	Contrainte maximale à la rupture	MPa
Rflex	résistance à la flexion	MPa
M	moment fléchissant	N.m
S	module de flexion	m ³
Rcis	résistance au cisaillement	MPa
Fc	force de cisaillement appliquée	N
A	surface sur laquelle la force est appliquée	m ²
P	charge appliquée	N
D	diamètre de la bille	mm
d	diamètre de l'empreinte	mm
d	profondeur de l'empreinte	mm
h	profondeur de l'empreinte après retrait de la charge	mm
a	profondeur de l'empreinte	mm
b	constante de l'appareil	

C	constante de l'appareil	
K_{IC}	ténacité à la rupture	MPa√m
σ_Y	limite d'élasticité	MPa
Q	quantité de chaleur transférée	J
A	surface du matériau	m ²
ΔT	la différence de température	K
d	l'épaisseur du matériau	m

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'évolution spectaculaire des technologies de pointe touchant le secteur énergétique impose la révision des politiques énergétiques au niveau mondial. Dans le secteur du bâtiment, la consommation énergétique est un facteur essentiel pour assurer un confort thermique, surtout durant les périodes critiques du climat, à la fois froid et chaud. Cette consommation doit être réduite et optimisée pour répondre aux contraintes des coûts des différentes applications. Parmi les possibilités de réduction de ces consommations, la révision des matériaux de construction et de leurs propriétés thermiques et mécaniques constitue un domaine d'étude très vaste, tant sur le plan scientifique et académique que sur les aspects écologiques et environnementaux. C'est pourquoi une réflexion a été menée pour entamer un travail complet visant à étudier les propriétés thermiques et mécaniques des matériaux de construction utilisés en Algérie.

Cette thèse vise à explorer et analyser ces aspects critiques du paysage énergétique algérien, en mettant l'accent sur l'étude des matériaux de construction et la détermination de leurs caractéristiques, qui constituent un facteur déterminant de la quantité d'énergie consommée. D'autre part, cette étude cherche à clarifier les différences entre ces matériaux et à les distinguer pour rationaliser l'énergie et parvenir à la durabilité.

L'Algérie, en tant que pays riche en ressources énergétiques renouvelables et fossiles, est confrontée à des défis socio-économiques et à une pression croissante de la demande locale, exigeant de plus en plus de confort et donc une consommation énergétique plus importante. Dans ce contexte, la politique énergétique, basée sur l'optimisation et la rationalisation, joue un rôle central dans la création de cadres réglementaires et d'incitations visant à promouvoir une utilisation plus efficace et plus durable de l'énergie.

La consommation d'énergie dans le secteur résidentiel représente une part importante de la consommation totale d'énergie en Algérie, et surtout, elle connaît une forte croissance, en raison de la forte demande de grandes structures résidentielles sous différentes formes. Comprendre les tendances de cette consommation, les facteurs qui l'influencent et les possibilités d'amélioration est essentiel pour développer des politiques énergétiques efficaces et promouvoir des pratiques de construction plus durables.

La réduction de la consommation énergétique est fortement liée aux différents matériaux de construction utilisés dans les structures résidentielles. Les propriétés thermiques et mécaniques de ces matériaux déterminent non seulement l'efficacité énergétique des bâtiments, mais aussi leur durabilité et leur capacité à s'adapter aux conditions environnementales.

D'autre part, le secteur résidentiel, avec de fortes densités, induit des effets négatifs sur le réchauffement climatique à travers les émissions de gaz à effet de serre, en raison de la forte consommation de combustibles fossiles pour le chauffage, la climatisation et l'éclairage.

L'un des objectifs de cette thèse est indirectement de caractériser ces matériaux afin, entre autres, d'atténuer l'impact du secteur résidentiel sur le réchauffement climatique en Algérie, et éventuellement encourager l'intégration de solutions basées sur les énergies renouvelables.

De plus, cette thèse contribue au développement de certains dispositifs intelligents permettant la collecte de données structurées et réparties dans le temps et dans l'espace, afin d'étudier concrètement l'impact des solutions proposées sur la consommation globale.

Durant la réalisation de certaines parties de cette thèse, certaines études expérimentales ont été impossibles à réaliser dans les laboratoires universitaires et industriels en raison des restrictions imposées par le confinement dû au Covid-19. Cela nous a encouragés à développer des montages et des réalisations expérimentales à domicile, ce qui a engendré une consommation importante de temps et de frais.

Cette thèse est subdivisée en cinq chapitres :

Le premier chapitre est consacré à exposer certains éléments liés à la transition énergétique dans le secteur de la construction en Algérie. Il englobe principalement l'analyse de la dynamique de consommation et des matériaux de construction, tant traditionnels que modernes, utilisés et normalisés par les politiques publiques conventionnelles.

Dans le deuxième chapitre, on présente en détail l'approche méthodologique et le protocole expérimental utilisés pour la caractérisation thermique et mécanique de certains matériaux classiques employés dans la construction.

Le troisième chapitre est entièrement consacré à la présentation des outils de caractérisation thermique des matériaux à travers l'étude de la distribution temporelle et spatiale de la température, en surface et en volume. Les difficultés observées dans le manque de ces outils dans les laboratoires universitaires et industriels nous ont conduits à développer un équipement en deux versions. La première version est un appareil (dénommé DMST 1.0 et soumis au brevet en 2022) qui permet l'acquisition des températures sur huit capteurs (extensible à 50) et le stockage des données sur un support externe. Cet outil mobile et pratique peut effectuer de nombreuses caractérisations sur différents matériaux solides, liquides et gazeux. La deuxième version (dénommée SMART DMST 1.0) contient les mêmes outils que la première version et est accompagnée d'un logiciel dédié spécialement au traitement et à l'analyse des données enregistrées.

Le quatrième chapitre est consacré à l'exposé des autres développements d'outils expérimentaux réalisés intégralement grâce à nos efforts. Le premier permet le suivi en temps réel de la distribution de la température dans un échantillon, avec la possibilité d'afficher les mesures et surtout les courbes décrivant les caractéristiques thermiques telles que la résistance, la diffusivité, la conductivité et le point d'équilibre, etc. Le deuxième outil permet d'étudier les effets de certains paramètres environnementaux (température, ensoleillement, vent, humidité) sur les propriétés thermiques et mécaniques des matériaux.

Enfin, dans le cinquième chapitre, on expose les principaux résultats, interprétations et perspectives.

CHAPITRE I:

TRANSITION ÉNERGÉTIQUE DANS LE SECTEUR DU
BÂTIMENT EN ALGÉRIE : ANALYSE DES DYNAMIQUES DE
CONSOMMATION, DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION
ET DES POLITIQUES PUBLIQUES.

I. Dynamiques de consommation énergétique, perspectives d'évolution et politiques publiques

I.1.1. Introduction

Comme tout être vivant, l'homme dépend d'un environnement qui lui fournit les conditions nécessaires à sa survie, qu'il soit naturel ou artificiel. Cet environnement, qui se caractérise par un climat approprié, un accès à l'eau et à la nourriture, et une atmosphère favorable, est essentiel à la vie. Dans cet environnement, le bâtiment agit comme une extension de l'habitat, une construction humaine conçue pour faire face aux défis du monde extérieur et fournir un refuge sûr. Que ce soit pour se protéger des éléments, des prédateurs ou simplement pour créer un espace privé, le bâtiment répond à un besoin fondamental de sécurité et de confort. Ainsi, l'environnement habitable et le bâtiment sont deux éléments inséparables de la vie humaine. Tandis que l'environnement fournit les conditions de base pour la survie, le bâtiment les modifie et les renforce, offrant à l'homme un refuge et un espace propice à son développement. L'étude de ces deux concepts, de leur interdépendance et de leur impact sur le bien-être humain, est essentielle pour comprendre les enjeux de l'habitat et de l'aménagement du territoire, et pour construire un avenir durable et harmonieux entre l'homme et son environnement.

Le secteur résidentiel algérien joue un rôle important dans la consommation énergétique nationale, représentant environ 35 % de la consommation finale d'énergie. Cette part continue d'augmenter, alimentée par une croissance soutenue du parc immobilier et par l'équipement croissant des ménages en appareils électroménagers et en systèmes de chauffage et de climatisation.

I.1.2. Importance du secteur énergétique dans l'économie algérienne

Le secteur énergétique est un élément clé de l'économie algérienne, jouant un rôle crucial dans son développement et sa stabilité. Son importance se reflète à travers plusieurs aspects essentiels : Le secteur énergétique algérien est dominé par les énergies fossiles, avec 70 % de gaz naturel et 30 % de pétrole. Cependant, l'Algérie cherche à diversifier son mix énergétique avec une part importante d'énergies renouvelables. Actuellement, la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique est de 440 MW, principalement de l'énergie solaire, soit 2 % [1].

Le gouvernement algérien s'est engagé dans un programme de développement des énergies renouvelables pour la période 2015-2030, avec pour objectif une capacité installée de 22 000 MW d'origine renouvelable d'ici 2030. Cependant, les résultats actuels sont modestes : en 2021, l'énergie solaire ne représentait que 0,8 % de la production électrique du pays, et l'éolien seulement 0,01 % [2].

La diversification du bouquet énergétique constitue un pilier crucial de la transition énergétique en Algérie. Cela permettrait une meilleure gestion des ressources non renouvelables tout en maîtrisant la demande intérieure en énergie. Actuellement, la consommation d'énergie interne en Algérie atteint 42 %. Pour atteindre l'objectif de 10 % d'économie d'énergie d'ici 2021, le déploiement de 100 000 chauffe-eaux solaires est prévu, avec une économie potentielle allant jusqu'à 40 % de la consommation énergétique [3].

En bref, le secteur énergétique est un pilier fondamental de l'économie algérienne, et la transition vers les énergies renouvelables est un enjeu majeur pour le développement durable du pays. Son importance se manifeste sous plusieurs aspects principaux.

I.1.1.a) Contribution majeure au PIB et aux recettes fiscales

Les hydrocarbures, principalement le pétrole et le gaz naturel, représentent plus de 95 % des exportations algériennes, générant des recettes fiscales considérables pour l'État. En 2019, le secteur a contribué à environ 25 % du PIB du pays, soulignant sa position centrale dans la dynamique économique nationale.

I.1.1.b) Moteur de la création d'emplois et du développement des infrastructures

Le secteur énergétique emploie directement et indirectement des centaines de milliers de personnes, contribuant ainsi à réduire le chômage et à stimuler la croissance économique. Les revenus générés par le secteur ont permis de financer le développement d'infrastructures cruciales, telles que les routes, les ports, les aéroports et les centrales électriques.

I.1.1.c) Source de financement pour les programmes de développement social

Une partie des recettes provenant du secteur énergétique est allouée au financement de programmes de développement social, notamment dans les domaines de l'éducation, de la santé et du logement. Ces investissements sociaux contribuent à l'amélioration du bien-être de la population et à la réduction de la pauvreté.

I.1.1.d) Facteur clé de l'affirmation géopolitique de l'Algérie

Les ressources énergétiques abondantes de l'Algérie lui confèrent une position stratégique importante sur la scène internationale, lui permettant de jouer un rôle de premier plan dans la fourniture d'énergie aux pays voisins et européens. Cette influence géopolitique renforce la position de l'Algérie dans les négociations internationales et lui permet de défendre ses intérêts nationaux [5].

I-1-2-e). Pilier de la diversification économique et de la transition énergétique

Conscient de la dépendance de l'économie vis-à-vis des hydrocarbures, le gouvernement algérien s'engage résolument dans la diversification économique et la transition énergétique. Le développement des énergies renouvelables, l'efficacité énergétique et la promotion des industries non pétrolières sont des priorités majeures pour réduire la dépendance aux hydrocarbures et assurer une croissance économique durable.

I-1-3). L'énergie, moteur vital de l'économie algérienne

L'économie algérienne est intrinsèquement liée à son secteur énergétique, qui s'apparente à un pilier central de son développement. En effet, l'exploitation judicieuse des ressources en hydrocarbures, dont l'Algérie dispose de réserves conséquentes, représente environ 30 % du PIB et 95 % des recettes d'exportation du pays. Cette manne financière joue un rôle crucial dans le financement du développement

économique et social du pays, contribuant à la création d'emplois, à la réalisation d'infrastructures et à la satisfaction des besoins énergétiques de la population [6].

I-1-4). Analyse de la consommation énergétique en Algérie

De 2000 à 2019, la consommation énergétique finale en Algérie a connu une croissance fulgurante, passant de 17 à 32 millions de tonnes d'équivalent pétrole (tep), soit une hausse de près de 90 %. Le secteur résidentiel, premier consommateur d'électricité, a joué un rôle majeur dans cette augmentation, avec une consommation qui a doublé pour atteindre 11 millions de tep en 2019. Cette croissance s'explique par la conjonction de plusieurs facteurs, tels que l'augmentation de la population, l'amélioration du niveau de vie et l'adoption d'appareils électroménagers plus énergivores. Si l'intensité énergétique s'est stabilisée autour de 0,35 tep/1000 USD entre 2005 et 2019, la dépendance croissante vis-à-vis des importations d'hydrocarbures et la volatilité des prix de l'énergie font peser des défis majeurs sur l'économie algérienne. Face à ces enjeux, la mise en œuvre de politiques visant à promouvoir l'efficacité énergétique et à développer des sources d'énergie renouvelables apparaît comme une nécessité impérieuse pour assurer une transition énergétique durable [7]. La consommation d'énergie en Algérie présente une disparité notable entre les différents secteurs. En 2023, le secteur résidentiel se distinguait comme le principal consommateur d'énergie, absorbant 38 % de la consommation nationale. Le secteur industriel occupait la deuxième place avec 29 %, suivi du secteur des transports à 22 % et des autres secteurs cumulant 11 % [8].

I-1-5). Évolution de la consommation énergétique

L'Algérie a connu une explosion de sa consommation énergétique ces dernières années, atteignant 67,2 millions de tonnes équivalent pétrole (TEP) en 2022, soit une hausse de 35 % par rapport à 2012. Cette tendance haussière, alimentée par la croissance économique, l'augmentation de la population, l'urbanisation et les subventions aux énergies fossiles, expose le pays à une dépendance accrue aux hydrocarbures, à des impacts environnementaux croissants et à des défis de sécurité énergétique.

Face à cette situation, l'Algérie doit impérativement s'engager dans une transition énergétique durable. La promotion de l'efficacité énergétique, le développement des énergies renouvelables et la sensibilisation des citoyens aux enjeux de la consommation énergétique sont des actions clés pour réduire la dépendance aux hydrocarbures, atténuer l'impact environnemental et créer de nouvelles opportunités économiques. L'adoption d'une stratégie ambitieuse de transition énergétique permettra à l'Algérie de relever les défis actuels et de construire un avenir énergétique plus sûr, plus durable et plus prospère [9].

Cette tendance haussière s'explique par plusieurs facteurs, dont :

- La croissance économique a alimenté une demande croissante en énergie dans tous les secteurs, englobant le transport, l'industrie et le résidentiel.
- L'essor démographique a amplifié la demande énergétique, notamment pour l'éclairage, le chauffage et la climatisation, reflétant ainsi l'impact de l'augmentation de la population.
- L'urbanisation galopante, avec l'expansion des zones urbaines et l'essor des foyers, a également stimulé la consommation énergétique.

- Subventions aux énergies fossiles : Les prix subventionnés de l'électricité et du gaz naturel ont encouragé la consommation excessive d'énergie.

I-1-6). Perspectives d'évolution de la consommation énergétique en Algérie

L'Algérie se trouve face à un choix crucial concernant son avenir énergétique. La croissance démographique et le développement économique du pays font peser une pression croissante sur la demande d'énergie, tandis que la dépendance excessive aux hydrocarbures et les préoccupations environnementales appellent à une transition énergétique durable.

Plusieurs facteurs clés influenceront l'évolution de la consommation énergétique en Algérie [10, 11]:

I-1-6-a). Facteurs influençant la demande

- Croissance économique : L'expansion économique stimulera la demande d'énergie dans tous les secteurs, du transport à l'industrie en passant par le résidentiel.
- Développement démographique : L'augmentation de la population accroîtra la demande énergétique pour les besoins domestiques, comme l'éclairage, le chauffage et la climatisation.
- Urbanisation : L'expansion urbaine et la multiplication des foyers influenceront la consommation d'énergie liée aux bâtiments et aux services urbains.

I-1-6-b). Facteurs influençant l'offre

- Politique énergétique : Les orientations gouvernementales en matière d'énergies renouvelables, d'efficacité énergétique et de subventions aux énergies fossiles influenceront la trajectoire de la consommation et la diversification des sources d'énergie.
- Changement climatique : Les efforts pour atténuer le changement climatique et réduire les émissions de gaz à effet de serre influenceront les choix énergétiques, orientant le pays vers des sources d'énergie plus propres.

Quatre scénarios possibles se dessinent pour l'avenir énergétique de l'Algérie :

- **Scénario tendanciel** : La consommation d'énergie continue de croître sans changements majeurs dans les politiques ou les technologies, accentuant la dépendance aux hydrocarbures et les impacts environnementaux.
- **Scénario d'efficacité énergétique** : La mise en œuvre de politiques d'efficacité énergétique et de technologies économes en énergie permet de réduire la croissance de la consommation, limitant la pression sur les ressources et les émissions.
- **Scénario d'énergies renouvelables** : Le développement massif des énergies renouvelables, telles que le solaire, l'éolien et l'hydroélectricité, remplace progressivement les hydrocarbures comme source d'énergie primaire, réduisant la dépendance aux énergies fossiles et l'empreinte carbone du pays.

- **Scénario mixte** : Une combinaison des scénarios précédents, avec une croissance modérée de la consommation alliée à une diversification des sources d'énergie, permettant de concilier les besoins énergétiques avec le développement durable.

Quel que soit le scénario qui se concrétise, l'Algérie devra relever des défis majeurs

- **Réduire la dépendance aux hydrocarbures** : Diversifier le mix énergétique en faveur des énergies renouvelables et améliorer l'efficacité énergétique sont des étapes cruciales pour réduire la dépendance vis-à-vis des énergies fossiles et leurs fluctuations de prix [12].
- **Financer la transition énergétique** : Mobiliser des investissements conséquents dans les technologies renouvelables, les infrastructures et les programmes d'efficacité énergétique est essentiel pour concrétiser la transition [12].
- **Développer les infrastructures énergétiques** : Adapter et moderniser les infrastructures de production, de transport et de distribution d'énergie est nécessaire pour intégrer efficacement les sources renouvelables et répondre à la demande croissante [12].
- **Sensibiliser les citoyens** : Promouvoir des pratiques d'utilisation rationnelle de l'énergie auprès des citoyens et des entreprises est crucial pour optimiser la consommation et réduire les gaspillages [12].

Malgré ces défis, la transition énergétique offre à l'Algérie de nombreuses opportunités :

- **Création d'emplois verts** : Le développement des énergies renouvelables et l'amélioration de l'efficacité énergétique stimulent la création d'emplois dans des secteurs innovants et porteurs de croissance [12].
- **Développement de nouvelles technologies énergétiques** : L'investissement dans la recherche et l'innovation permet à l'Algérie de se positionner comme un acteur majeur dans le domaine des énergies propres [12].
- **Diversification de l'économie** : La transition énergétique réduit la dépendance aux exportations d'hydrocarbures et encourage la diversification de l'économie vers des secteurs plus résilients et durables [12].
- **Amélioration de la qualité de l'air** : La réduction de la pollution atmosphérique liée à la combustion des énergies fossiles améliore la qualité de l'air et la santé publique [12].

I-1-7). Bilan énergétique et comparaison internationale

L'Algérie est un pays à forte consommation énergétique. En 2022, sa consommation d'énergie par habitant était de 1,5 tonne équivalent pétrole (TEP). Ce chiffre est deux fois plus élevé que la moyenne mondiale [13].

I-1-8). Facteurs influençant la consommation énergétique en Algérie

I-1-8-a). Impact du climat

Climat chaud et sec : Le climat chaud et sec d'une grande partie de l'Algérie favorise l'utilisation intensive de la climatisation en été pour assurer le confort thermique. À l'inverse, le chauffage est également nécessaire pendant les hivers froids, en particulier dans les régions montagneuses. Cette utilisation combinée de la climatisation et du chauffage représente une part importante de la consommation énergétique domestique et commerciale du pays. Les variations climatiques, telles que les vagues de chaleur ou de froid intenses, peuvent également influencer la demande d'énergie de manière ponctuelle [14].

I-1-8-b). Influence du développement économique

Croissance économique et diversification : La croissance économique soutenue de l'Algérie au cours des dernières décennies s'est accompagnée d'une augmentation significative de la demande d'énergie. L'industrialisation, l'urbanisation et l'amélioration du niveau de vie ont entraîné une hausse de la consommation d'énergie dans tous les secteurs, du transport à l'agriculture en passant par les industries manufacturières. La diversification de l'économie algérienne vers des secteurs plus énergivores, tels que l'industrie lourde et la pétrochimie, contribue également à l'accroissement de la demande énergétique. En résumé, la consommation énergétique en Algérie est influencée par une synergie de facteurs, dont le climat chaud et sec du pays, sa croissance économique dynamique et la diversification de son tissu économique [15].

I-1-8-c). Démographie

- La population algérienne est jeune et en croissance rapide, ce qui accroît la demande en énergie.
- L'augmentation du nombre de ménages et la croissance des besoins en matière d'éclairage, de chauffage et d'alimentation électrique contribuent à la pression sur les ressources énergétiques [16].

I-1-8-d). Subventions énergétiques

- Le gouvernement algérien subventionne les prix de l'énergie, ce qui peut encourager la consommation excessive.
- Les subventions peuvent également freiner l'investissement dans les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique [17].

I-1-8-e). Autres facteurs

- Le prix de l'énergie sur le marché international.
- L'efficacité énergétique des bâtiments et des appareils électroménagers.
- Les politiques énergétiques du gouvernement.
- Le niveau de sensibilisation des citoyens à la consommation d'énergie.

I-1-9). Consommation énergétique dans le secteur résidentiel

Le secteur résidentiel algérien est le principal consommateur d'énergie du pays, absorbant 38 % de la consommation énergétique nationale. Cette domination s'explique par plusieurs facteurs :

- Grand nombre de familles en Algérie (environ 10 millions).
- Parc de logements vieillissant et délabrement du parc immobilier, car une grande partie des bâtiments ont été construits avant la mise en œuvre des normes d'efficacité énergétique.
- Modes de vie énergivores qui préfèrent utiliser des appareils électroménagers énergivores [18].

I-1-10). Analyse des types d'habitations et des modes de vie en Algérie

Une grande partie des bâtiments résidentiels algériens ont été construits avant la mise en œuvre des normes d'efficacité énergétique, ce qui entraîne de mauvaises performances énergétiques et une augmentation de la consommation. Le parc immobilier en Algérie est constitué essentiellement de maisons individuelles et de petits immeubles. Des bâtiments anciens, souvent mal isolés, constituent une grande partie du parc. Le paysage immobilier et les modes de vie en Algérie présentent des caractéristiques spécifiques qui influencent la consommation énergétique du secteur résidentiel. Des actions ciblées et une transition vers des pratiques plus durables sont nécessaires pour relever les défis liés à l'efficacité énergétique et à la conservation de l'environnement.

I-1-11). Caractéristiques des bâtiments résidentiels en termes d'efficacité énergétique

La plupart des bâtiments résidentiels en Algérie ne répondent pas aux normes d'efficacité énergétique. Les principales caractéristiques qui contribuent à une faible performance énergétique sont :

- Une isolation insuffisante des murs, toits et sols.
- Des fenêtres et portes non étanches.
- Des systèmes de chauffage et de climatisation inefficaces.
- L'utilisation d'appareils électroménagers énergivores.

I-1-12). Bilan des consommations énergétiques dans le secteur résidentiel

La consommation énergétique dans le secteur résidentiel est répartie comme suit :

- Chauffage et climatisation : 60 %
- Eau chaude sanitaire : 20 %
- Éclairage : 10 %
- Appareils électroménagers : 10 %

I-1-13). Politique énergétique algérienne

I-1-13-a). Objectifs et stratégies de la politique énergétique nationale

La politique énergétique algérienne vise à :

- Assurer la sécurité énergétique du pays en diversifiant les sources d'énergie et en réduisant la dépendance aux hydrocarbures.
- Promouvoir l'efficacité énergétique pour réduire la consommation d'énergie et améliorer la performance énergétique des bâtiments et des industries.
- Développer les énergies renouvelables pour contribuer à la lutte contre le changement climatique et à la protection de l'environnement.

I-13-b). Historique et contexte

Dès 1993, l'Algérie a manifesté son engagement en signant la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC). En 2005, elle a ratifié le Protocole de Kyoto, confirmant sa volonté de réduire ses émissions de gaz à effet de serre (GES). Sur le plan national, deux lois ont été promulguées pour soutenir la transition énergétique :

- Loi n° 99-09 (1999) relative à la maîtrise de l'énergie.
- Loi n° 04-09 (2004) relative aux énergies renouvelables et au développement durable.

I-13-c). Mise en œuvre de la politique

La mise en œuvre de la politique de transition énergétique en Algérie est confiée à plusieurs institutions :

- Programme National de Maîtrise de l'énergie (PNME).
- Fonds National d'Efficacité Énergétique (FNME).
- Comité intersectoriel d'efficacité énergétique (CIME).
- Agence nationale pour la promotion et la rationalisation de la consommation d'énergie (APRUE).

I-1-14). Plans d'action et programmes mis en place

Plusieurs plans d'action et programmes ont été mis en place pour atteindre les objectifs de la politique énergétique nationale, notamment :

- Le Programme national de maîtrise de l'énergie (PNME) vise à réduire la consommation d'énergie de 15 % à l'horizon 2030.
- Le Programme national de développement des énergies renouvelables (PNER) vise à installer 22 000 MW de capacité de production d'électricité à partir des énergies renouvelables à l'horizon 2030.
- Le Fonds national d'efficacité énergétique (FNME) finance des projets d'efficacité énergétique dans les secteurs public et privé[19].

I-1-15). Solutions et innovations pour l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments

Il existe plusieurs solutions et innovations pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments, notamment :

- L'utilisation de matériaux isolants performants.
- L'amélioration de l'étanchéité à l'air des bâtiments.
- L'installation de systèmes de chauffage et de climatisation efficaces.
- L'utilisation de l'énergie solaire et d'autres sources d'énergie renouvelables.

I-1-16). Réglementation thermique Algérienne

La réglementation thermique de 1997 en Algérie avait pour objectif initial de réduire la consommation de chauffage des habitations de 25%. À présent, une réflexion est en cours pour accroître cette économie à plus de 40%. Les simulations numériques réalisées sur des modèles de logements ont démontré que cet objectif plus ambitieux pourrait être atteint en se concentrant sur la réduction des pertes de chaleur par transmission, tout en réduisant considérablement le besoin de climatisation en été. Une éventuelle nouvelle réglementation thermique pourrait introduire une distinction entre les habitations individuelles, encore régies par la réglementation de 1997, et les immeubles collectifs, qui seraient soumis à de nouveaux critères plus stricts. Malgré son inspiration largement française, la réglementation algérienne simplifie les méthodes de calcul et autorise, dans certaines limites, l'utilisation de calculs informatisés pour évaluer les besoins en chauffage et en climatisation.

I-1-17). Mise en application de la réglementation thermique des bâtiments

L'Algérie a entrepris des efforts pour améliorer la gestion de ses ressources énergétiques. La loi 99.09, concernant la maîtrise de l'énergie dans le secteur du bâtiment, a été mise en œuvre à travers la promulgation d'un décret exécutif le 24 avril 2000, sous le numéro 2000-90, établissant la réglementation thermique pour les bâtiments neufs. Son objectif principal est d'intégrer l'efficacité énergétique dans les nouvelles constructions à usage résidentiel et autres, ainsi que dans les extensions des bâtiments existants. Cette réglementation exigeait impérativement l'isolation thermique des nouvelles constructions. Pour accompagner cette démarche, le Centre National d'Études et de Recherches Intégrées des bâtiments (CNERIB) a élaboré trois documents techniques réglementaires destinés aux professionnels du secteur. Ces documents fournissent les informations techniques nécessaires à la conception, au calcul et à l'exécution des ouvrages utilisant différents matériaux.

- Le DTR C 3-2 établit les normes de calcul des pertes de chaleur pour les bâtiments résidentiels. Cette réglementation vise à limiter les fuites de chaleur des logements en fixant un seuil maximal (appelé pertes de référence). Respecter ce seuil devrait entraîner une réduction de 20 à 30 % de la consommation d'énergie pour le chauffage, tout en préservant le confort des occupants. Les méthodes de calcul présentées sont simples, éprouvées et généralement adéquates pour trouver des solutions techniques viables.
- Quant au DTR C 3-4, il énonce les techniques de calcul des apports calorifiques des bâtiments et de vérification de leur conformité à la réglementation thermique estivale.

- Le DTR C 3-31, concernant la ventilation naturelle des espaces résidentiels, répond aux exigences d'efficacité énergétique inscrites dans la loi 99-09 du 28 juillet 1999. Il définit les principes de conception des systèmes de ventilation naturelle et propose les méthodes de calcul nécessaires à leur dimensionnement. Cependant, ce document ne traite pas des conduits de fumée des appareils à gaz ni des systèmes de désenfumage en cas d'incendie.

I-1-18). Rôle des différents acteurs impliqués

Plusieurs acteurs sont impliqués dans la mise en œuvre de la politique énergétique nationale, notamment:

- Le ministère de l'Énergie est responsable de la définition et de la mise en œuvre de la politique énergétique.
- L'Agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie (APRUE) est chargée de la promotion de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables.
- Les entreprises publiques et privées du secteur de l'énergie sont responsables de la production, du transport et de la distribution de l'énergie.
- La société civile est également impliquée dans la sensibilisation du public aux enjeux énergétiques [22].

I-1-19). Évaluation de l'efficacité des politiques mises en place

L'efficacité des politiques énergétiques mises en place est encore limitée. La consommation d'énergie continue d'augmenter et la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique reste faible[1]. Pour réaliser ses ambitions, la politique énergétique algérienne doit être consolidée. Cela implique une intensification du développement des énergies renouvelables et l'instauration de mesures plus encourageantes pour la promotion de l'efficacité énergétique. Quant à l'amélioration de la consommation dans le secteur de la construction, ces recherches doivent être encouragées, financées et soutenues, comme c'est l'objet de nos recherches[23].

I-1-20). Projets pilotes

L'Algérie a lancé plusieurs projets pilotes pour tester et démontrer l'efficacité des technologies d'efficacité énergétique et d'énergies renouvelables :

- **Projet ECO-BAT** : 600 unités d'habitation à haute performance énergétique.
- **Projet PROSOL** : développement de l'énergie solaire photovoltaïque.
- **Projet GEVALOR** : valorisation énergétique des déchets.

I-1-21). Défis et perspectives

La transition énergétique en Algérie est un processus complexe et ambitieux qui fait face à de nombreux défis :

- **Financement** : mobilisation des ressources nécessaires

- **Renforcement des capacités** : formation et développement des compétences
- **Transfert de technologie** : adoption et adaptation des technologies innovantes
- **Sensibilisation et communication** : changement de comportement des citoyens

Malgré ces défis, l'Algérie dispose d'un potentiel important pour réussir sa transition énergétique et s'orienter vers un avenir plus durable[24] .

Conclusion

Face à la demande croissante en énergie, accompagnée des émissions de dioxyde de carbone et de l'aggravation du phénomène de réchauffement climatique, l'Algérie, qui dispose d'abondantes ressources en hydrocarbures, se trouve à une étape charnière dans sa transition vers un système énergétique durable et efficace. Cette analyse approfondie du secteur énergétique algérien explore les tendances actuelles de consommation, les politiques, les défis auxquels il est confronté et les perspectives de transformation. Un accent particulier est mis sur le secteur du bâtiment, qui représente le principal consommateur d'énergie. Une compréhension globale de ce secteur est essentielle pour développer et mettre en œuvre des solutions durables et respectueuses de l'environnement. Il est également important d'étudier les différents matériaux de construction utilisés, qu'ils soient récents ou anciens, et pourquoi pas chercher à produire de nouveaux matériaux.

I-2-Propriétés, empreinte environnementale et performance énergétique des matériaux de construction en Algérie

I-2-1). Introduction

L'histoire de l'architecture en Algérie est riche et diversifiée, caractérisée par l'utilisation de divers matériaux de construction, tant dans l'Antiquité qu'à l'époque moderne. Ces matériaux ont contribué à façonner l'apparence des bâtiments, à affecter leur performance énergétique et à laisser une empreinte environnementale sur le paysage. Cette comparaison explore les caractéristiques, l'empreinte environnementale et la performance énergétique des matériaux de construction utilisés en Algérie au fil des âges.

Le confort thermique d'un bâtiment est un élément essentiel au bien-être de ses occupants. Il se définit comme l'état de satisfaction ressenti par rapport à l'environnement thermique. Cette dernière est fortement influencée par le choix des matériaux de construction, car ces matériaux se caractérisent par des propriétés thermiques distinctes qui modifient leur capacité à conduire la chaleur, et affectent ainsi leur effet sur la température interne.

I-2-2). Matériaux de construction utilisés dans l'Antiquité en Algérie

L'Algérie, riche d'un passé antique fascinant, offre un aperçu des matériaux de construction utilisés à cette époque. Ces choix variaient en fonction de plusieurs facteurs, notamment les régions considérées, les ressources disponibles et les techniques de construction employées [25].

Les matériaux de construction utilisés dans l'Antiquité en Algérie variaient selon les régions, les ressources disponibles et les techniques de construction employées.

I-2-2-a). Matériaux pierreux

La pierre était le matériau de construction le plus largement utilisé dans l'Algérie ancienne. Différents types de pierre sont disponibles, notamment le calcaire, le grès, le marbre et le granit. La pierre était utilisée pour construire des murs et construire des temples, des maisons, des routes et des ponts.

Pierre de taille : largement utilisée pour les monuments importants, elle offrait une grande résistance et durabilité.

Calcaire : matériau tendre et facile à tailler, souvent utilisé pour les constructions moins importantes.

Grès : Résistant à l'usure et aux intempéries, il était utilisé pour les dallages et les murs .

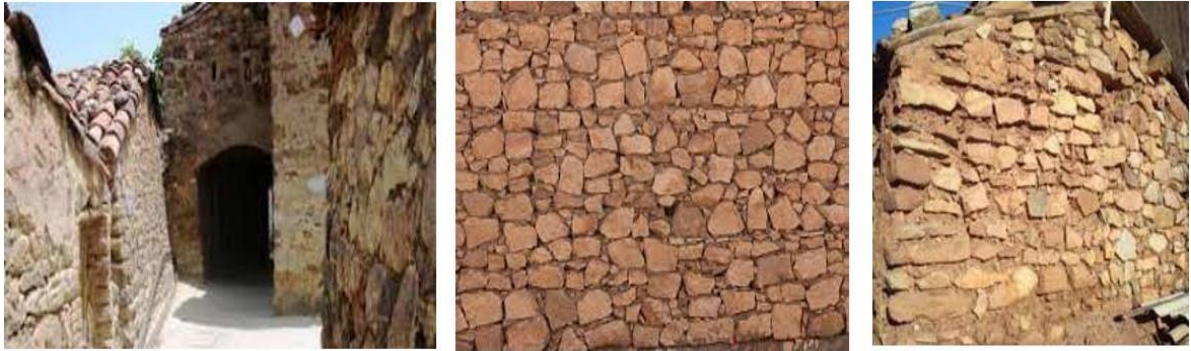


Figure 1: construction en pierre

I-2-2 -b). Matériaux terreux

Dans l'Antiquité en Méditerranée occidentale, l'utilisation de l'architecture en terre crue est attestée, faisant partie intégrante des méthodes de construction de l'époque aux côtés de la pierre et de la brique cuite. La terre crue était un autre matériau de construction important dans l'Algérie ancienne. Elle était utilisée pour construire des maisons, des clôtures et des fortifications. La terre crue est un matériau durable et écologique.

Briques crues : Fabriquées à partir d'argile et séchées au soleil, elles étaient économiques et largement répandues.

Pisé : Technique utilisant de la terre damée pour créer des murs épais et résistants[20].



Figure 2: construction en terre

I-2-2-c). Le bois

Le bois était utilisé pour construire des toits, des portes, des fenêtres et des meubles. Il était également utilisé pour fabriquer des outils et des armes.



Figure 3: toiture en bois (maison ancien).

I-2-2-d). Matériaux liants

- **Gypse** : Utilisé comme plâtre pour le revêtement des murs et la création de sculptures.
- **Chaux** : Mélangée à l'eau et au sable, elle formait un mortier durable pour lier les pierres et les briques. La variété des matériaux de construction utilisés dans l'Antiquité en Algérie témoigne de la richesse des techniques et du savoir-faire des bâtisseurs de l'époque.



Figure 4:(A): gypse (B): chaux.

I-2-3). Propriétés, avantages et inconvénients des matériaux de construction utilisés dans l'Antiquité en Algérie

Tableau I : récapitulatif des avantages et des inconvénients des matériaux de construction utilisés dans l'Antiquité en Algérie.

Matériau	Propriétés mécaniques	Propriétés thermiques	Avantages	Inconvénients
Pierre de taille	Résistance élevée, durabilité	Faible conductivité	Résistant, durable	Coûteux, difficile à travailler
Calcaire	Tendre, facile à tailler	Faible conductivité	Bon marché, facile à travailler	Faible résistance, sensible à l'érosion
Grès	Résistant à l'usure	Conductivité moyenne	Durable, résistant aux intempéries	Difficile à tailler, moins esthétique
Briques crues	Résistance modérée	Bonne isolation	Bon marché, écologique	Fragile, sensible à l'eau
Pisé	Résistance élevée	Bonne isolation	Durable, écologique	Nécessite un savoir-faire spécifique, long à construire
Gypse	Faible résistance	Bonne isolation	Facile à travailler, bon marché	Fragile, sensible à l'humidité
Chaux	Bonne résistance	Faible conductivité	Durable, liant efficace	Nécessite de la pierre calcaire pour sa production

I-2-4). L'empreinte énergétique et environnementale des matériaux de construction dans l'Antiquité

L'Antiquité, époque de grands bâtisseurs, a connu une consommation énergétique et une pollution importantes liées à la fabrication des matériaux de construction.

- **Bois** : Matériau principal, sa production nécessitait une déforestation massive, contribuant à l'érosion et à la perte de biodiversité. La combustion du bois pour la cuisson des briques et la forge des outils accentuait la pollution atmosphérique.
- **Pierre** : Extraite des carrières, son transport et sa taille demandaient une énergie considérable, souvent fournie par des esclaves ou des animaux. La poussière de pierre polluait l'air ambiant.
- **Briques** : Fabriquées à partir d'argile cuite, elles exigeaient de grandes quantités de bois pour chauffer les fours, émettant du CO₂ et d'autres polluants.
- **Chaux** : Obtenue par la cuisson du calcaire, elle dégageait d'importantes quantités de CO₂, contribuant au changement climatique.

- **Métaux** : Le bronze et le fer, utilisés pour les outils et les structures, étaient extraits et transformés dans des processus énergivores et polluants.

I-2-5). Pollution et gaz à effet de serre

La production de ces matériaux générant une pollution atmosphérique importante (poussière, fumée, gaz) et contribuait aux émissions de gaz à effet de serre, bien que l'impact environnemental global soit difficile à quantifier.

I-2-6). Construction en brique cuite et parpaing en Algérie

Avantages, Inconvénients et Consommation énergétique :

I-2-6-a). Brique cuite

La brique en terre cuite, fruit d'un savoir-faire ancestral, se compose essentiellement d'un assemblage d'argile et de sable, façonné puis cuit à des températures élevées, environ 1 200 degrés. Sa teinte, qu'elle soit jaune ou rouge, trouve son origine dans la nature même de l'argile utilisée dans sa fabrication.

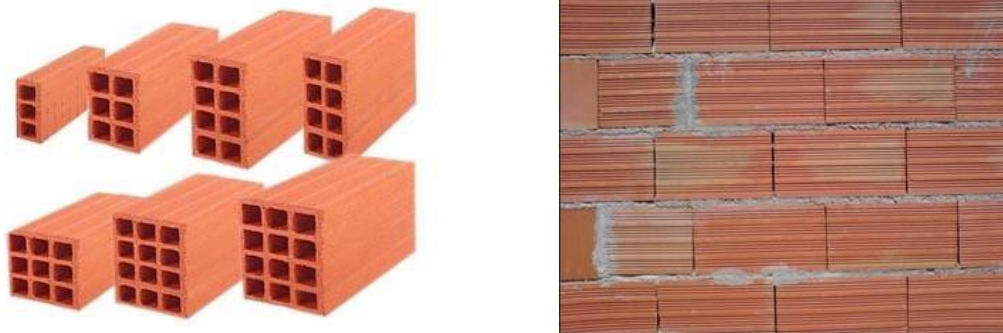


Figure 5: construction en brique cuite.

I-2-6-a)i. Avantages

- Durabilité : Matériau résistant et durable avec une longue durée de vie.
- Isolation phonique : Offre une bonne isolation phonique, réduisant le bruit extérieur.
- Résistance au feu : Matériau incombustible offrant une meilleure résistance au feu.
- Esthétique : Large choix de couleurs et de textures pour une variété d'aspects esthétiques.

I-2-6-a)ii. Inconvénients

- Coût : Plus cher que le parpaing, surtout pour les briques de haute qualité.
- Consommation énergétique : La production de briques cuites nécessite beaucoup d'énergie, contribuant aux émissions de CO2.
- Fragilité : Les briques peuvent être fragiles et se fissurer si elles ne sont pas correctement installées.
- Impact environnemental : L'extraction de l'argile et la cuisson des briques peuvent avoir un impact négatif sur l'environnement.

I-2-6-b). Parpaing

Le parpaing est un matériau de construction utilisé dans le domaine de la maçonnerie. Il est creux et est utilisé dans la construction de murs. Il est généralement de forme parallélépipédique et est fabriqué principalement en ciment.



Figure6: parpaing.

I-2-6-b)i. Avantages

- Coût : Moins cher que la brique cuite, ce qui en fait une option économique.
- Rapidité de construction : Les parpaings sont plus faciles et plus rapides à poser que les briques.
- Résistance : Matériau résistant aux intempéries et aux charges importantes.
- Polyvalence : Disponible en différentes dimensions et formes pour répondre aux besoins de construction.

I-2-6-b)ii. Inconvénients

- Isolation phonique : Moins performant que la brique cuite en termes d'isolation phonique.
- Esthétique : Offre moins de choix d'aspect que la brique cuite.
- Résistance au feu : Moins résistant au feu que la brique cuite.
- Impact environnemental : La production de parpaings peut également avoir un impact négatif sur l'environnement.

I-2-7). Comparaison de la consommation énergétique en brique cuite et en parpaing

La consommation énergétique de la construction en brique cuite est généralement plus élevée que celle du parpaing. Cela est dû à la cuisson des briques, qui nécessite une grande quantité d'énergie. Cependant, il est important de noter que d'autres facteurs, tels que l'isolation du bâtiment, peuvent également affecter la consommation énergétique globale.

Le choix entre la brique cuite et le parpaing dépend de plusieurs facteurs, tels que le budget, les besoins en isolation, l'esthétique et l'impact environnemental. Il est important de comparer les avantages et les inconvénients de chaque matériau avant de prendre une décision.

I-2-8). Caractéristiques mécaniques des matériaux de construction

Les matériaux de construction se distinguent par leurs propriétés mécaniques, qui définissent leur comportement face aux forces et charges appliquées. La compréhension de ces propriétés est essentielle pour garantir la sécurité et la durabilité des structures.

Parmi les caractéristiques mécaniques les plus importantes, on peut citer :

- ✓ **Résistance à la traction (Rt)**: capacité à résister à une force qui tend à étirer le matériau.

$$\sigma = F / A \quad \text{I.1}$$

- σ : Contrainte en traction (MPa)
- F : Force appliquée (N)
- A : Surface de section (mm²)

- ✓ **Résistance à la compression (Rc)**: capacité à résister à une force qui tend à comprimer le matériau.

$$R_t = \sigma_{\max} \quad \text{I.2}$$

- R_t : Résistance à la traction (MPa)

- σ_{max} : Contrainte maximale à la rupture (MPa)

I-2-9). Applications

- Contrôle de la qualité des matériaux.
- Caractérisation des propriétés mécaniques des matériaux.
- Détermination de la résistance à l'usure des matériaux.

I-2-10). Études faites sur la détermination des propriétés mécaniques des matériaux de construction

✓ Une étude a été réalisée intitulée Étude des propriétés thermiques et mécaniques des matériaux de construction du sud de l'Algérie [26].

Caractérisation des propriétés thermiques et mécaniques des matériaux de construction utilisés dans le sud de l'Algérie, notamment le gypse et le plâtre.

Les résultats ont montré que ces matériaux possèdent des propriétés thermiques et mécaniques intéressantes pour une utilisation dans la construction dans le sud algérien.

L'étude a également proposé une nouvelle technique de détermination de la conductivité thermique d'un matériau solide, qui permet d'améliorer la précision des résultats fournis par les modèles théoriques de prévision de la conductivité thermique.

- ✓ Une autre étude intitulée Déterminer les propriétés mécaniques de la matière par les vibrations a montré

Cette étude a montré que la méthode vibratoire peut être utilisée pour déterminer les propriétés mécaniques des matériaux de construction.

La méthode est simple et non destructive, ce qui la rend intéressante pour une utilisation en laboratoire et institut. Les résultats obtenus par la méthode de vibration ont été comparés aux résultats obtenus par les méthodes d'essais traditionnelles et ont montré un bon accord.

En conclusion, de nombreuses études ont été menées en Algérie pour déterminer les propriétés mécaniques des matériaux de construction. Ces études ont permis de décrire les propriétés de différents matériaux et de développer des méthodes d'essais pour les évaluer. Les résultats de ces études sont essentiels à la conception et à la construction d'ouvrages sécuritaires et durables.

- ✓ Dans une étude sur l'amélioration des propriétés du sol par l'ajout de fibres

Des recherches ont montré que l'ajout de fibres au sol peut améliorer ses propriétés mécaniques et thermiques, le rendant ainsi plus résilient et durable (Hegazy et al., 2012 ; Pennisi et al., 2006). Les fibres renforcent le sol et le rendent plus isotrope, réduisant ainsi les niveaux potentiels de faiblesse (Hegazy et al., 2012). Ils peuvent également améliorer la ductilité du sol et retarder la propagation des fissures (Millogo et al., 2013).

De plus, les fibres végétales peuvent améliorer la résistance à la traction et à la flexion du sol. Mohamed (2013) a observé une augmentation de 30 % de la résistance à la traction avec l'ajout de 1 % de fibres de paille de blé, tandis que Galan-Marín et al. (2010) ont signalé une augmentation de 37 % de la résistance à la compression avec l'ajout de 25 % de laine de mouton.

Les fibres peuvent également jouer un rôle dans la stabilisation de la température interne des bâtiments en terre. Pennisi et coll. (2006) ont observé que les briques en terre fibrée maintiennent une température interne constante été comme hiver.

Enfin, l'ajout de fibres peut réduire le dessèchement, le retrait et la fissuration du sol. Quagliarini et Lenci (2010) ont montré que l'ajout de fibres de paille aux briques romaines en terre crue empêche le séchage des fissures et réduit le retrait [28,29,30,31,32,33].

- ✓ Également dans une autre étude intitulée L'effet du compactage sur la résistance mécanique des matériaux terrestres

Le compactage est un processus critique pour améliorer la résistance mécanique des géomatériaux. Trois types de compression ont été étudiés : la compression dynamique, la compression statique et la compression vibratoire.

Le compactage dynamique, similaire au martèlement du sol, s'est avéré être le plus efficace, augmentant la résistance à la compression de 50 % par rapport au compactage vibratoire et de 20 % par rapport au compactage statique (Bahar et al., 2004). Quelle que soit la méthode utilisée, l'augmentation de l'énergie de compression augmente la résistance à la compression du sol (Guillaud et al., 1995). De plus, plus l'énergie de pression est faible, plus il faut d'eau pour bien poser le matériau, car il faut lubrifier les grains.

La méthode de pressage affecte grandement la résistance à la compression du matériau. Goytala et coll. (2006) ont montré qu'une augmentation de la contrainte de compression de 5 à 20 MPa peut améliorer la résistance à la compression jusqu'à 70 %.

Le choix du type et de l'intensité de la compression est essentiel pour augmenter la résistance mécanique des géomatériaux. La compression dynamique avec une énergie de compression élevée semble être la méthode la plus efficace [34,35].

Également dans une étude de l'effet du ciment sur les performances mécaniques et thermophysiques du sol, il a été montré que :

La résistance à la compression est un facteur essentiel pour déterminer la qualité des briques. Il est affecté par plusieurs facteurs, notamment :

• **Teneur en ciment**

- La teneur optimale en ciment se situe entre 5% et 10%.
- Après 10 %, la résistance à la compression diminue (Reza et al., 2011)[37].

• **Type de terrain :**

- L'indice de plasticité des sols argileux se situe généralement entre 15 et 25.

• **Pression:**

- L'hypertension artérielle augmente la force de compression.

• **Type de compactage :**

- Le compactage dynamique est plus efficace que le compactage vibratoire statique (Bahar et al., 2004) [36].

Effet du ciment sur la résistance à la compression

- Un sol stabilisé avec 8 % de ciment peut avoir une meilleure résistance à la compression même après immersion dans l'eau (Bahar et al., 2004) [36].
- La résistance à la compression augmente avec la teneur en ciment jusqu'à un certain point (Tallah et al., 2014) [38].

Effet du mode pression

- La compression dynamique augmente la résistance à la compression à sec de plus de 50 % (Bahar et al., 2004) [36].
- Le compactage vibratoire augmente la résistance à la compression sèche d'environ 5 % (Bahar et al., 2004) [36].

Effet de traitement :

- La résistance à la compression augmente avec le temps de durcissement.
- Une teneur en ciment supérieure à 10 % nécessite 21 à 28 jours pour atteindre sa pleine résistance (Bahar et al., 2004) [36].

Effet de la densité et de la porosité :

- Une densité apparente élevée et une faible porosité augmentent la résistance à la compression (Ben Mansour et al., 2016) [39].

Effet d'humidité :

- La résistance à la compression n'est pas affectée de manière significative par les changements d'humidité relative (Heath et al., 2009) [40].
- La teneur en argile joue un rôle plus important dans la résistance à la compression que l'humidité.
- Il est peu probable qu'une résistance à la compression réduite due à une humidité accrue cause des problèmes dans des conditions normales d'utilisation.

Comparaison avec le béton:

- La résistance à la compression de la maçonnerie en terre peut être supérieure au minimum spécifié pour les éléments de maçonnerie en béton porteurs de 100 mm d'épaisseur (Heath et al., 2009).

L'ajout de ciment peut améliorer la résistance à la compression des matériaux à base de terre. Le choix de la teneur en ciment, du type de terre, du mode de compactage et du temps de durcissement est crucial pour optimiser la résistance à la compression.[40].

I-2-11). caractéristiques thermique des matériaux et leurs impact sur la consommation énergétique des bâtiments

Les caractéristiques thermique des matériaux de construction jouent un rôle crucial dans la consommation énergétique des bâtiments. Elles influencent directement la performance énergétique du bâtiment de plusieurs manières par exemple :

✓ **Résistance thermique:**

La résistance thermique (R) d'un matériau est sa capacité à s'opposer au transfert de chaleur. Plus la résistance est élevée, plus la chaleur est difficilement transférée.

La performance énergétique d'un bâtiment dépend en grande partie de la résistance thermique de ses murs, toits et sols. En effet, une bonne résistance thermique permet de conserver la chaleur en hiver et la fraîcheur en été, réduisant ainsi le besoin en chauffage et climatisation.

L'utilisation de matériaux à haute résistance thermique, comme les isolants, est un élément clé pour améliorer l'efficacité énergétique d'un bâtiment. Ces matériaux limitent les transferts thermiques entre l'intérieur et l'extérieur, contribuant ainsi à un meilleur confort thermique et à une réduction de la consommation d'énergie.

✓ **Impact sur la consommation énergétique:**

- **Matériaux à haute résistance thermique:** Empêchent les déperditions thermiques et les gains thermiques, réduisant la consommation d'énergie.
- **Matériaux à faible résistance thermique:** Favorisent les transferts thermiques, augmentant la consommation d'énergie.

Calcul de la résistance thermique:

$$R = \text{épaisseur du matériau} / \text{conductivité thermique.}$$

I.12

✓ **Capacité calorifique des matériaux :**

L'inertie thermique, c'est le pouvoir d'un matériau à emmagasiner la chaleur. Plus un matériau est doté d'une inertie thermique élevée, comme le béton, plus il est capable de stocker l'énergie calorifique. Cette propriété confère de nombreux avantages pour le confort et l'efficacité énergétique des bâtiments.

En effet, les matériaux à forte inertie thermique agissent comme un régulateur naturel de la température intérieure. Le jour, ils absorbent la chaleur ambiante, contribuant à maintenir une fraîcheur agréable dans le bâtiment. La nuit, ils restituent la chaleur accumulée, ce qui permet de conserver une température intérieure confortable sans avoir recours à des systèmes de chauffage ou de climatisation gourmands en énergie.

Ainsi, l'inertie thermique des matériaux permet de réduire considérablement les besoins en chauffage et climatisation, et par conséquent, la consommation d'énergie du bâtiment. C'est une solution écologique et économique pour garantir un confort thermique optimal tout au long de l'année.

✓ **Conductivité thermique:**

La conductivité thermique (λ) d'un matériau mesure sa capacité à transférer la chaleur. Plus la conductivité est élevée, plus la chaleur est transférée rapidement. Elle est mesurée en W/mK (watts par mètre kelvin).

Plus la conductivité thermique est élevée, plus le matériau est conducteur de la chaleur.

✓ **Impact sur la consommation énergétique:**

- **Matériaux à haute conductivité:** Favorisent les déperditions thermiques en hiver et les gains thermiques en été, augmentant la consommation d'énergie pour le chauffage et la climatisation.

- **Matériaux à faible conductivité:** Agissent comme des isolants, réduisant les transferts thermiques et la consommation d'énergie.

Lois de calcul de la conductivité thermique:

La conductivité thermique des matériaux peut être calculée à l'aide de différentes lois, notamment:

Loi de Fourier: Cette loi stipule que le flux de chaleur traversant un matériau est proportionnel à la différence de température entre ses deux faces et à la conductivité thermique du matériau.

Loi de Fick: Cette loi est utilisée pour calculer la diffusion de la chaleur dans un matériau. Elle est similaire à la loi de Fourier, mais elle prend également en compte la capacité thermique du matériau.

Formules mathématiques de calcul:

Flux de chaleur (Q):	$Q = \lambda A \Delta T / d$	I.13
Résistance thermique (R):	$R = d / \lambda$	I.14
Capacité thermique (C):	$C = Q / (m \Delta T)$	I.15
Diffusivité thermique (α):	$\alpha = \lambda / \rho C$	I.16

Calcul de la Conductivité thermique :

Voici la formule pour calculer la conductivité thermique :

$$\lambda = Q / (A * \Delta T * d) \quad \text{I.17}$$

Où :

- λ est la conductivité thermique (W/mK)
- Q est la quantité de chaleur transférée (J)
- A est la surface du matériau (m²)
- ΔT est la différence de température entre les deux faces du matériau (K)
- d est l'épaisseur du matériau (m)

I-12. Etudes faites sur la détermination des propriétés thermiques des matériaux de construction

- ✓ Dans une étude menée intitulée **Analyse des propriétés thermiques des matériaux de construction utilisés dans la ville de Tamanrasset**

Il a permis d'analyser les propriétés thermiques des matériaux de construction utilisés dans la ville de Tamanrasset, en Algérie.

Les résultats ont montré que les matériaux utilisés ont des propriétés thermiques hétérogènes, avec une conductivité thermique comprise entre 0,35 et 2,00 W/(mK).

L'étude a également montré que l'utilisation de matériaux de construction à faible conductivité thermique peut contribuer à améliorer le confort thermique des bâtiments dans le climat chaud et sec de Tamanrasset.

- ✓ Une autre étude intitulée **Étude des propriétés thermiques et mécaniques des matériaux de construction du sud de l'Algérie**

De l'étude des propriétés thermiques et mécaniques des matériaux de construction utilisés dans le sud de l'Algérie, notamment le gypse et le plâtre.

Les résultats ont montré que ces matériaux possèdent des propriétés thermiques intéressantes pour une utilisation dans la construction dans le sud algérien.

L'étude a également proposé une nouvelle technique de détermination de la conductivité thermique d'une matrice solide, qui permet d'améliorer la précision des résultats fournis par les modèles théoriques de prédiction de la conductivité thermique[26].

- ✓ Une autre étude intitulée **Analyse des propriétés thermiques des bétons de ciment et de calcaire**

De l'analyse des propriétés thermiques des bétons de ciment et de calcaire, en tenant compte de leur composition et de leur structure.

Les résultats ont montré que la conductivité thermique du béton de ciment est supérieure à celle du béton de chaux.

L'étude a également montré que l'utilisation de granulats légers dans l'installation du béton peut contribuer à réduire sa conductivité thermique.

Dans d'autres études, organisées comme suit, il a été possible de déterminer d'autres propriétés, telles que :

Rôle des fibres végétales dans l'amélioration des performances thermo-physiques de la terre

Plusieurs études scientifiques ont établi que l'incorporation de fibres végétales à la terre peut significativement améliorer ses propriétés thermiques et physiques. Cette section explore en détail les divers aspects de cette amélioration.

Amélioration de l'isolation thermique:

Meukam et al. (2004) ont démontré que l'ajout de sciure de bois valorise l'utilisation des briques de terre stabilisées (BTS) en augmentant leur capacité d'isolation (Meukam, 2004).[41].

Impact sur la conductivité thermique:

- Des études menées par Taallah et al. (2016) et Chaib et al. (2015) ont révélé une nette amélioration de la conductivité thermique des briques de terre renforcées par des fibres de palmier dattier par rapport aux briques non renforcées (Taallah et al., 2016 ; Chaib et al., 2015)[38.42].

Effets sur la densité apparente et l'absorption capillaire:

- Taallah et al. (2016) ont également observé que les fibres de palmier dattier réduisent la densité apparente et augmentent l'absorption capillaire des blocs de terre (Taallah et al., 2016)[34].

Influence du traitement des fibres:

- Il est important de noter que le traitement alcalin des fibres de palmier dattier peut avoir un effet contraire sur la conductivité thermique (Taallah et al., 2016) [38]..

Comportement en climat tempéré:

- Goodhew et Griffiths (2005) ont étudié l'impact des fibres de paille en climat tempéré et ont conclu que leur incorporation à la terre génère des résultats thermo-physiques conformes aux normes anglaises. De plus, les mélanges terre-paille de densité inférieure à 450 kg/m³ présentent une capacité de sorption et une perméabilité à la vapeur d'eau très élevées. Leur effet "moisture buffer vapour" (MBV) est comparable à celui du béton de chanvre et largement supérieur aux matériaux conventionnels (Goodhew et Griffiths, 2005). [43].

Importance de l'effet de l'humidité:

- Ashour et al. (2015) ont analysé l'influence de l'humidité relative, de la température et de l'humidité interne sur la teneur en humidité des blocs de terre renforcés par des fibres végétales (pailles d'orge et de blé). Leurs résultats indiquent que l'effet de l'humidité relative est plus prononcé que celui de la température et que l'humidité interne du matériau reste inférieure à 7% pour tous les types de fibres. Cela souligne l'importance de protéger les bâtiments en terre-paille contre les conditions climatiques humides en utilisant des revêtements adéquats (Ashour et al., 2015).[44].

Conclusion

En conclusion, l'Algérie a connu une multitude d'études visant à déterminer les propriétés thermiques et mécaniques de ses matériaux de construction. Ces travaux ont permis de caractériser les propriétés de divers matériaux et d'établir des méthodes d'essai pour leur évaluation. Les résultats de ces recherches sont essentiels pour la conception et la construction de bâtiments confortables et économes en énergie.

Cependant, la richesse de l'Algérie en matériaux de construction encore inexplorés ouvre la voie à de nouvelles investigations. L'évolution notable des outils et équipements expérimentaux, couplée à l'intelligence artificielle, incite à la réalisation de recherches approfondies et à la conduite d'expériences dépassant les limitations des études antérieures.

En s'attaquant à ces domaines inexplorés, la recherche algérienne peut contribuer à l'optimisation des performances thermiques et mécaniques des matériaux de construction locaux, favorisant ainsi l'édification de bâtiments plus durables et respectueux de l'environnement. De plus, l'exploitation de ces ressources locales peut stimuler l'économie nationale et réduire la dépendance vis-à-vis des importations.

CHAPITRE II :
APPROCHE METHODOLOGIQUE ET
PROTOCOLE EXPERIMENTAL.

II-1) Introduction

Ce chapitre a pour objectif principal d'étudier les propriétés thermiques et mécaniques des matériaux de construction utilisés souvent dans les habitations en Algérie. Il s'agit de mener une étude visant principalement à améliorer le comportement thermique des différentes parties de l'architecture des bâtiments par la réduction de la consommation énergétique globale. Cette dernière représente une source d'inquiétude et de craintes aux niveaux local et mondial en raison des émissions de dioxyde de carbone résultant de la fabrication de ces matériaux au niveau des usines, ainsi que de leur transport, ainsi que lors du chauffage des bâtiments en hiver et de la consommation de grandes quantités d'énergie en été pour les refroidir. Par conséquent, la fabrication de matériaux de construction et la création d'une atmosphère appropriée dans le cadre de vie exacerbent le risque de réchauffement climatique ainsi que les émissions de dioxyde de carbone.

Changer et rationaliser la consommation d'énergie dépend avant tout de la maîtrise des phénomènes thermiques aux niveaux des matrices constituant les matériaux de construction. Ces mécanismes se résumant aux effets d'interactions entre les matériaux de construction et les densités énergétiques diffusées aux endroits des habitations par la principale source de chaleur qui est le soleil. Comme cette source dépend beaucoup des conditions climatiques de l'atmosphère les études d'optimisations s'imposent pour les bons choix des caractéristiques des matériaux à utiliser.

Dans ce chapitre, nous présenterons les principaux matériaux et les méthodes qui ont été utilisées et appliquées pour caractériser et étudier les propriétés thermiques et mécaniques de ces matériaux. Certaines outils de ces caractérisations sont fabriqués entièrement par nos efforts et nos moyens personnels au niveau du laboratoire et d'autres sont assurés par des partenaires sociaux économiques en collaboration avec les structure de l'université.

Pour atteindre nos objectifs ce travail est divisé en quatre parties distinctes :

- La première partie consiste en une présentation des matériaux et outils utilisés dans une étude expérimentale sur l'effet de l'orientation et de l'inclinaison des surfaces sur le rayonnement solaire incident : application aux bâtiments.
- La deuxième partie consiste en une présentation des matériaux et outils utilisés pour étudier l'effet du rayonnement solaire sur les profils et distributions des températures sur les certaines parties des murs des maisons faisant face aux quatre points cardinaux en été à Oulad Sidi Ibrahim (Algérie).
- La troisième partie consiste en une présentation des matériaux et outils utilisés pour étudier l'effet des caractéristiques précises des différents matériaux de constructions sur l'évolution des profils et des distributions de la température intérieure en Algérie.
- Enfin, la quatrième partie consiste à la présentation des matériaux et outils utilisés pour étudier les propriétés thermiques et mécaniques de plusieurs matériaux utilisés dans la construction.

II-2) Dispositifs expérimental

II-2-a) Effet de l'orientation et de l'inclinaison des murs de constructions

L'étude de l'effet de l'orientation et de l'inclinaison d'une surface construite avec un matériau précis dépend surtout de la puissance du rayonnement solaire incident par rapport à cette orientation. Le rayonnement solaire comme est constitué d'un spectre globale contenant les différentes parties directe, diffusé et réfléchis provenant du soleil. Il est d'une grande importance donc de connaitre ces paramètres géométriques pour relever les précisions sur les caractéristiques à envisager pour optimiser les réponses thermiques des matériaux utilisés. Pour atteindre les objectifs de cette étape, nous avons développé nous-même, avec beaucoup de difficultés et d'investissements matériel et financier, des banc complets de caractérisation des profils de distribution des températures en fonction de l'orientation et de l'inclinaison pour relever les paramètres donnant une meilleure optimisation.

II-2- b) Descriptif détaillant l'outil développé

Nous avons développé expérimentalement un outil complet permettant de faire varier l'orientation, l'inclinaison et la lecture de la puissance solaire (kW/m^2) pour ces positions géométriques.

Pour varier l'orientation et l'inclinaison ; nous utilisons un support rotatif, muni d'une boussole précise pour connaitre l'angle d'orientation par rapport au nord magnétique qui peut être pris confondu avec le nord géographique sans beaucoup d'erreurs, et un variateur manuel de l'angle d'inclinaison par rapport à la verticale ? Ce système véhicule un capteur d'ensoleillement (solarimètre) donnant directement la puissance solaire mesuré en kW/m^2

Pour clarifier nous détaillons quelques détails techniques de l'instrument développé (brevet n° 11637) :

Le changeur d'inclinaison est un instrument en bois utilisé pour étudier l'impact de l'inclinaison d'une surface sur l'énergie solaire interceptée. Il est composé d'un rapporteur permettant d'ajuster l'angle d'inclinaison de la surface par incréments de 5° , de 0° à 180° . Le centre du rapporteur présente un axe de pivotement sur lequel est fixé l'héliomètre. Ce pivot permet de faire varier l'angle d'inclinaison de la surface manuellement. La variation de l'angle d'inclinaison est sujette à une imprécision de $\pm 1^\circ$ (voir figure. 7).

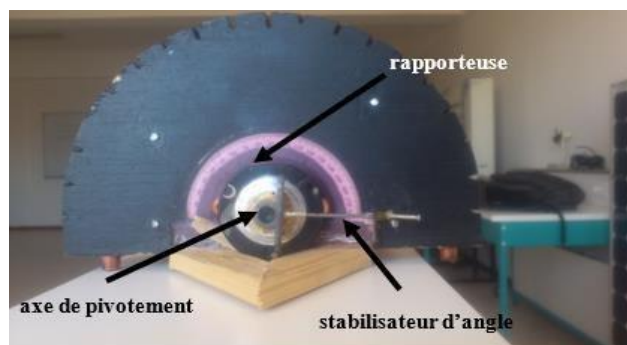


Figure7: Un changeur d'inclinaison, (rapporteur).

La puissance solaire interceptée est mesurée en kilowatts par mètre carré à l'aide d'un héliomètre qui est un capteur de flux thermique solaire. L' héliomètre utilisé est un composant de l'ET 200, un collecteur thermique expérimental développé par l'entreprise allemande Gunt (voir figure 8).

les mesures de l'héliomètre sont affichées sur l'écran d'affichage correspondant sur le boîtier de contrôle et de commande du capteur thermique ET 200. Plus de détails sur le principe de fonctionnement de l'héliomètre peuvent être trouvés dans nos travaux ultérieurs [103]. L'utilisation de l'héliomètre permet d'étudier les effets de l'inclinaison et de l'orientation des surfaces indépendamment de leurs matériaux de construction ou de la taille de leur surface. De plus, l'irradiation solaire incidente a été mesurée avec une précision de $\pm 0,01 \text{ kW/m}^2$

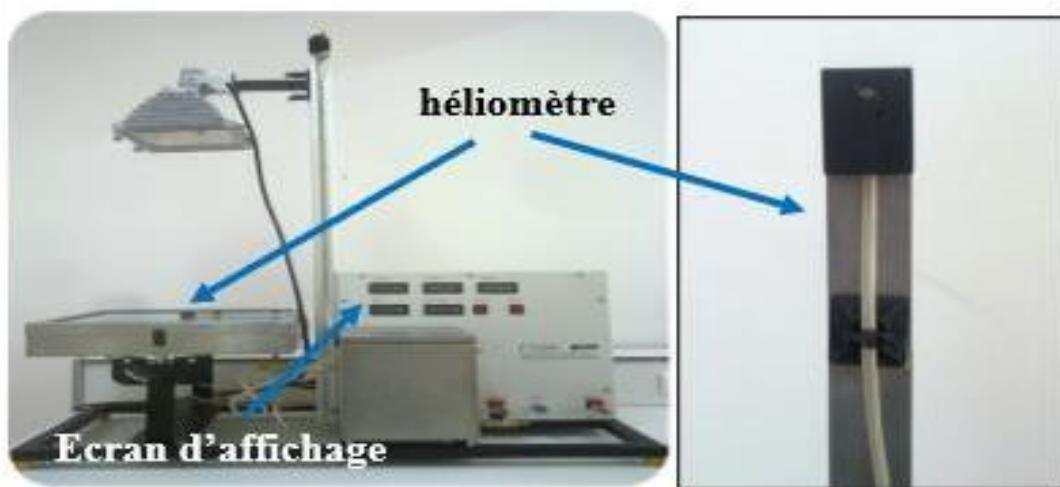


Figure 8 :Capteur solaire ET 200 et le solarimètre.

II-3) Procédure expérimentale

Pour permettre les mesures expérimentales de l'étude en cours, les quatre points cardinaux ont été identifiés à l'aide d'une lecture informatique sur une application. Ces points ont ensuite été marqués sur le site d'étude, ainsi que les repères pivotants du support sur lequel le changeur d'inclinaison était fixé. Le solarimètre a ensuite été monté sur le pivot du changeur d'angle, comme illustré sur la figure 9. Cette conception permet d'intercepter l'irradiation solaire sous différents angles tout au long de la journée. De plus, le support pivotant permet de passer facilement d'une orientation est-ouest à une orientation sud-nord (figure 9).

L'angle d'inclinaison a été ajusté de 0° à 90° par incréments de 5° pour chaque direction, et l'irradiance incidente a été capturée par l'héliomètre. La valeur mesurée était indiquée en kW/m^2 sur le boîtier de commande. Les mesures ont été prises toutes les 10 minutes de 8h30 à 16h30 sur cinq jours en 2019 : 27 février, 17 mars, 15 avril, 15 mai et 10 juin. Il est important de noter que l'irradiation solaire incidente a été mesurée pour chaque expérience dans un laps de temps inférieur à une minute pour tous les angles d'inclinaison (0° à 90°) et orientations. Ce processus efficace de collecte de données valide les résultats de la recherche.



Figure 9: montage expérimental .

II-4) Analyses statistiques

L'analyse statistique permet de rassembler, organiser et analyser les données des mesures expérimentales afin de tirer des conclusions. Une variété de tests statistiques sont utilisés, en fonction du nombre de groupes comparés, de la normalité des données et de l'indépendance des observations.

Dans cette étude, le test de Friedman, un test non paramétrique similaire à l'ANOVA unidirectionnelle avec mesures répétées, a été utilisé pour déterminer si une différence statistiquement significative existe entre les moyennes de trois ou plusieurs groupes, avec les mêmes sujets apparaissant dans chaque groupe.

Le logiciel statistique SPSS 26 a été utilisé pour réaliser cette étude, qui a été basée sur une probabilité de signification de 0,05.

Grâce à cet équipement et à cette méthode, la première partie de l'étude a été réalisée, tandis que la deuxième partie est prévue pour l'étude de l'effet de la direction sur la température des murs.

II-5) Comportement thermique estival des parois d'une chambre orientées vers les principaux points cardinaux

Pour détailler l'étude du comportement thermique estival d'une chambre dépend du confort thermique dans les habitations qui est un élément crucial, particulièrement pendant les saisons chaudes. En Algérie, les températures estivales peuvent être caniculaires, affectant négativement le confort des occupants. Dans ce contexte, l'étude du comportement thermique des parois d'une chambre à Ouled Sidi Brahim est d'une grande importance pour identifier les solutions adéquates pour améliorer le confort thermique en été.

Afin d'accomplir les objectifs de l'étude en cours, nous avons mis en place un ensemble d'instruments expérimentaux. Cela incluait la construction d'une chambre expérimentale et l'installation d'un système d'acquisition numérique.

II-5.1) Chambre et murs

Comme l'illustre la figure 11, une chambre avec un volume interne de $20 \times 20 \times 20 \text{ cm}^3$ a été construite en utilisant des briques creuses percées de quatre trous pour examiner l'évolution de la température au centre des surfaces extérieures de ses quatre parois. Les murs ont tous 5 cm d'épaisseur et sont bien liés par du ciment, comme le sont les murs de la plupart des maisons en Algérie. De plus, la structure de la chambre est posée sur un carreau monocouche de $33 \times 33 \text{ cm}^2$ et recouverte d'un carreau similaire, comme le montre la figure10.



Figure 10 : Chambre creuse en brique rouge .

II-5.2) Système d'acquisition numérique (DMST1.0)

Un appareil d'enregistrement numérique a été réalisé dans toutes ses parties expérimentales pour suivre la température à l'intérieur et au milieu de chacune des surfaces extérieures des quatre murs pendant 24 heures, à intervalles d'une minute.

Nous avons créé cinq capteurs de température installés dans chaque mur pour la mesure de la température chaque minute où ils sont enregistrés et stockés dans un support numérique en format ascii standard (Figure 11).

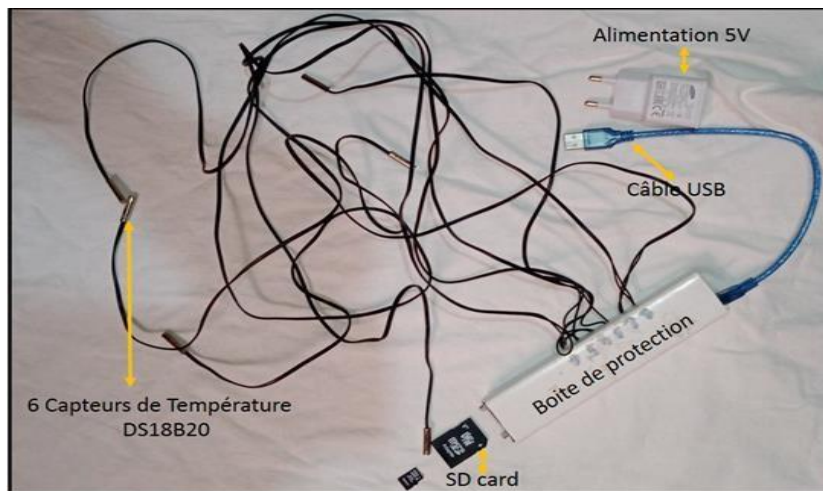


Figure 11: Système d'acquisition numérique utilisé (DMST1.0).

I-5.3). Procédure expérimentale

Comme le montre la figure12, la chambre construite a été placée à l'extérieur, à l'abri de tout effet d'ombrage, avec ses quatre murs pointant dans les directions des quatre points cardinaux (est, ouest, nord et sud).

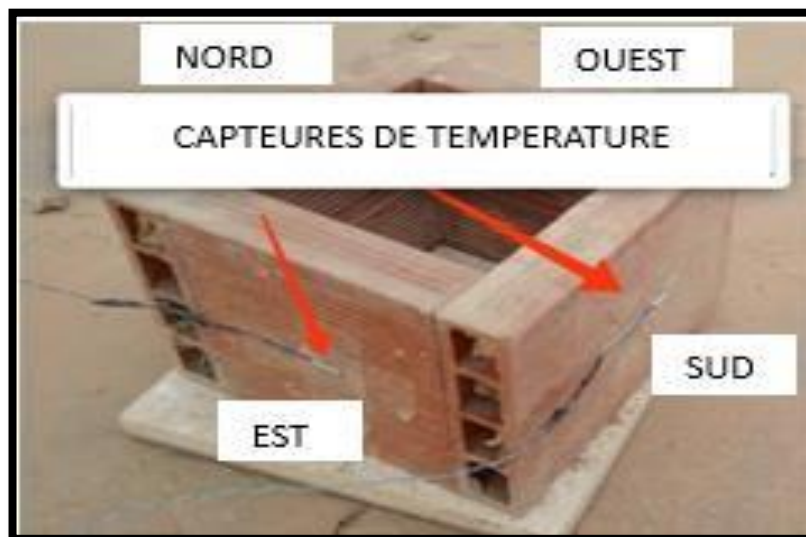


Figure 12 : Chambre construite dans son environnement de test.

Afin de mesurer en continu les températures des surfaces extérieures des quatre murs pendant 24 heures par incréments d'une minute à différents jours de juin, juillet, août et septembre, quatre capteurs de

température DS18B20 du système d'acquisition réalisé ont été fixés à leurs centres (Figure. 12). Il convient de souligner que les expériences se sont déroulées à Ouled Sidi Brahim au cours de l'été, précisément du 21 juin au 21 septembre. Durant les jours d'expérimentation, les heures de lever et de coucher du soleil, ainsi que la température au centre de la chambre, ont été enregistrées.

II-5.4) Effet de la trajectoire de la position du soleil

la position du soleil influe directement sur la puissance solaire au niveau de la surface de la terre et les extrêmes positions sont connues pendant l'été et l'hiver. Pendant l'été, la période la plus chaude avec des pics de températures très élevées (45 – 58 °C) s'étend du 21 juin (solstice d'été) au 21 septembre (équinoxe d'automne) dans l'hémisphère nord, qui reçoit sensiblement plus d'énergie solaire en raison de l'élévation plus élevée du soleil dans le ciel (Figure. 13). Ou, pour le dire autrement, l'hémisphère nord est le plus exposé au soleil tout au long de l'été, ce qui en fait la saison la plus chaude de l'année en plus de la chaleur accumulée au printemps. Au cours de l'été, la trajectoire du soleil se déplace de $23,5^\circ$ au sud de son point zénithal (solstice de juin), comme le montre la figure 13.

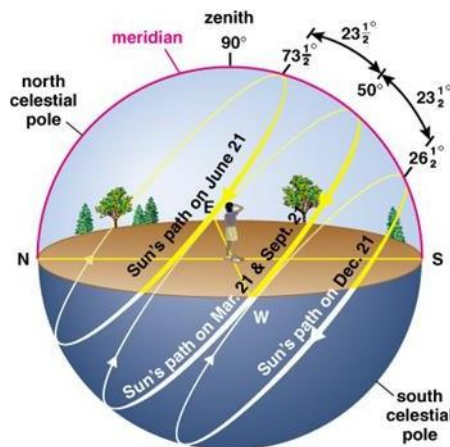


Figure 13: Trajectoire du soleil .

À Ouled Sidi Brahim, dans l'hémisphère nord, cette étude expérimentale a été menée au cours de l'été 2019.

La figure 14 montre une comparaison entre les températures de l'air enregistrées par notre système d'acquisition et celles enregistrées par le mini thermomètre numérique Tihebeyan disponible dans le commerce (Figure. 15). Comme on l'a vu, au cours du test de 11 minutes, l'erreur enregistrée entre les deux mesures est faible. Elle varie entre -0,2 et 0,1°C. Par conséquent, notre système de mesure est précis et fiable. Après avoir évalué la qualité métrologique du système d'acquisition, les expérimentations ont été menées. L'objectif principal de l'enquête expérimentale actuelle était de déterminer comment le rayonnement solaire affectait la température des faces extérieures des parois d'une chambre faisant face aux quatre points cardinaux pendant plusieurs jours d'été. Pour y parvenir, nous avons simplement changé l'orientation des murs tout en conservant leur taille et leurs matériaux de construction.

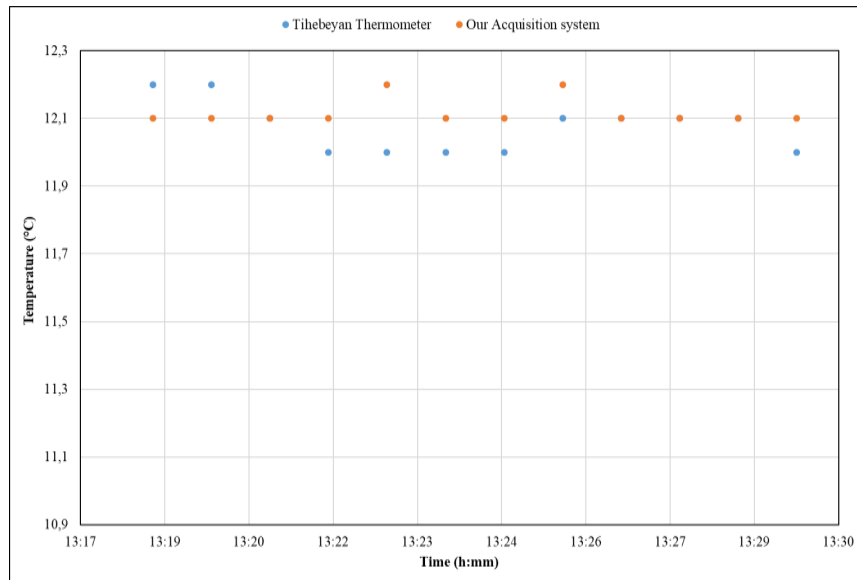


Figure 14: Comparaison entre les lectures du mini thermomètre numérique Tihebeyan et celles de notre système d'acquisition de la température de l'air.



Figure 15: Mini thermomètre numérique Tihebeyan.

II-6). Effet des matériaux de construction sur l'évolution de la température intérieure

Le choix des matériaux de construction est crucial pour assurer le confort thermique intérieur, compte tenu du climat chaud et sec qui prévaut dans une grande partie du pays. En effet, les propriétés thermiques des matériaux de construction influencent considérablement sur la capacité d'un bâtiment à réguler sa température interne, en particulier pendant les périodes de chaleur intense.

Quatre matériaux de construction différents utilisés en Algérie ont été employés dans cette enquête, à savoir la laine de mouton, la brique traditionnelle, la brique ordinaire et le calcaire.

La tente était jusqu'à présent la maison des nomades du sud de l'Algérie. Elle est fabriquée en laine de mouton, l'un des matériaux de l'étude. La brique traditionnelle, également connue sous le nom de brique

de terre, est constituée de terre (argile) de la manière suivante : De l'eau est ajoutée à la terre collectée pour produire une pâte malléable, qui est ensuite placée dans des moules pour donner forme et dimension à la brique. La brique obtenue est séchée naturellement. Malgré leurs avantages, les briques en terre cuite ne sont plus utilisées aujourd'hui en Algérie. La brique ordinaire est une brique creuse en terre cuite qui a été séchée à des températures extrêmement élevées. C'est actuellement le matériau le plus utilisé dans la construction de maisons en Algérie. Le calcaire est une roche sédimentaire principalement composée de calcite, un minéral de carbonate de calcium de formule chimique CaCO_3 . Ces pierres sont utilisées pour construire des maisons en Algérie, notamment là où elles se trouvent.

II-6-1). Pièces (chambres)

Quatre chambres de volume intérieur égal à $20 \times 20 \times 20 \text{ cm}^3$ ont été construites en laine de mouton, brique de terre, brique ordinaire et calcaire pour étudier l'évolution de la température à l'intérieur de celles-ci (température intérieure), comme illustré sur la figure 16.



Figure 16: Quatre chambres différentes faites de laine de mouton (1) (tente), de brique ordinaire (2), de brique de terre (3) et de calcaire (4) .

Le tissu en laine de mouton enveloppe une structure en bois avec le même volume intérieur que les autres pièces. Tous les murs des pièces ont une épaisseur de 5 cm, à l'exception de la tente et de la pièce en pierre calcaire qui ont respectivement 0,2 cm et 3 cm d'épaisseur. De plus, la tente a une faible épaisseur car elle est réalisée en tissu. Alors que le calcaire disponible sur le marché fait 3 cm d'épaisseur. Ainsi, seules les pièces en briques présentent les mêmes volumes intérieurs et extérieurs.

Le but de cette étude était d'étudier l'effet des matériaux de construction des murs sur l'évolution de la température intérieure ; par conséquent, toutes les pièces ont les mêmes planches supérieures et inférieures, à l'exception de la planche supérieure de la tente (voir encore la figure 16) .

En effet, les quatre murs de chaque pièce reposent sur le même carrelage (planche inférieure) et sont recouverts du même carrelage (planche supérieure). Les murs des pièces ordinaires en brique et en pierre calcaire sont bien cimentés (c'est-à-dire scellés avec du ciment), tout comme les murs de la plupart des maisons. Les côtés de la tente ont été cousus.

La conductivité thermique des matériaux étudiés est présentée dans le tableau I, qui est basé sur des enquêtes publiées.

Tableau 2 : Plage de conductivité thermique des matériaux utilisés

Matériel	Conductivité thermique (W/m·K)
Laine de mouton	0,04 .
Brique ordinaire	0,61-0,74 .
Brique de terre	0,9 .
Calcaire	0,9264-2,968 .

De plus, pendant 24 heures, à intervalles d'une minute, le même appareil d'enregistrement numérique a été utilisé pour suivre la température à l'intérieur et au milieu de chaque pièce. Quatre capteurs de température ont été installés au centre de chaque pièce pour mesurer la température toutes les minutes ou l'enregistrer et la stocker sur la carte mémoire sous forme de fichier Excel.

II-7). Etude de caractéristique thermique et mécanique d'autre matériaux de construction (qu'on a pu assurer)

II-7-1). Extraction de matière primaire

En ce qui concerne l'extraction des matériaux de construction en argile, nous avons étudié plusieurs types d'argiles extraites de plusieurs régions différentes, ainsi que la pierre, car elles font partie des matériaux de construction utilisés dans l'Antiquité et différaient selon les régions, ainsi que l'étude

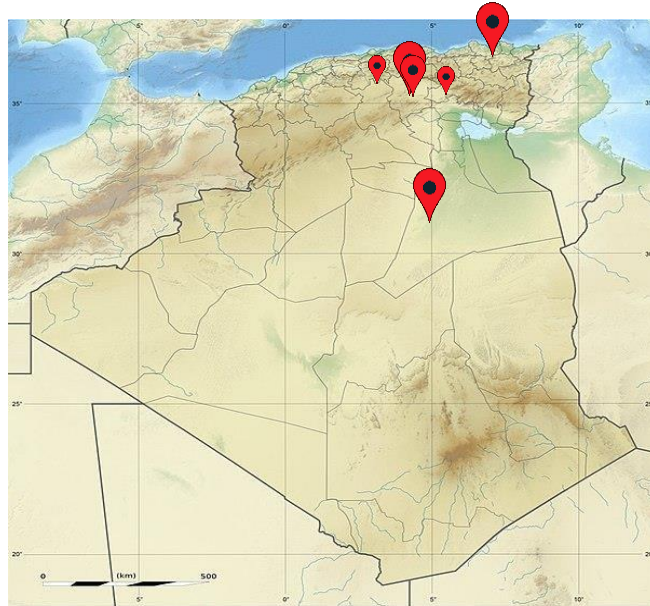


Figure 17 : Zones d'où les matières premières ont été extraites

des matériaux de construction modernes. et des matériaux de construction largement utilisés, à savoir la brique et la parpaing (Figure 17).

Il ya quelque échantillont qu'on a les pris des ancien maison comme celle de l'argile jaune et argile de marif et l'argile de gabouhiya ..etc (Figure18).



Figure 18: Lieux d'une ancienne maison d'extraction de certains matériaux argiles.

Après avoir extrait les quantités nécessaires à l'étude, elles ont été tamisées avec le même tamis pour réaliser des échantillon de 16x 4 x 4 cm moules à soumettre à des expérimentations. Quant aux types de pierres, elles ont été taillées aux mêmes mesures .



Figure 19: Echantillons préparés par : Argiles ● pierres ●

II-7-2). Outillage d'étude

II-7-2-a). Moule en bois

Un moule en bois mesurant 16 x 4 x 4 cm a été soigneusement réalisé. Ce modèle visait à créer des échantillons uniformes avec des dimensions précises pour faciliter les mesures et les comparaisons, car il permettait de contrôler la quantité de composés présents dans les échantillons en mesurant de manière précise et reproductible. Et expérimentez également différents types de mélanges d'argile dans différentes proportions. (voir figure :20).



Figure 20: Le moule en bois utilisé pour fabriquer les échantillons

Après avoir terminé la préparation des échantillons, l'étude de la composition mécanique et chimique a été réalisée au niveau de l'usine Lafarge, l'un des partenaires socio-économiques de l'université de Msila. Nous tenons à remercier toute l'administration et les équipes techniques qui ont très bien collaboré avec un sens scientifique et professionnel exceptionnel.

Ces échantillons ont ensuite été transférés à l'usine Lafarge de M'sila, une institution spécialisée dans la production de matériaux de construction et de ciment. Là, des expériences mécaniques ont été menées pour étudier les propriétés de ces matériaux, notamment leur résistance mécanique. Cette étape était nécessaire pour évaluer la capacité du matériau à résister aux contraintes mécaniques, telles que la compression et la flexion.

Ces expériences ont permis d'obtenir des données précieuses sur la résistance et la durabilité de ces matériaux, fournissant ainsi un aperçu détaillé de leurs performances sous diverses contraintes mécaniques. Ces informations étaient nécessaires pour comprendre les performances de ces matériaux dans des applications de construction réelles et pour déterminer quels matériaux sont les mieux adaptés à des utilisations spécifiques.

Cette phase de l'étude a démontré un engagement à mener des recherches visant à fournir des informations exploitables pour l'industrie de la construction.

II-7-2-b). Essais mécaniques

L'échantillon dont on veut mesurer la résistance à la flexion est placé dans la partie A, où des forces lui sont appliquées au milieu de celle-ci et s'appuient sur deux points. Les forces appliquées ainsi que la valeur de résistance sont lues au moyen d'un programme sur l'ordinateur relié à la machine.

L'échantillon dont on veut mesurer la résistance à la Compression est placé dans la partie B, où des forces lui sont appliquées sont verticales. Les forces appliquées ainsi que la valeur de résistance sont lues au moyen d'un programme sur l'ordinateur relié à la machine.



Figure 21: Machine pour les essais de flexion.



Figure22 : Machine de compression et flexion.



Figure 23: Machine des essais de compression.

II-8). Analyses chimiques

II-8-1). Préparation des pastilles

L'analyse chimique joue un rôle crucial dans la détermination des propriétés des produits chimiques présents dans un produit particulier. Il trouve des applications diverses dans différents domaines, de l'industrie à la recherche scientifique, fournissant des informations essentielles pour comprendre la composition chimique des matériaux.

Avant de commencer le processus d'analyse chimique, la première étape consiste à broyer le matériau argileux ou pierre ou brique dont la composition doit être déterminée dans le disque mille (figure :24) et maitre ce dernier dans le broyeur a disque (figure :25)

Après le broyage (Figure :26.) , en prend 10g de matière et la maitre dans un cylindre en acier pour préparer des pastilles de matériaux destinées pour les analyses chimiques.(Figure :27,28.) ,

Après cette étape en met en forme les pastilles par pressage manuel et un siffleur pour la siffler.(figure :29).



Figure24: Disque mille.

Le broyeur à disques se compose d'un bloc de fer et d'un rouleau qui travaillent en tandem pour broyer le matériau. L'échantillon est soigneusement placé dans un broyeur, où il est soumis à des forces mécaniques qui le transforment en une forme adaptée à l'analyse chimique. Ce processus est effectué avec une grande précision pour garantir que les échantillons sont uniformément broyés et prêts à subir les prochaines étapes d'analyse.



Figure 25 : broyeur a disque vibrant.

La préparation des échantillons, y compris le broyage, est une étape essentielle pour obtenir des résultats précis pour l'analyse chimique. Cela permet de garantir que les échantillons sont cohérents et prêts à être analysés, tout en minimisant les erreurs potentielles dues aux différences de taille ou de forme.



Figure 27: Presse manuelle de pastilles.



Figure 28: Mise en Forme des pastilles .



Figure 29: Sifflage et traitement de surface des pastilles.



Figure 26 : Exemple d'échantillons après broyage.

II-8-2). l'analyse chimique

Une fois la préparation de la pastille est terminée, le processus est mis dans l'appareil de **fluorescence de rayons x S8** (figure30) pour la détermination qualitative et quantitative des constituants des pastilles.



Figure 30: Appareil de fluorescence des rayons X S8 disponible au laboratoire d'analyse de LAFARGE.

II-8-2-a). Description de l'appareil

Le S8 TIGER est basé sur la spectroscopie à rayons X. Ces rayons X sont générés avec un tube scellé à vide formé par une cible en élément connu et d'une source de très haute tension (KV) permettant d'accélérer des électrons extrait d'un filament électronique sur la cible. Ce mécanisme de bombardement génère un spectre de rayons X continu formé par la décélération d'électrons et d'un spectre de raies caractéristiques de la cible. Ces rayons X à la sortie du tube bombardent l'échantillon à caractériser et un ensemble de détecteurs et un analyseur sont mis autour de l'échantillon. Un système d'acquisition basé sur ordinateur intégré permet de préciser les étapes de caractérisation par une analyse qualitative et quantitative pour la détermination des éléments chimiques constituant l'échantillon et mesurer leur concentration.

Le S8 TIGER est un puissant outil d'analyse élémentaire dans les laboratoires de recherche et développement ainsi que dans le contrôle qualité et les processus industriels que LAFARGE utilise dans l'analyse des échantillons du ciment en général.

Les pastés sont placés à leur endroit désigné au niveau de l'appareil **x ray fluorescence s8** pour être choqués par un faisceau de rayons X.



Figure 31: emplacement des pastilles au niveaux de x ray

Une fois la période de transmission complète terminée, les composants chimiques de la substance sont répertoriés dans un tableau sur l'écran de l'appareil, comme indiqué (voir figure :32)

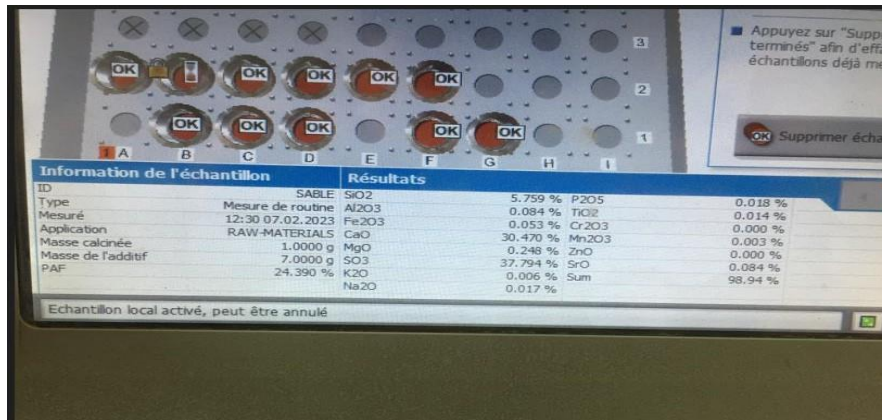


Figure 22: Affichage des résultats sur le S8.

II-9). Calcule de la chaleur spécifique des échantillon (pierres et argiles)

II-9-1). Equipment utilisé

Pour calculer la chaleur spécifique des échantillons, nous avons réalisé un montage expérimental complet avec des outils purement originaux. L'expérience préliminaire permet de déterminer la chaleur spécifique de l'eau utilisée par plusieurs formules, distillée, mélangée à des éléments connus avec des concentrations estimées. La mesure de la résistance thermique d'un élément est déduite à l'aide d'un Ohmmètre.

En calculant l'intensité selon la loi d'Ohm $P = U \times I$, et en calculer la quantité d'énergie par la loi $E = P \times t$, nous avons ensuite pu déterminer la chaleur spécifique de l'eau. Figure (33).

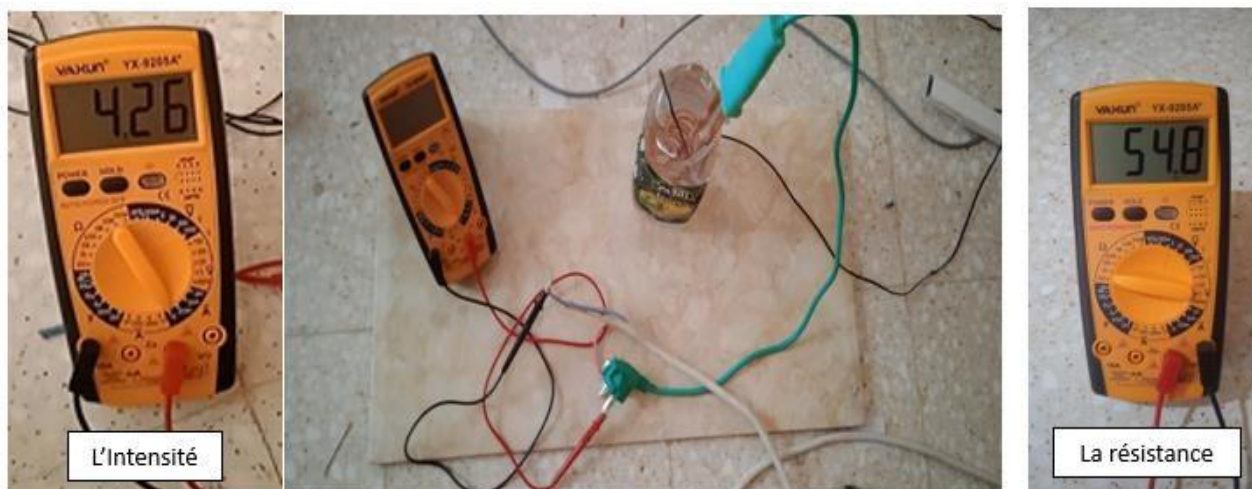


Figure33 : Principe de mesure Ohm métrique de la résistance d'une solution .

II-9-2). Mesure de la chaleur spécifique des argiles

Nous avons mesuré la température initiale de tous les échantillons (figure. 34). Ensuite, nous avons chauffé l'eau jusqu'à 100 °C et avons ajouté une quantité de 140 g d'eau chaude dans chaque conteneur isothermique (thermos commercial) contenant les échantillons (figure. 35). Nous avons également placé un capteur de température dans chaque thermos afin de suivre les valeurs de celle-ci.



Figure 34 : mesure de T_i de chaque échantillon (pierres et argiles).



Figure 35 : suivie de développement de T° de chaque échantillon dans un système isolé .

II-9-3). Pour la mesure de chaleur spécifique des pierres

En a suivis les mêmes procédures sauf qu'on remplace les échantillon d'argile par celle de différent type de pierre et brique et parpaing .

II-10). Etude des caractéristiques thermiques des matériaux

Durant cette phase, nous avons procédé de mesure du flux thermique, de la résistance thermique, de la diffusivité thermique des différents échantillons. Quelques problèmes ont surgi et les solutions trouvées sont liées :

1. Quel appareil nous permet de mener une étude expérimentale réelle pour suivre la température et comparer les températures de deux maisons réelles fabriquées à partir de matériaux différents pendant une journée ou deux ou plus en continu ?
2. Quelles sont les caractéristiques techniques que cet appareil doit avoir pour répondre aux exigences de l'étude ?
- 3- Comment collecter ces données, en tenant compte de la distance, de la quantité importante d'échantillons et de la distance qui les sépare ?
- 4- Comment analyser toute la quantité de données que nous cherchons à sécuriser ?

En réalité, il y a un certain nombre d'interrogations, surtout si l'on se limite aux appareils disponibles à notre niveau pour étudier et mesurer les températures, ce qui nous laisse les mains liées sans pouvoir obtenir ces données et mener ces études.

Nous avons résolu ces problèmes en développant et en inventant un nouveau dispositif développé en deux étapes, la première représentée par le dispositif DMST 1.0 et la seconde en développant ce dernier, le Smart DMST 1.0. (plus de détail dans le chapitre 3).

II-11). Étape de l'étude

A ce stade de l'étude, un appareil à rayonnement équipé d'une lampe de 1000 watts, émettant une source fixe de rayonnement, a été fabriqué et posé sur un support de 50 cm de hauteur. Différents échantillons d'argile manufacturée et de matériaux de construction ont été soigneusement disposés et des capteurs de température ont été installés sur chaque échantillon. Ces capteurs ont commencé à mesurer et à enregistrer les valeurs de température des deux côtés de chaque échantillon une heure avant l'allumage de la lampe.

Lorsque la lampe était allumée, les capteurs continuaient à surveiller et à enregistrer les températures des échantillons pendant cinq heures. Cette phase d'exposition aux rayonnements était essentielle pour évaluer les changements de température sur les échantillons lorsqu'ils étaient exposés à une source de rayonnement externe.

Après cinq heures d'exposition, la lampe a été éteinte et les capteurs ont continué à mesurer les températures des échantillons pendant une heure supplémentaire. Cette dernière étape a permis d'observer l'évolution des températures des échantillons après extinction de la source de rayonnement.

Toutes ces mesures ont été réalisées avec une extrême précision, afin de garantir la fiabilité des données collectées. Le but de cette étape était de déterminer comment différents matériaux réagiraient aux changements de température résultant de l'exposition au rayonnement du projecteur. Ces recherches étaient nécessaires pour mieux comprendre les propriétés thermiques des matériaux étudiés et les facteurs qui influencent leur comportement thermique.

De plus, cette étape nécessite une gestion minutieuse des capteurs de température pour garantir que les valeurs de température sont mesurées et stockées correctement. Les capteurs ont joué un rôle essentiel dans la collecte de données précises et fiables, ce qui a permis de garantir que les résultats de l'étude ont été obtenus avec un minimum d'effort et de consommation d'énergie.

Conclusion

Dans le cadre de ce chapitre, un ensemble d'outils et d'appareillage expérimentaux ont été réalisés complètement par nos propres efforts et moyens pour répondre soigneusement aux questions de notre étude. Dans le chapitre suivant des descriptions détaillées seront détaillées. Ces mesures sont complétées par des expériences des essais mécaniques et caractérisations chimiques au niveau des structures du partenaire LAFARGE.

CHAPITRE III :
DÉVELOPPEMENT D'OUTILS ET DE
LOGICIELS EXPÉRIMENTAUX

III-1). Principes, outils et applications de la thermométrie**Introduction**

Toutes les propriétés thermiques sont liées principalement à la grandeur physique qui est la température. La mesure de cette grandeur est un aspect expérimental important pour pouvoir maîtriser les caractérisations thermiques. La thermométrie est donc toutes les procédures de mesures de la température durant des mécanismes de transferts thermiques ou les valeurs instantanées et les profils et distributions dans l'espace et dans le temps donnent des informations précises sur beaucoup de paramètres liés à ces phénomènes.

III-2). Rappels sur les principaux concepts de la température

La température est une grandeur physique fondamentale de type scalaire mesurable. Elle est introduite dans les sciences pour permettre de paramétrer théoriquement et expérimentalement les aspects de chaleurs, de quantité de chaleur, des énergies thermiques et des échanges thermiques en générales. Elle représente une sensation de chaud ou de froid caractérisant un point ou un corps. [45].

Dans le système international on a associé l'unité Kelvin pour la mesure de la température. Le kelvin est l'unité défini en prenant la valeur numérique fixée de la constante de Boltzmann, $k = 1,380\ 649 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ (unité égale à $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, le kilogramme, le mètre et la seconde étant définis dans le système international relativement aux dernières mises à jours de 2019 [46].

III-3). Mesure de la température

La mesure de la température consiste simplement à comparer sa valeur à des valeurs de référence. Pour cela une échelle donc est introduite pour faire ces comparaisons. Il existe principalement 3 échelles de températures les plus utilisés :

- L'échelle Fahrenheit (Unité °F), introduite par Daniel Gabriel Fahrenheit en 1724 - Se basant sur deux points de références ; une valeur (32°F) à l'état de l'eau dans sa phase solide et une valeur (212°F) à l'état de l'eau dans sa phase d'ébullition. Avec 180 graduations l'échelle est étendue pour couvrir les différentes gammes de températures positives et négatives,

- L'échelle Celsius (Unité °C) Introduite par Anders Celsius en 1742 - Se basant sur deux points de références ; une valeur à l'état de l'eau pur dans sa phase solide (0°C) et une valeur à l'état de l'eau pur dans sa phase d'ébullition (100°C). Avec 100 graduations l'échelle est étendue pour couvrir les différentes gammes de températures positives et négatives,

- L'échelle Absolu ou « Température thermodynamique » (Unité K), Introduite par Lord Kelvin en 1846 en faisant une référence qui est relative à la notion d'un « zéro absolu », (absence absolue d'agitation thermique et de pression d'un gaz). Les subdivisions sont identiques au Celsius avec une correspondance facile à faire.

En pratique, la mesure de la température se fait par des outils gradués selon les références de l'échelle utilisée. Ces outils contiennent un indicateur ou un capteur qui est sensible à la température par une réaction physique de dilatation, de rayonnement ou de transformation électrique. Ces outils sont tout simplement les thermomètres qui existent en différentes variétés selon leurs utilisations.

En pratique, on distingue surtout les thermomètres à dilatation utilisant un liquide, un gaz, un liquide ou un solide qui est sensible à la température par la génération d'une dilatation en mode linéaire, volumique ou surfacique. Associé à une règle graduée avec précision et bien étalonnée par rapport à l'échelle utilisée la lecture de température se fait directement en tenant compte de la précision indiquée par le constructeur.

Avec l'évolution de l'électronique intégrée les nouvelles générations de thermomètres sont beaucoup plus simples et très précis grâce à des lectures numériques directe. Ces outils utilisent principalement des capteurs à base de mécanisme physiques qui est la thermoélectricité et ils sont surtout caractérisés par une très bonne précision et fiabilité. On distingue donc les capteurs de température à thermocouple, à résistance, à diode et transistors et à rayonnements.

D'autres outils de cartographie des champs de températures existent avec l'utilisation plus poussée de l'électronique et de l'informatique intégré. On cite principalement la caméra thermique qui est un appareil simple permettant de visualiser la répartition de la température d'un objet en produisant une image dite thermogramme. Cet outil est basée sur l'utilisation d'une matrice de capteurs de rayonnement infrarouge émis par les points de l'objet donnant ainsi une image. Leurs avantage se présente surtout par les mesures sans contact qui sont utiles dans les cas d'objets à forte variation de température.

Pour un cas particulier de mesure de la température, le choix du thermomètre adéquat dépend de plusieurs facteurs, tels que la précision requise, la plage de mesure souhaitée, le type de surface à mesurer. Il est important de se référer aux instructions du fabricant et de respecter les consignes d'utilisation pour garantir des mesures précises et fiables.

III-4). Mesure de la conductivité thermique

La conductivité thermique est une propriété fondamentale des matériaux qui caractérise leur capacité à transférer la chaleur. Sa mesure est essentielle dans divers domaines, de l'industrie à la recherche scientifique, pour évaluer l'efficacité des isolants, le comportement des matériaux sous l'effet de la chaleur et le développement de nouveaux matériaux à propriétés thermiques spécifiques.

III-4-1). Différentes techniques et appareils existent pour mesurer la conductivité thermique

III-4- 1-a). Méthode de la plaque chaude gardée

- Cette technique utilise deux plaques métalliques, une plaque chaude et une plaque froide, entre lesquelles est placé l'échantillon de matériau à tester.
- Un flux de chaleur constant est généré par la plaque chaude et la différence de température entre les deux plaques est mesurée.
- La conductivité thermique est ensuite calculée à partir de la loi de Fourier.

III-4- 1-b). Méthode du fil chaud

- Un fil métallique fin est placé au centre de l'échantillon de matériau à tester.
- Un courant électrique est envoyé dans le fil, ce qui génère de la chaleur.

- La résistance du fil et la température de l'échantillon sont mesurées.
- La conductivité thermique est ensuite calculée à partir d'un modèle théorique.

III-4- 1-c). Méthode Flash

- Un flash de lumière intense est appliqué à la surface de l'échantillon de matériau à tester.
- L'évolution de la température de l'échantillon est mesurée en fonction du temps.
- La conductivité thermique est ensuite calculée à partir d'un modèle théorique.

III-4- 1-d). Appareils de mesure

- **Analyseur de conductivité thermique:** Cet appareil utilise la méthode de la plaque chaude gardée ou la méthode du fil chaud pour mesurer la conductivité thermique des solides.
- **Capteur de flux thermique:** Ce capteur est utilisé pour mesurer le flux de chaleur traversant un matériau.
- **Caméra infrarouge:** Cette caméra permet de visualiser la distribution de la température sur la surface d'un matériau.

La mesure de la conductivité et de la température est un pilier fondamental des sciences et technologies modernes. Leur contribution à l'efficacité énergétique, à la sécurité, au confort et à l'innovation est incontestable. Cependant, le coût élevé de certains appareils et la rareté d'autres constituent des obstacles à la réalisation d'études complètes et approfondies. C'est pourquoi il est devenu nécessaire de développer des appareils innovants capables de compléter les travaux expérimentaux.

III-2). Appareils et logiciels développés au cours de cette thèse

Introduction

L'élaboration des différentes parties de cette thèse a présenté beaucoup de défis. Nous avons pu détourner les limitations des outils expérimentaux grâce à des conceptions originales utilisant les modules et composants du marché. Cela est surtout encouragé par la période du confinement obligé par la pandémie de Covid-19 qui a affecté le fonctionnement de nombreux laboratoires. Malgré ces obstacles, nous avons su exploiter ces contraintes pour adopter une approche novatrice et développer des solutions alternatives qui nous ont permis de mener à bien une bonne partie des travaux de cette thèse.

Quatre appareils ont été développés et utilisés dans cette étude dans leurs versions initiales arrêtées en 2023:

- ❖ DMST 1.0 : un Data-Logger de température, soumis au brevet national sous le numéro 220126, dossier 2106212198 du 22 juin 2021.
- ❖ Smart DMST 1.0 : un Data-Logger de température qui complète le DMST 1.0 par un logiciel d'interprétation et d'analyse des données. Le dossier de brevet est en cours de finalisation pour le dépôt en 2024.
- ❖ Dispositif d'étude des caractéristiques thermiques des matériaux de construction : également en cours de dépôt de brevet en 2024.
- ❖ EDDIS 1.0 : un outil polyvalent permettant la mesure et le suivi, plus l'affichage et le stockage plus le calcul des paramètres physiques tel que (la température, l'humidité, la vitesse, l'intensité des rayons, le débitetc) dans divers contextes expérimentaux, également en cours de labellisation et de dépôt de brevet en 2024.

Ces appareils ont ouvert la voie à d'autres études relatives au transfert de chaleur. De plus, ils comblent le manque enregistré au niveau de nos laboratoires et améliorent la qualité de la formation offerte à nos étudiants.

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté en détail les deux premiers appareils le **DMST 1.0** et le **SMART DMST 1.0**

Dans le quatrième chapitre, nous introduirons les deux autres appareils.

III-2-1). le DMST 1.0

En fait le DMST 1.0 (appareil de mesure et de stockage des valeurs de température) , C'est un appareil qui fonctionne de manière autonome après son installation sur le site d'étude. Il stocke les valeurs sur une carte mémoire sous forme de fichier excel et remplace plusieurs éléments humains avec possibilité de suivre la température du sous-sol en fonction de la profondeur. .solution en deux Figure : 36.

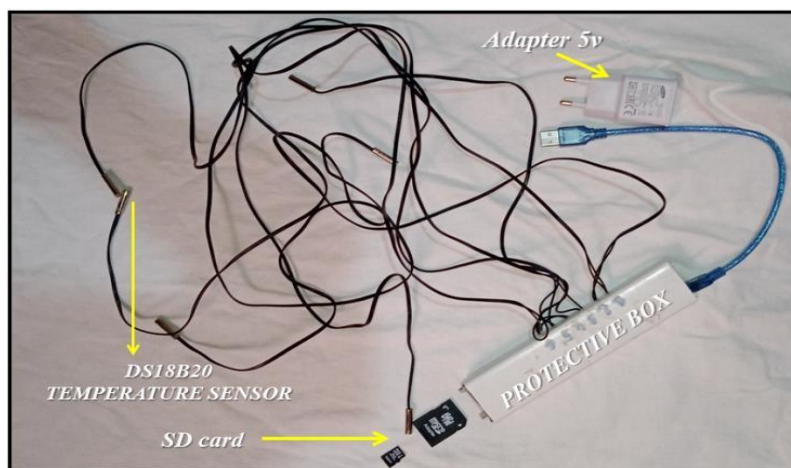


Figure 36: DMST1.0

III-2-2).Smart DMST 1.0

Il s'agit du même DMST1.0 appareil dans son application pour le suivi des températures dans les matériaux de construction, en plus d'un programme d'analyse et d'interprétation des résultats.

Qui est utilisé à la fois pour l'analyse et pour constituer une banque de données qui sera utilisée pour le développement futur Figure : 37.

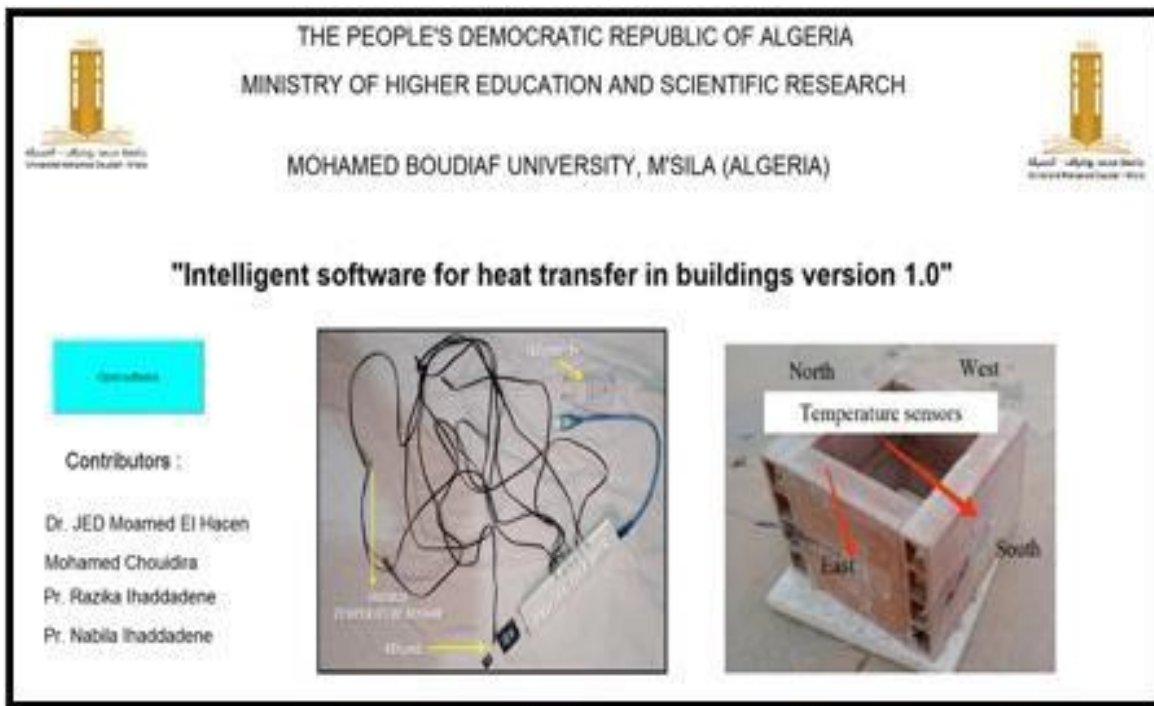


Figure 37 : smart DMST1.0(interface de logiciel).

III-2-3). Fiabilité de l'appareil

Les résultats de cet appareil ont été comparés à des appareils couramment utilisés, et les résultats ont prouvé qu'il donne presque les mêmes valeurs que celles indiquées dans le graphique de la figure 38.

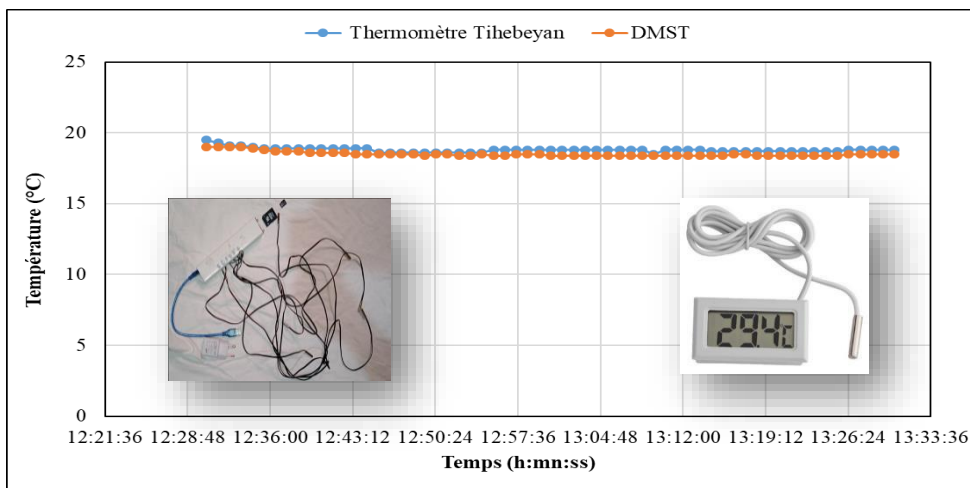


Figure 38: test de fiabilité .

III-2-4). Caractéristique de DMST 1.0

- Effectuer des lectures de températures précises sur une période allant jusqu'à un mois voire plus.
- Effectuer des lectures de températures précises à plusieurs emplacements en même temps.
- Effectuer des lectures de températures précises dans n'importe quel milieu (liquide, solide, gazeux).
- Effectuer des lectures de températures précises quelle que soient les conditions extérieures (pluie, soleil, neige, vent, etc.).
- -Effectuer des lectures de températures précises à des intervalles définis (une seconde, une minute, une heure, etc.).
- Analyser les lectures faites .

III-2-5). Domaine d'application

- DMST1.0 est d'une grande utilité pour les chimistes (suivi de la température des réactions chimiques par exemple), les architectes (Evolution de la température à l'intérieur des bâtiments), les thermiciens (mesure et suivi de la température des gaz d'échappement d'un moteur par exemple), les électroniciens (mesure de la température des composants électroniques), etc.
- DMST est d'une grande utilité surtout dans le domaine des énergies renouvelables ; géothermie, solaire, etc.
- Dans les laboratoires de recherche impliquant la mesure de la température, ce nouveau dispositif est indispensable.

III-2-6). Présentation de l'interface inélégante

L'interface développée permet d'analyser rapidement et en profondeur les données pour des périodes soigneusement sélectionnées, comme nous le verrons ultérieurement. De plus, elle offre la possibilité de calculer automatiquement l'heure du lever et du coucher du soleil, en prenant en compte les coordonnées du lieu et la date de l'expérience (Figure 39), sans nécessiter de sauvegarde préalable, contrairement à nos travaux antérieurs.

Figure 39 : l'interface de logiciel développée.

III-2-7). caractéristiques de l'interface

Nous présenterons un exemple de l'étude que nous avons menée pour expliquer les avantages et les caractéristiques de ce programme.

L'interface développée permet également d'analyser les données pour des intervalles de temps bien choisis, tels que la journée, le matin, l'après-midi, la nuit ou toute la journée sélectionnée, via son menu contextuel. Une illustration de l'analyse des données effectuée le 11 septembre est présentée sur la figure 10. De plus, l'interface permet à l'utilisateur de désigner le graphique principal (en grand format) à afficher pour la période choisie parmi une sélection de graphiques montrant comment l'orientation des murs influence la température extérieure (T_{sud} , T_{nord} , T_{est} et T_{ouest}), ainsi que la température de la face externe de chaque mur par rapport aux environnements intérieur et extérieur (Fig. 40). Sous le graphique sélectionné pour la période d'étude se trouve un tableau récapitulatif qui montre les températures maximales et minimales, le moment où elles sont atteintes, la température moyenne, la différence entre les températures les plus élevées et les plus basses, la différence entre les températures maximales et moyennes, et l'écart type.

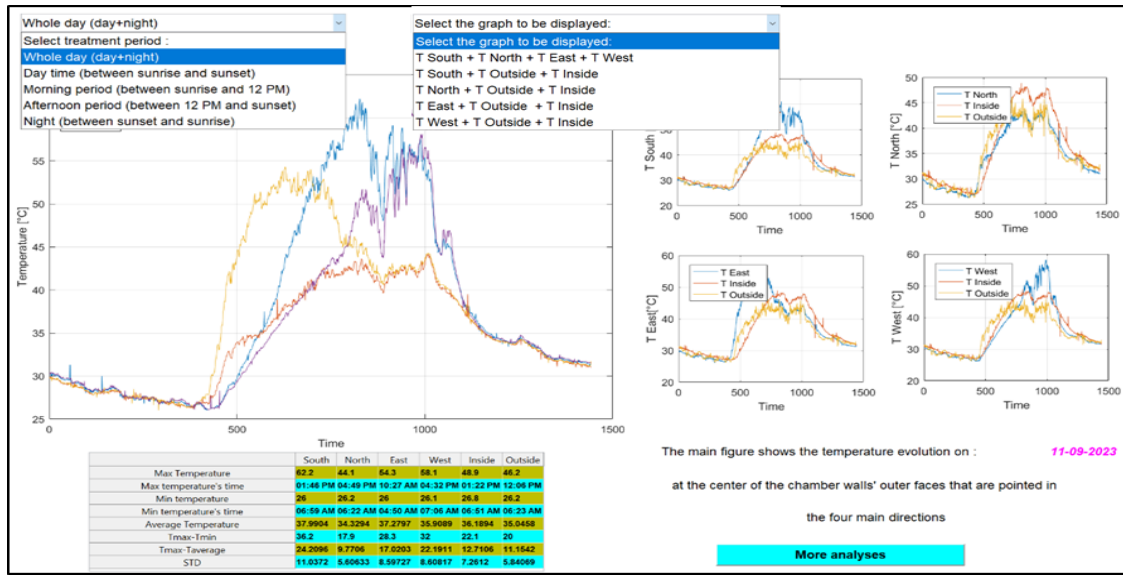


Figure 40 : Premiers résultats des données traitées par l'interface développée.

Comme illustré sur la figure 41 , l'interface conçue permet en outre l'interprétation des résultats en fonction du paramètre d'étude sélectionné sur le bouton du menu contextuel qui apparaît dans une fenêtre séparée immédiatement après avoir sélectionné le bouton Plus d'analyses, situé à droite. du tableau récapitulatif.

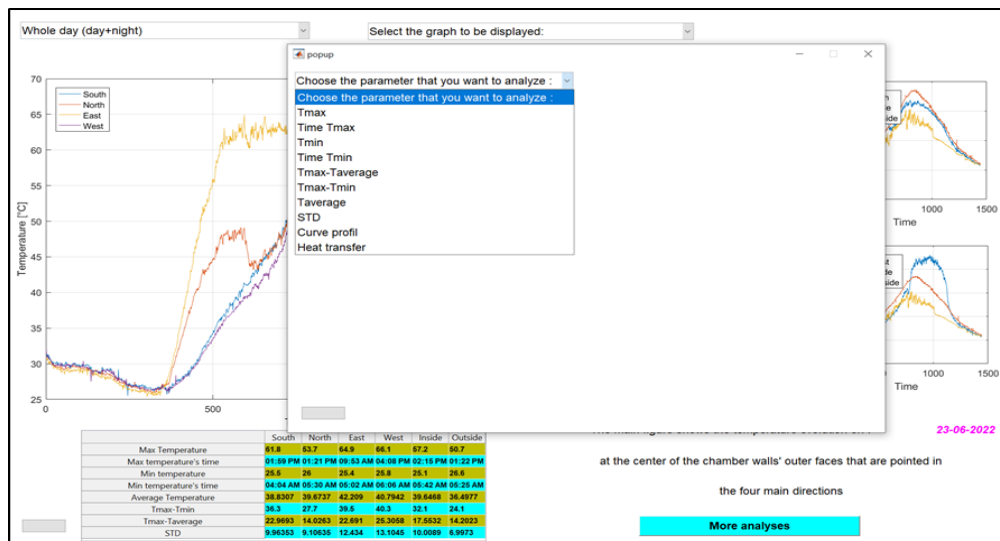


Figure 41 : Sélection du paramètre d'étude à analyser .

Lorsque la température la plus élevée (Tmax) est sélectionnée, l'interface détermine et compare les températures maximales par rapport au graphique choisi (le graphique principal) pour la période d'analyse spécifiée. Par exemple, lorsque (Tsud, Tnord, Test et Touest) est sélectionné, l'interface compare Tmax pour les différentes orientations et communique le résultat sous forme de texte où les orientations sont disposées, en commençant par

l'orientation qui a enregistré la température maximale la plus élevée et en terminant avec l'orientation qui a enregistré la température maximale la plus basse, comme le montre la Fig. 42. De plus, l'interface indique en outre l'orientation qui a enregistré la température la plus élevée (Tmax) et l'orientation qui a enregistré la température moyenne la plus élevée (Tavg. max) pendant la période sélectionnée. période d'étude (journée, matinée, journée entière, etc.). Les orientations avec les différences enregistrées de température maximale les plus élevées et les plus faibles apparaissent également dans l'analyse des données de Tmax. Un autre avantage est que, comme illustré sur la figure 48, l'interface offre une explication des résultats.

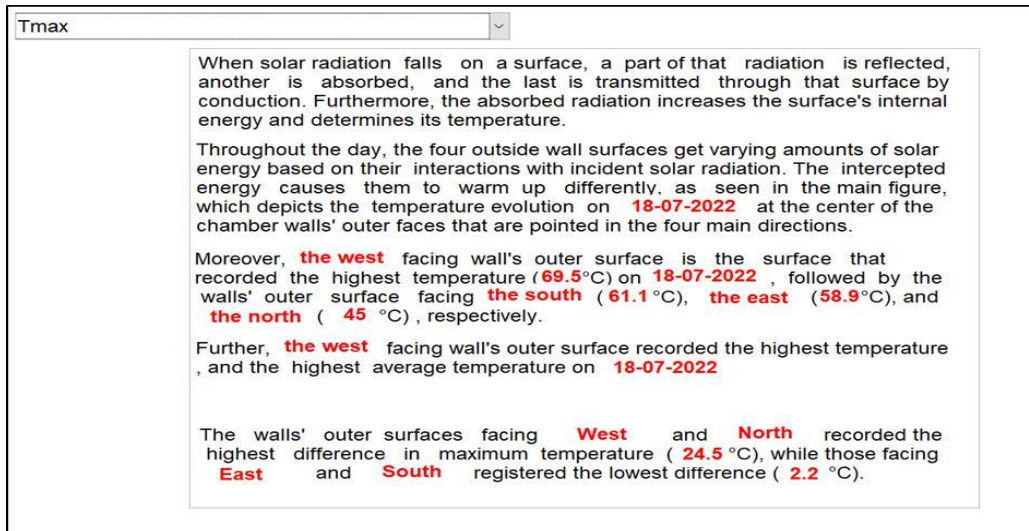


Figure 42 : Résultats de l'analyse des données de Tmax pour le 18 juillet sur toute la journée.

Lorsque le temps de température la plus élevée (Tmax's Time) est sélectionné, l'interface calcule les temps de températures maximales du graphique choisi (le graphique principal) pour la période d'analyse spécifiée. Il est possible de différencier les orientations de murs dont les températures maximales sont atteintes le matin (Temps Tmax<12:00:00) et celles dont les températures maximales sont atteintes l'après-midi (Temps Tmax>12:00:00) grâce à l'interface développée. . Un exemple illustratif est présenté sur la figure 13 pour le 18 juillet. L'interface indique en outre l'orientation dont la température maximale est atteinte en premier et celle dont la température maximale est atteinte en dernier, comme le montre la figure 43 ,pour la période choisie.

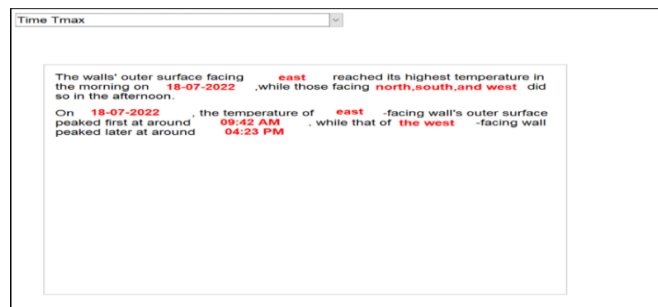


Figure 43 : Résultats de l'analyse des données temporelles de Tmax pour le 18 juillet sur toute la journée.

Lorsque la température la plus basse (Tmin) est sélectionnée, l'interface détermine et compare les températures minimales par rapport au graphique choisi (le graphique principal) pour la période d'analyse spécifiée, comme le montre la figure 44 pour le graphique représentant l'évolution de la température à le centre des surfaces extérieures des quatre murs (T_{sud}, T_{nord}, T_{est} et T_{ouest}) pendant toute la journée du 30 août.

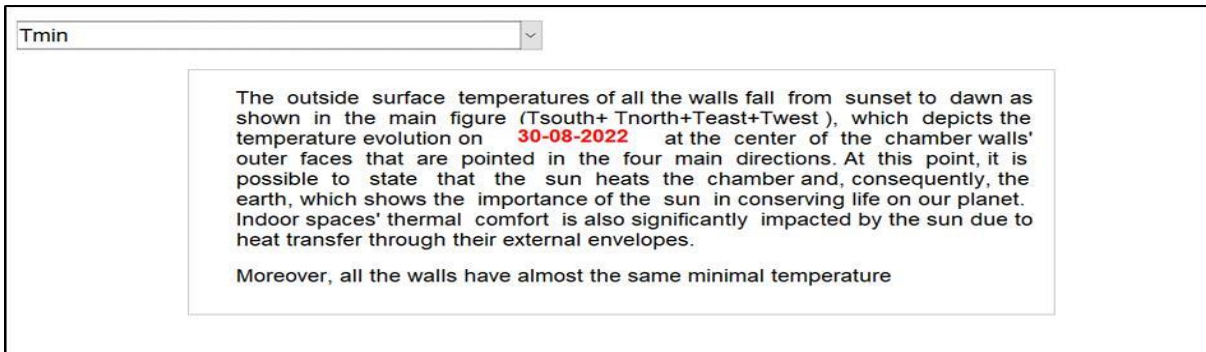


Figure 44: Résultats de l'analyse des données de Tmin pour le 30 août.

Lorsque le temps de température la plus basse (Tmin's Time) est sélectionné, l'interface calcule les temps de températures minimales du graphique choisi (le graphique principal) pour la période d'analyse spécifiée et commente le résultat obtenu. Un exemple illustratif est donné sur la figure 45 pour toute la journée du 30 août.

Lorsque la température moyenne T_{avg}. est sélectionné, l'interface calcule et compare les températures moyennes correspondant au graphique choisi (le graphique principal) pour la période d'analyse désignée. Par exemple, lorsque (T_{sud}, T_{nord}, T_{est} et T_{ouest}) est sélectionné, l'interface compare T_{avg}. pour les différentes orientations et communique le résultat sous forme de texte, où les orientations sont disposées de l'orientation qui a enregistré la température moyenne la plus élevée à l'orientation qui a enregistré la température moyenne la plus basse, comme le montre la figure 46.

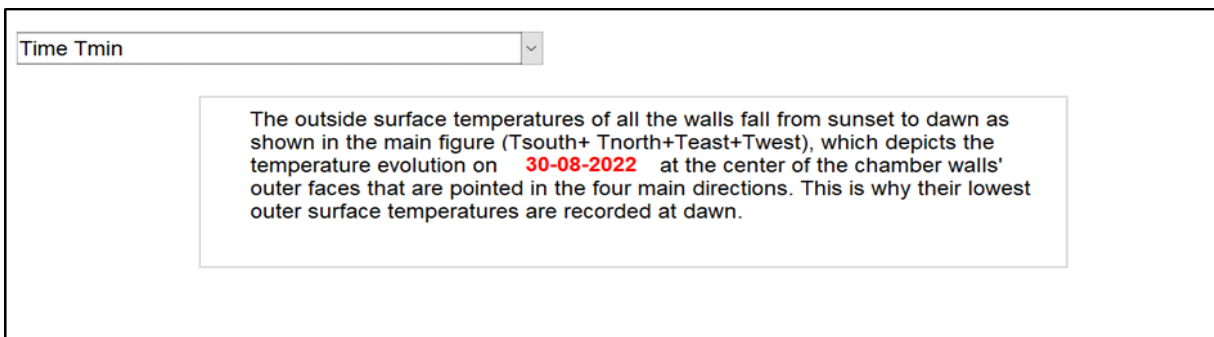


Figure 45 : Résultats de l'analyse des données temporelles de Tmin pour le 30 août sur toute la journée.

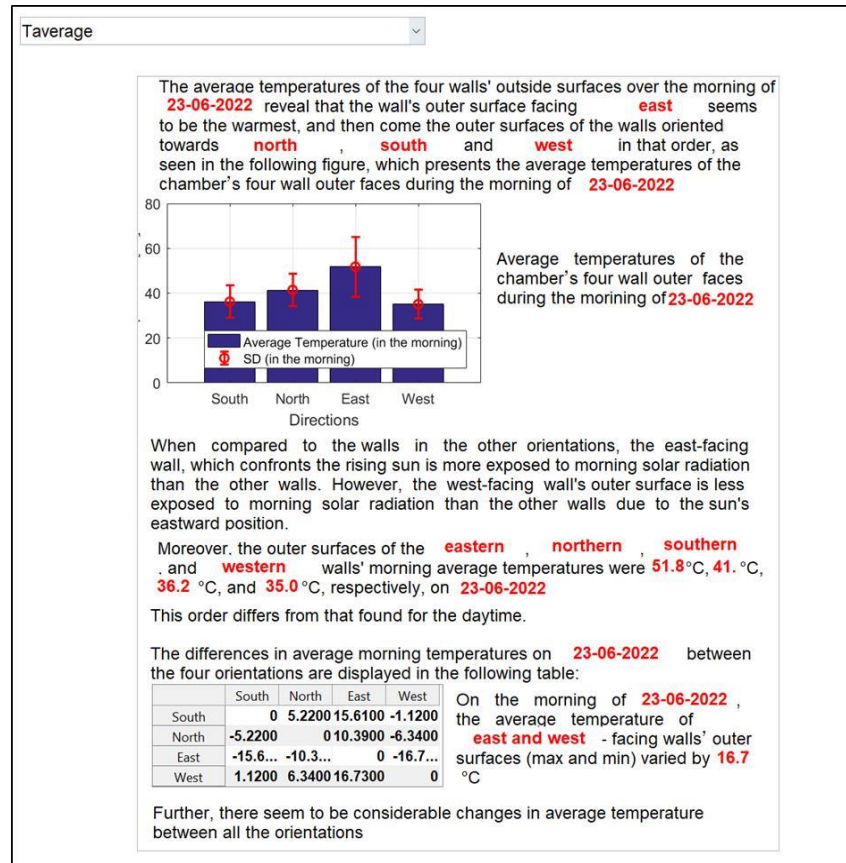


Figure 46 : Résultats de l'analyse des données de Tavg. pour la matinée du 23 juin.

L'interface affiche en outre un histogramme montrant l'effet de l'orientation sur la température moyenne des murs sur la période d'étude sélectionnée (journée, matinée, journée entière, etc.). De plus, les orientations avec des températures moyennes comparables peuvent être distinguées de celles sans utiliser l'interface développée, comme le montre la figure 47. La comparaison des résultats de Tavg. entre les périodes d'analyse spécifiées (matin et après-midi, journée et journée complète, etc.) est un autre avantage de l'interface.

Lorsque Tmax-Tmin est sélectionné, l'interface calcule et compare la différence entre les températures maximales et minimales correspondant au graphique choisi (le graphique principal) pour la période d'analyse désignée. A titre d'illustration, lorsque (T_{south}, T_{north}, T_{east} et T_{west}) est sélectionné, l'interface détermine les valeurs maximale et minimale de Tmax-Tmin et leurs orientations correspondantes. Il propose également une explication des résultats trouvés, comme le montre la figure 54, concernant la nuit du 23 juin.

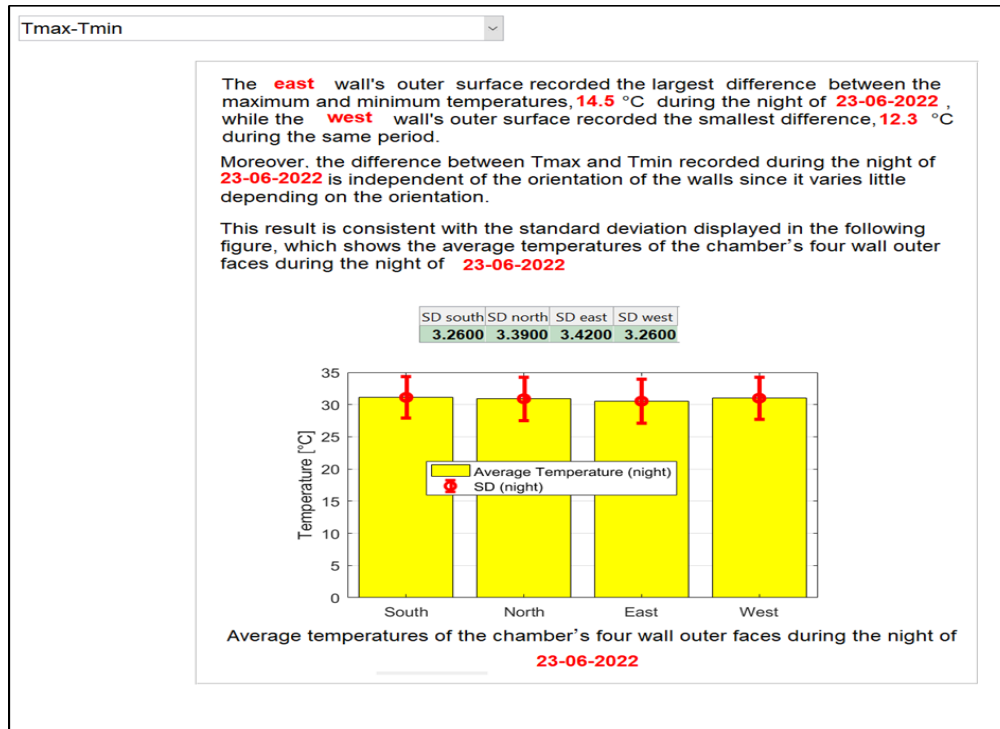


Figure 47 : Résultats de l'analyse des données de (Tmax-Tmin) dans la nuit du 23 juin .

Lorsque Tmax-Tavg. est sélectionné, l'interface calcule la différence entre les températures maximale et moyenne correspondant au graphique choisi (le graphique principal) pour la période d'analyse spécifiée. À cet égard, lorsque (Tsud, Tnord, Test et Touest) est choisi, l'interface calcule Tmax-Tavg. pour chaque orientation et présente le résultat sous forme de texte (Fig. 48), avec les orientations classées par ordre décroissant en fonction de Tmax-Tavg. (c'est-à-dire de la valeur la plus élevée à la valeur la plus basse).

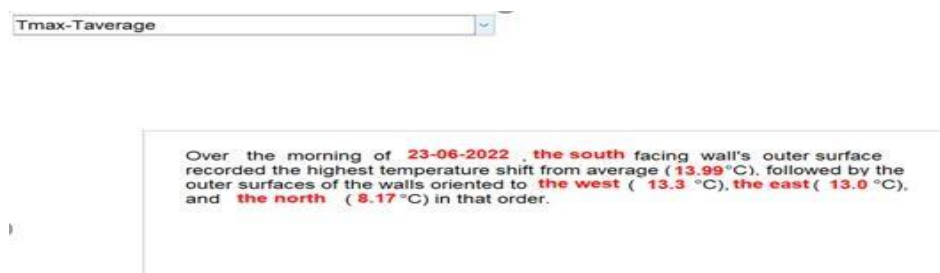


Figure 48: Résultats de l'analyse des données de (Tmax-Tavg.) pour la matinée du 23 juin .

Lorsque l'écart type (SD) est sélectionné, l'interface calcule et compare les écarts types correspondant au graphique choisi (le graphique principal) pour la période d'analyse désignée. À cet égard, lorsque (Tsud, Tnord, Test et Touest) sont choisis pour toute la journée, l'interface calcule SD pour chaque orientation pendant la journée et la nuit et les compare. Le résultat trouvé est interprété comme le montre la figure 47.

Lorsque le profil de courbe est sélectionné, l'interface décrit l'évolution des courbes obtenues dans le graphique principal pendant la période d'analyse choisie. Un exemple illustratif est donné sur la figure 48 pour toute la journée du 11 septembre.

Comme vu à travers les exemples précédents, nous avons appliqué cette interface aux résultats de l'effet de l'orientation des murs sur la température de leurs surfaces extérieures [45] pour la valider. Les résultats donnés par l'interface développée sont plus approfondis que ceux présentés dans notre étude précédente [46]. L'interface développée est donc intéressante car elle permet un traitement rapide, approfondi et précis des données manipulées. Grâce à son icône de transfert de chaleur, les utilisateurs peuvent également étudier les échanges thermiques, qui constituent l'un des principaux objectifs de la présente étude.

Lors de la sélection de l'option de transfert de chaleur, l'interface détermine graphiquement la direction du transfert de chaleur entre l'intérieur de la chambre et les surfaces extérieures de ses parois au cours de la période d'étude sélectionnée (qui comprend le jour, le matin, l'après-midi ou la nuit). Il exprime également le résultat sous forme de texte.

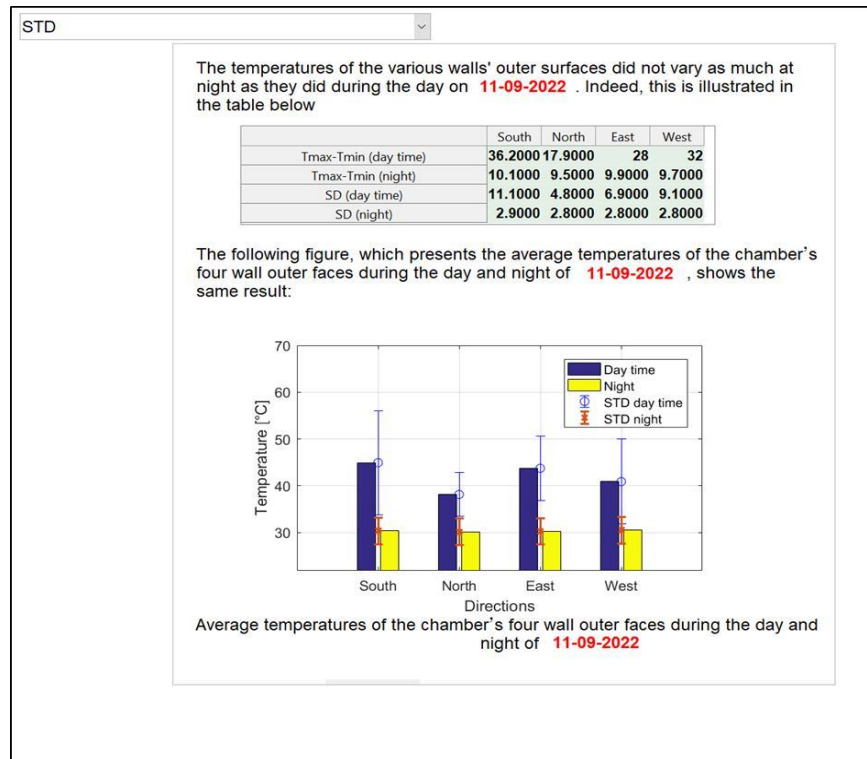


Figure 49 :Résultats de l'analyse des données de l'écart type pour toute la journée du 11 septembre.

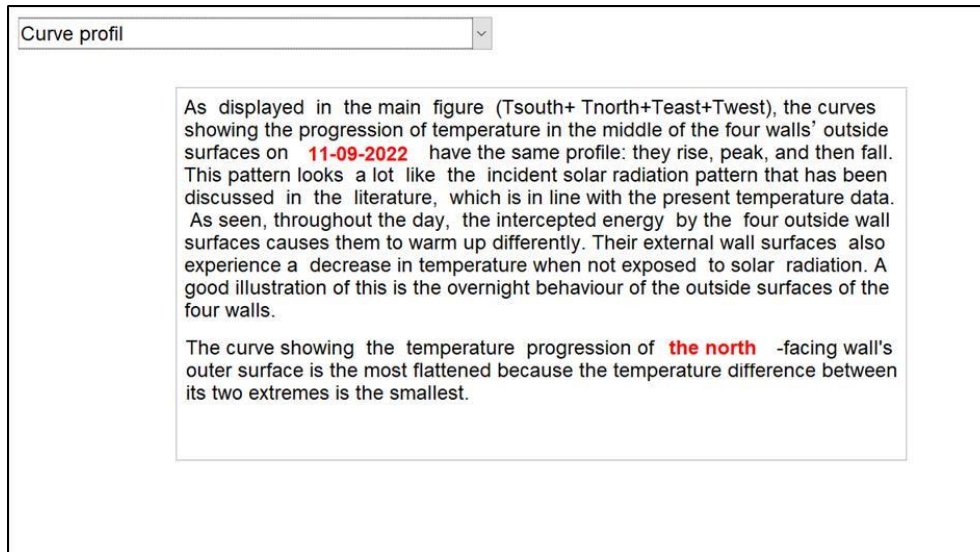
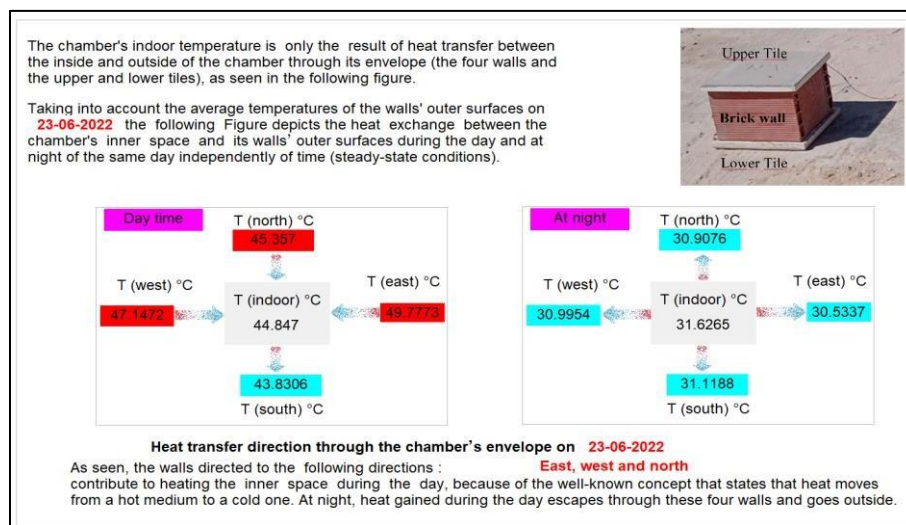


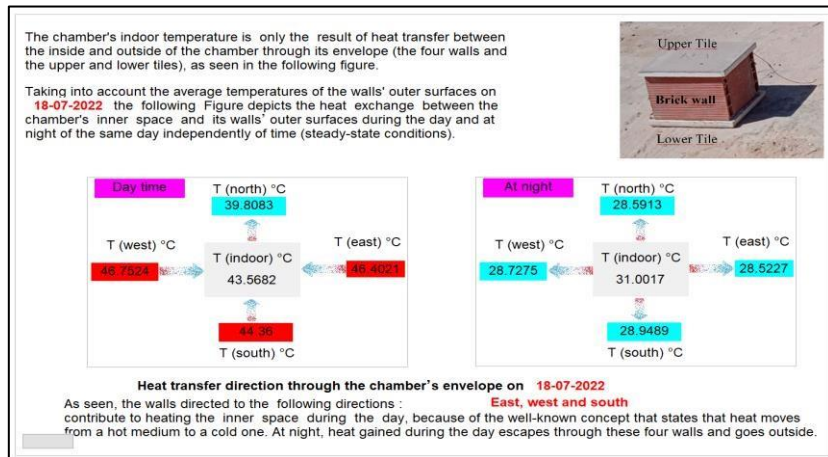
Figure 50 : Résultats de l'analyse du profil de courbe pour toute la journée du 11 septembre.

La figure 51 représente l'échange de chaleur qui se produit lors de journées représentatives fin juin, juillet et août, ainsi qu'au début septembre (la saison estivale) entre l'espace intérieur de la chambre et les surfaces extérieures de ses murs pendant la journée et à nuit du même jour.

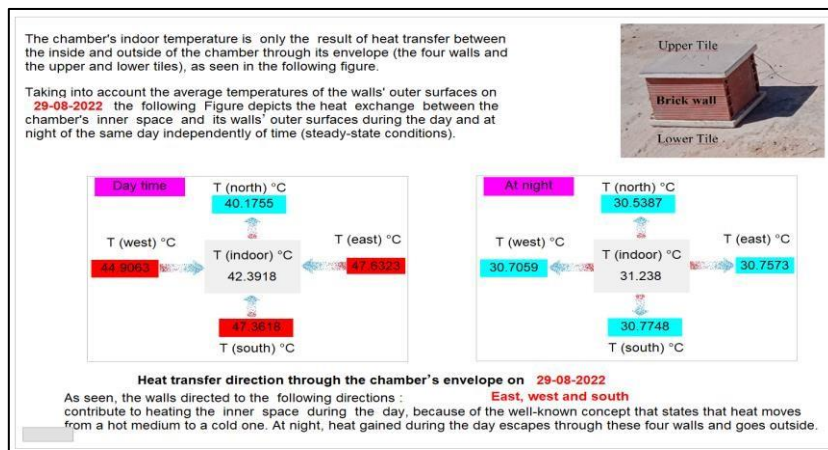
Étant donné que la chaleur se transfère naturellement d'un milieu chaud à un milieu froid, la direction du transfert de chaleur a été déterminée après avoir déterminé la température intérieure moyenne et les températures moyennes des surfaces extérieures des murs de la chambre tout au long des périodes d'étude.



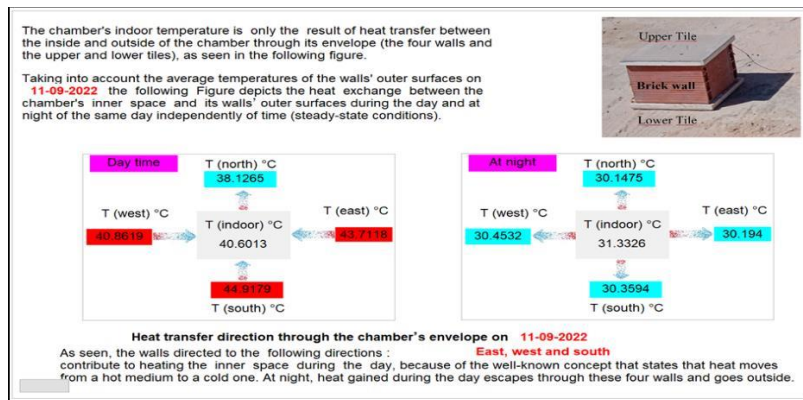
23 Juin



18 Juillet



29Août

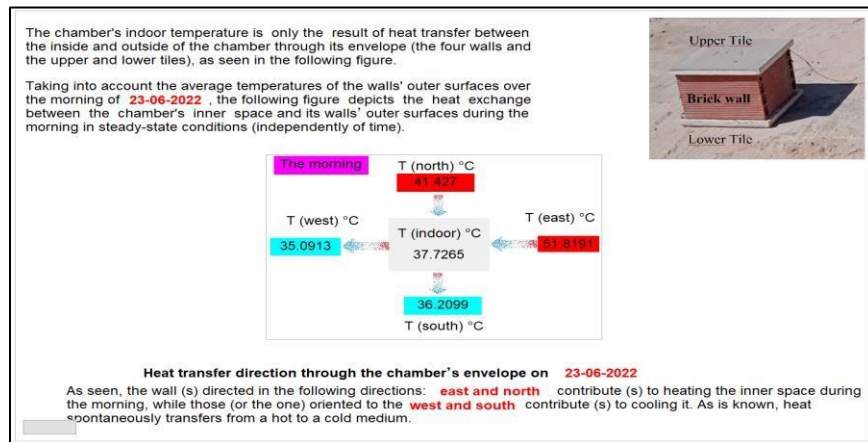


11 Septembre

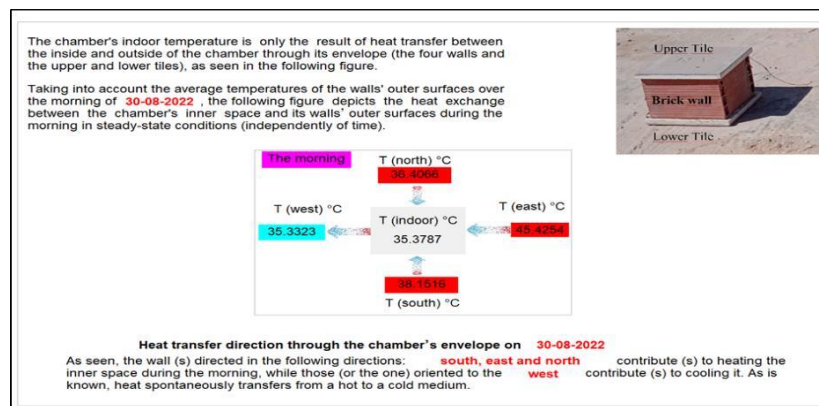
Figure 51: Échange thermique entre l'espace intérieur de la chambre et les surfaces extérieures de ses murs pendant les jours et les nuits d'été.

Comme le montre la figure 58, pendant les mois d'été, les murs orientés est, ouest et sud contribuent à chauffer la chambre, à l'exception du mois de juin, lorsque la chaleur du soleil peut pénétrer par le nord, l'est et l'ouest. murs et sortie par le mur sud. Cependant, la chaleur accumulée toute la journée s'échappe la nuit à travers les quatre murs.

La figure 52 montre l'échange thermique matinal entre l'espace intérieur de la chambre et les surfaces extérieures de ses parois lors de journées d'été typiques. Les murs orientés à l'est et au nord contribuent au chauffage matinal de la chambre en été, comme le montre la figure 52. De même, à la fin de l'été, la chaleur de l'espace est renforcée par le mur sud. Les murs orientés à l'ouest et au sud, au début de l'été, agissent comme un écran contre la chaleur matinale de l'intérieur de la chambre. À la fin de la saison, le seul mur qui contribue à rafraîchir l'espace intérieur de la chambre le matin est le mur orienté à l'ouest.



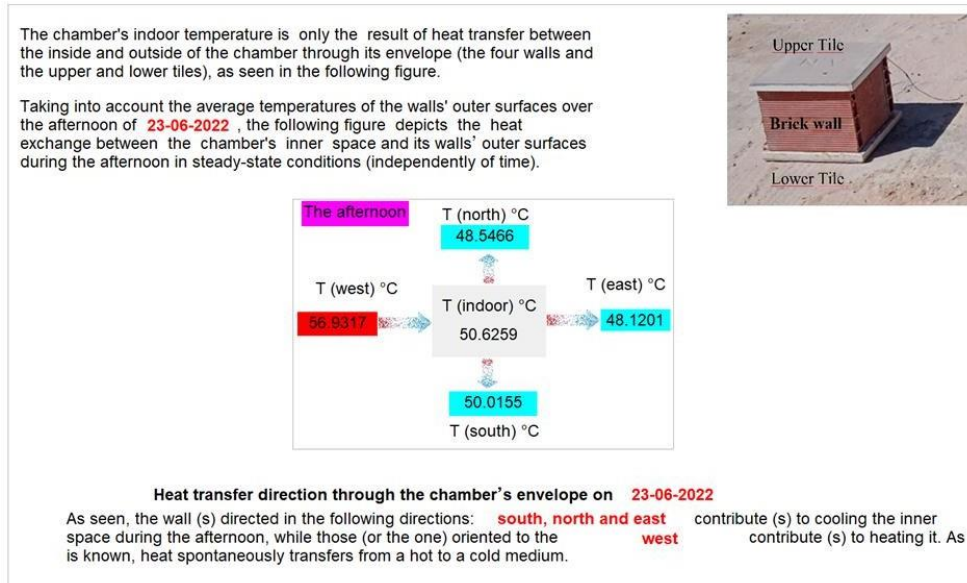
23 Juin



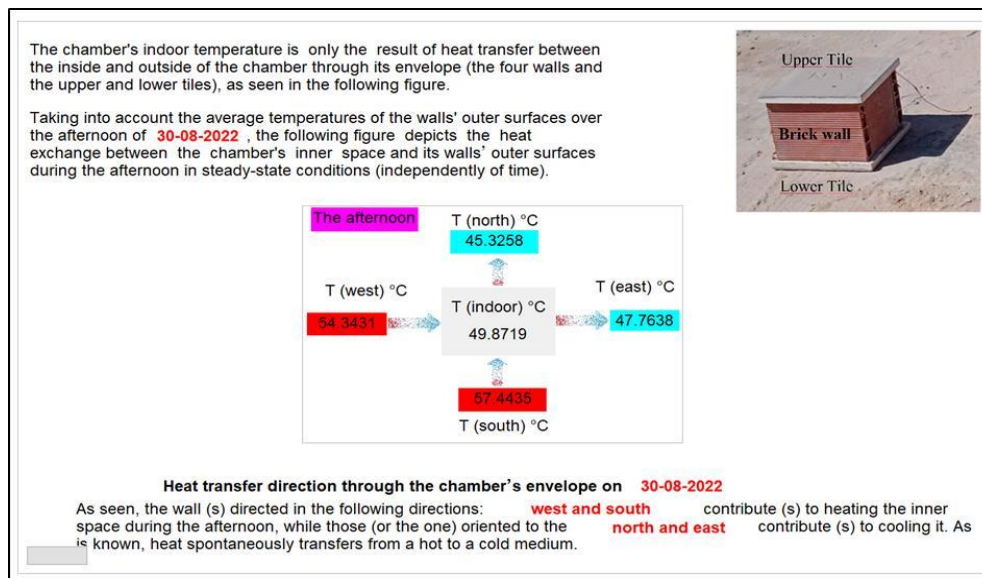
30 août

Figure 52 : Échange thermique matinal entre l'espace intérieur de la chambre et les surfaces extérieures de ses parois pendant l'été.

La figure 53 montre l'échange thermique de l'après-midi entre l'espace intérieur de la chambre et les surfaces extérieures de ses parois lors de journées d'été typiques. Contrairement au matin, les murs orientés à l'est et au nord contribuent au refroidissement de la chambre l'après-midi en été, comme le montre la figure 53. Au début de l'été, le mur sud contribue également à garder l'intérieur de la chambre plus frais. Sauf fin juin, les murs orientés ouest et sud contribuent au chauffage de la chambre l'après-midi d'été, comme le montre la figure 53.



June 23



30 août

Figure 53 : Échange thermique l'après-midi entre l'espace intérieur de la chambre et les surfaces extérieures de ses parois pendant l'été.

Conclusion

Dans ce chapitre , nous sommes concentrés sur la présentation et la définition de notre innovation consistant à développer un dispositif de mesure, de suivi, de stockage et d'analyse de la température en tant que système nouveau et innovant qui ouvrirait des portes pour faciliter et élargir le processus de recherche.

CHAPITRE IV:

AUTRES APPAREILS DÉVELOPPÉS AU COURS DE CETTE THÈSE

Introduction

Dans le domaine de la recherche scientifique et technique, l'étude des propriétés thermiques et physiques des matériaux revêt une importance cruciale. Comprendre les mécanismes de transfert de chaleur et les propriétés physiques des matériaux est essentiel pour concevoir des systèmes efficaces, développer de nouveaux matériaux et améliorer les performances des dispositifs existants. Dans cette perspective, l'utilisation d'appareils spécialisés dédiés à l'analyse des propriétés thermiques et physiques des matériaux devient indispensable.

Dans ce chapitre, nous présentons deux dispositifs avancés utilisés dans les études expérimentales :

Nous découvrirons en détail le dispositif destiné à étudier les propriétés thermiques des matériaux. Nous étudierons ses composants, son fonctionnement et ses capacités analytiques, en soulignant son importance dans la caractérisation des propriétés thermiques des matériaux, telles que la conductivité thermique, la diffusion thermique et la capacité thermique.

Nous discuterons de l'outil utilisé pour mesurer les propriétés physiques dans les études expérimentales. Nous décrirons différentes techniques de mesure et leur utilisation pour évaluer avec précision les propriétés physiques des matériaux, telles que la densité, la viscosité, l'élasticité et d'autres paramètres de base.

En combinant l'utilisation de ces deux appareils, les chercheurs et les ingénieurs peuvent acquérir une compréhension approfondie des propriétés thermiques et physiques des matériaux, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles découvertes et applications dans divers domaines allant de la science des matériaux à la conception innovante.

IV-1). Dispositif d'études des caractéristiques thermique

Dispositif de détermination des propriétés thermiques des matériaux de construction (Conductivité thermique, diffusivité thermique, capacité thermique) Figure 54 .



Figure 54 :Dispositif de détermination des propriétés thermiques des matériaux de construction (Conductivité thermique, diffusivité thermique, capacité thermique).

IV-1-a).Description de l'appareil

Ce dispositif a pour objectif principal l'étude du comportement thermique des matériaux de construction, ainsi que la détermination de leurs propriétés thermiques telles que la conductivité thermique, la diffusivité et la capacité thermique. Il a été spécifiquement conçu pour examiner la réaction des matériaux de construction à l'exposition au rayonnement solaire, ainsi que leur comportement de refroidissement nocturne en l'absence de soleil.

L'appareil se compose d'une puce électronique programmée intégrée dans un circuit électronique équipé d'un microcontrôleur, ce qui en fait un outil puissant pour assembler, afficher et effectuer des calculs visant à déterminer les propriétés thermiques des matériaux. De plus, il est doté d'un boîtier destiné à loger les échantillons à étudier, ainsi que d'une lampe simulant le rayonnement solaire.

Pour étalonner les mesures, une boîte de taille connue contenant une quantité d'air a été utilisée, permettant ainsi le calcul et la détermination de la capacité et de la conductivité thermiques en considérant l'air comme un fluide idéal. En outre, les valeurs obtenues peuvent être affichées en temps réel sur l'écran de l'ordinateur.

IV-1-b).Caractéristiques de l'appareil

- Appareil robuste, de haute gamme,
- Appareil de taille réduite et léger, ce qui permet de le déplacer facilement.
- Facilité et simplicité de la mise en œuvre,
- Affichage des mesures acquises sur écran d'ordinateur : Les mesures effectuées sont affichées sur l'écran d'ordinateur attaché au dispositif conçu sous forme de tableaux et de courbes. Ces dernières facilitent l'analyse et la compréhension des résultats obtenus.
- Analyse automatique des données : l'appareil est programmé pour analyser automatiquement les données collectées, ce qui vous fait gagner du temps et des efforts.

En résumé, cet appareil est un outil puissant et efficace pour étudier le comportement thermique des matériaux et de déterminer leurs propriétés thermiques. Grâce à ses diverses fonctionnalités et à sa facilité d'utilisation, il peut aider les chercheurs et les ingénieurs à mener des expériences précises et efficaces et à analyser les données rapidement et avec précision.

IV-1-c).Comment ça fonctionne

Des capteurs de température sont placés sur les deux faces extrêmes de l'échantillon (en haut et en bas) et la prise des températures est acquise avant l'allumage de la lampe halogène pendant un certain temps pour s'assurer de l'homogénéité des températures à travers l'échantillon.

On allume ensuite la lampe pour étudier le comportement thermique du matériau à tester (à travers son échantillon) sous l'effet du rayonnement de la lampe et cela en mesurant les températures sur les deux faces de l'échantillons. Une fois que le régime permanent est atteint, on éteint la lampe et

l'appareil continue à enregistrer les températures sur les deux faces de l'échantillon pendant une durée bien déterminée.

L'échantillon à tester est placé au-dessus d'une chambre isolée thermiquement et munie d'un capteur de température afin d'étudier le transfert de chaleur à travers le matériau à tester et son refroidissement et de déterminer la capacité thermique du matériau testé selon les lois de la thermodynamique.

Une fois terminé, les résultats enregistrés sont analysés et les propriétés thermiques sont déterminées et affichées sur l'écran de l'ordinateur attaché à l'appareil.

IV-2). Outil polyvalent pour le suivi, l'affichage et le calcul des valeurs physiques dans divers contextes expérimentaux (eddis1.0)

Cette appareil joue un très importante rôle dans les études expérimentales ,elle permet un très maitrisé de la manipulation et bien comprendre l'effet des paramètres physique l'un des autres, par exemple (l'effet de la vitesse de vent sur la chaleur de mur , ou bien l'effet de l'intensité des rayonnement solaire sur la température en fonction de position et en fonction de l'orientation et l'effet de cette dernière sur la propagation de la chaleur dans la maisonetc) et ces paramètres sont précise selon les cas d'études (figure 55).

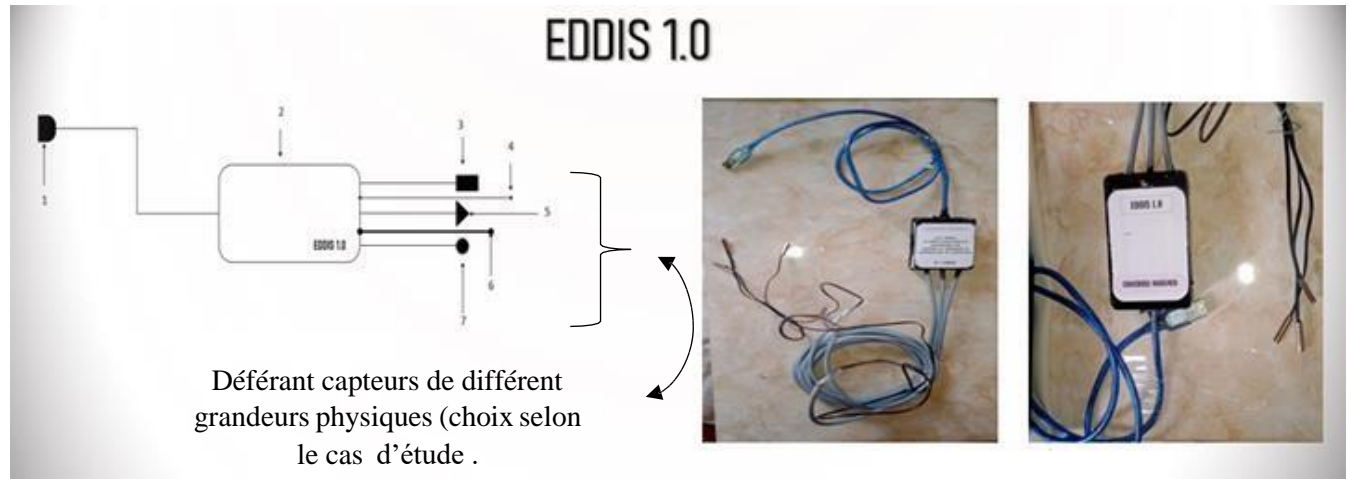


Figure 55 :EDDIS 1.0.

IV-2-a). Objectif de l'invention

1. Regrouper plusieurs fonctionnalités dans un seul appareil.
2. Numériser les laboratoires de recherche et améliorer l'efficacité des études.
3. Prendre des mesures précises et améliorer la qualité des expériences pour les valeurs physiques étudiées (température, pression, humidité, valeurs électriques, vitesse du vent, débit, etc.) selon les besoins de l'expérience.
4. Prendre un certain nombre de mesures précises de la valeur physique étudiée en même temps (contrôlées selon les besoins de l'expérience).
5. Réaliser des expériences permettant de comparer l'influence des différents facteurs entre eux (par exemple, l'intensité du rayonnement sur la chaleur, la diversité des matériaux sur le transfert thermique, l'humidité sur la pression, etc.).
6. Effectuer des mesures précises dans n'importe quel milieu (liquide, solide, gazeux).
7. Prendre des mesures précises quelles que soient les conditions extérieures (pluie, soleil, neige, vent, etc.) sans que le chercheur ait besoin d'être présent en permanence dans ces conditions.

8. Faciliter également certaines études (par exemple, les changements de température en fonction de la profondeur sous la surface de la terre et l'observation en temps réel).
9. Prendre des mesures à des intervalles de temps définis (une seconde, une minute, une heure, etc.).
10. Analyser les mesures.
11. Afficher les valeurs sous forme de graphiques ou de valeurs numériques.

IV-2-b). Description de l'appareil

L'appareil se compose d'une puce électronique programmée intégrée à un circuit électronique avec un microcontrôleur pour la mesure, l'affichage et l'exécution d'opérations mathématiques. Il a la capacité d'effectuer plusieurs opérations simultanément. La puce contient un programme qui peut être modifié selon les besoins (activation et désactivation) et est compatible avec plusieurs capteurs selon les besoins de l'expérience. L'écran de l'ordinateur est utilisé pour afficher les graphiques. Les capacités de l'ordinateur sont utilisées pour les opérations complexes qui dépassent sa capacité de calcul et sa vitesse d'exécution, car il est intrinsèquement très performant. L'appareil est programmé pour analyser les données collectées et les afficher sur l'ordinateur.

IV-2-c). Fonctionnement de l'appareil

- 1. Mise en place des capteurs :** Les capteurs sont placés sur les éléments dont la grandeur physique doit être déterminée, qu'il s'agisse de la température, de l'humidité, de la distance, etc.
- 2. Démarrage de l'appareil :** L'appareil est mis en marche en connectant le câble USB à l'ordinateur.
- 3. Suivi et affichage des résultats:** Les valeurs mesurées par les capteurs sont transmises à l'ordinateur et affichées en temps réel sur l'écran.
- 4. Enregistrement des données:** Les valeurs mesurées peuvent être enregistrées sur l'ordinateur pour une analyse ultérieure.
- 5. Analyse des résultats:** Une fois l'expérience terminée, les données enregistrées sont analysées pour obtenir les conclusions souhaitées.

Conclusion

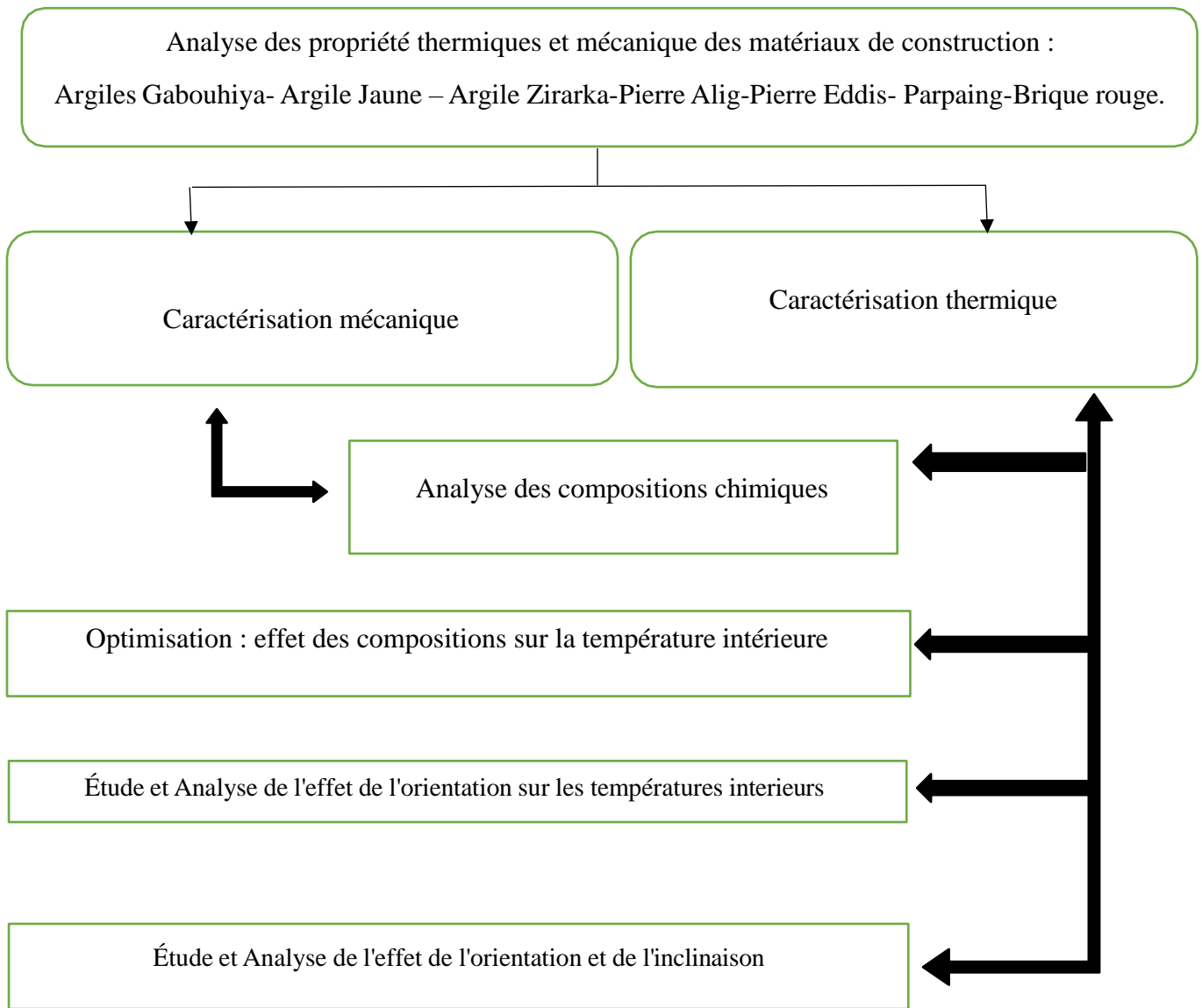
Les appareils développés jouent un rôle fondamental dans toutes les études impliquant l'analyse de différentes valeurs physiques pour étudier des propriétés spécifiques. Ils sont considérés comme indispensables dans tout laboratoire universitaire.

Grâce à tout ce qui précède, notre travail dans ce mémorandum ne se limite pas seulement à une étude traditionnelle, mais plutôt à l'innovation de nouveaux dispositifs qui ouvriront la voie à la recherche et au développement scientifiques.

CHAPITRE V :
RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la partie des résultats de caractérisations expérimentales et de l'analyse et interprétations des différentes mesures réelles. Il fait partie essentielle de cette thèse du fait qu'il expose le volet réalisation et concrétisation de l'étude qui cerne l'objectif principal de proposer des solutions techniques faisant preuve des améliorations du comportement thermique des bâtiments. En étudiant les propriétés mécaniques et thermiques des matériaux de construction les plus utilisés en Algérie que ce soit dans le passé ou actuellement nos travaux concernent l'étude des propriétés thermique dans une atmosphère réelle présentant les effets climatiques des grandes chaleurs et des fraîcheurs en générale. Ces caractérisations mènent à optimiser l'exploitation des matériaux en fonction de leur réponse thermique et mécanique. La présentation des parties des résultats est organisée suivant le diagramme :



Les caractérisations passent par les 03 phases :

La caractérisation mécanique concerne les essais de flexion et de compression sur des échantillons issus des matériaux cités dans le diagramme en utilisant des éprouvettes dédiées aux machines de caractérisation selon leurs normes.

L'analyse des compositions chimique par fluorescence de rayons X donnant les fractions quantitatives des éléments composants les échantillons.

La caractérisation thermique concerne les mesures de la conductivité et de la résistivité thermique des échantillons.

Ces 03 phases contiennent des données liées expliquant avec précision chaque propriété mesurée. Les compositions chimiques donnant les fractions quantitatives des constituant nous renseignent encore plus sur la lecture, l'interprétation et l'analyse des résultats pour chaque phase.

Ces phases sont complétées par d'autres caractérisations qui se résument comme suit :

- Etude de l'effet du matériau sur la température intérieure élargie à d'autres familles de matériaux.
- Etude de l'effet de l'orientation sur la température des murs : Elle permet l'examen en détail de l'effet de l'orientation des surfaces composant les murs par rapport au rayonnement solaire sur la température moyenne mesurée sur un point milieu d'un mur. Étant donné que l'orientation et la pente du toit jouent un rôle crucial dans la détermination de ses performances thermiques, les bâtiments présentant de bonnes performances thermiques nécessitent une attention particulière à l'influence de la lumière solaire. La quantité de rayonnement solaire qu'un bâtiment reçoit affecte directement la température de l'air intérieur, les besoins de refroidissement et le confort des occupants [47]. L'optimisation de l'orientation permet concrètement pour clarifier les paramètres les plus influents conduisant à des amélioration d'isolation.
- Analyse de l'effet de la direction et de l'inclinaison de la toiture sur le rayonnement solaire incident. Cette partie examine l'effet de l'orientation et de l'inclinaison de la surface sur la quantité de rayonnement solaire incident. Les mesures ont été réalisées dans la province de M'sila (Algérie) durant les mois de février à juin 2020. Une série d'expériences utilisant un héliomètre (Solarimètre) et un dispositif de variation de l'inclinaison par rapport à la verticale permettant d'ajuster l'angle d'inclinaison des surfaces. Un nombre d'angles d'inclinaison compris entre 0° et 90° est utilisé avec un pas de variation pour les quatre directions principales, nord, sud, est et ouest, ont été étudiés et les résultats obtenus ont été soumis à une analyse statistique permettant l'exploitation plus fine des résultats pour l'optimisation des structures. La réduction de la consommation peut être effective lorsqu'on regroupe toutes ces données avec celles des phases précédentes.

La meilleure compréhension des phénomènes thermiques induisant une bonne optimisation nécessite l'examen des paramètres thermique, la résistance, la capacité et le flux pour déterminer la performance thermique globale des matériaux de construction. En analysant ces propriétés, nous pouvons mieux appréhender l'interaction de ces matériaux avec leur environnement thermique et leur contribution potentielle à la conception de bâtiments durables et économes en énergie. Des références pertinentes seront citées tout au long de cette étude pour étayer nos conclusions [48,49].

Résultats :

V-1) Analyse de la résistance à la compression et à la flexion

Trois types d'argile et un type de pierre utilisés dans les constructions anciennes ont été utilisés. Ces matériaux ont été extraits de vieilles maisons (argile jaune, argile de Gabouhia, argile de Zirarka, et pierre Alig) ont été conçues selon les normes de l'équipement de caractérisation (taille de 16 x 4 x 4 cm).

Le laboratoire de l'entreprise LAFARGE (Msila) nous ont autorisé à faire tout les essais mécaniques possibles. Le tableau 3 résume l'ensemble des résultats obtenus.

Tableau 3. : Résistance à la compression et à la flexion des échantillons

	Limite à la compression (N/mm ²)	Limite à la flexion (N/mm ²)
PIERRE DE L' ALIG	39,6	9,8
ARGILE JAUNE	2,5	0,8
ARGILE ZIRARKA	2,9	0,8
ARGILE GABOUHIYA	0,85	0,4

La pierre de l'alig affiche la limite de compression la plus élevée, à 39,6 (N/mm²), indiquant ainsi sa capacité à supporter une pression de 39,6 (N/mm²) avant de se déformer ou de se rompre. À l'opposé, l'argile de gabouhiya possède une limite de compression la plus faible, avec seulement 0,85 (N/mm²), ce qui signifie qu'il ne peut supporter qu'une pression de 0,85 (N/mm²) avant de subir une déformation ou de se rompre.

La pierre de l'alig affiche également la limite de flexion la plus élevée, à 9,8 (N/mm²), ce qui indique sa capacité à supporter une flexion de 9,8 (N/mm²) avant de se déformer ou de se rompre. À l'inverse, l'argile de gabouhiya présente la limite de flexion la plus basse, à seulement 0,4 (N/mm²), signifiant qu'il peut supporter une flexion de seulement 0,4 MPa avant de subir une déformation ou de se rompre.

Il est clair d'après le tableau que la pierre de l'alig se distingue comme le plus résistant à la compression et à la flexion, tandis que l'argile de gabouhiya montre la plus faible résistance dans les deux cas. Quant à l'argile jaune et l'argile de zirarka, ils présentent des propriétés intermédiaires.

Ces résultats s'avèrent précieux pour choisir le matériau adéquat selon l'application visée. Par exemple, pour une application nécessitant une forte résistance à la compression, la pierre de l'alig serait préférable. De même, pour une utilisation exigeant une résistance élevée à la flexion, la pierre de l'alig serait également un choix judicieux, sans oublier que les pierres naturelles sont généralement plus résistantes mécaniquement que l'argile, en raison de leur formation géologique et de leur structure cristalline. Les conditions climatiques jouent un rôle critique dans leur formation et leur durabilité, influençant ainsi leur utilisation dans la construction et d'autres applications.

V-2) Analyse de la composition chimique

Trois types de briques d'argile ont été prises comme échantillons de références sous les noms (argile jaune extraite d'une vieille maison située à Eddis, argile Gabouhiya extraite d'une vieille maison située à Gabouhiya et argile Zirarka extraite d'une vieille maison (ZIRARKA). Toutes ces villes sont situées dans la région de d'Al-Masila, et la pierre d'Al-Alig provient d'une maison du quartier d'Al-Alig à Bou Saada, et pierre d'eddis , en plus des blocs de béton et des briques rouges.

La détermination qualitative et quantitative des compositions chimiques de nos échantillons s'est faite avec un outil de fluorescence X mis à notre disposition par le laboratoire de l'entreprise LAFARGE. Comme décrit au chapitre 2 la fluorescence permet de déterminer les éléments chimiques par l'analyse du spectre d'émission de l'échantillon comparé à des spectres de raies caractéristiques des éléments présent dans l'échantillon. L'analyse des intensités des raies la composition chimique et la résistance à la compression et à la flexion sont présentées dans les tableaux (4).

Tableau 4 : Composition chimique des différents échantillons.

Analyse chimique									
	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	SO3	K2O	Na2O	Somme
PARPAING	21,46	1,91	2,5	53,44	1,59	0,32	0,3	0,1	81,62
BRIQUE ROUGE	60,45	10,26	5,86	9,17	2,85	0,85	1,63	0,6	91,64
ARGILE JAUNE	20,92	6,15	1,24	35,26	0,31	0	0,65	0,07	64,6
ARGILE GABOUHIYA	53,91	3,73	2,42	21,63	2,21	2,5	0,55	0,04	86,99
ARGILE ZIRARKA	47,05	7,31	2,87	19,36	1,08	5,55	1,21	0,2	84,63
PIERRE ALIG	3,72	0,63	0,27	51,2	0,88	3,87	0,28	0,05	60,9
PIERRE EDDIS	6,63	2,04	1,13	48,9	0,95	0,37	27	0,07	87,09

Nous avons prélevé 10 grammes de chaque échantillon après l'avoir broyé pour cette analyse, comme décrit au deuxième chapitre.

Comme le montre clairement les résultats du tableau 4, la plupart des matériaux étudiés diffèrent dans leur composition chimique, ce qui explique fondamentalement les différences dans leurs propriétés mécaniques.

a) .Le parpaing

Le parpaing est un matériau de construction généralement fabriqué à partir de béton de ciment, de sable et de gravier. La composition chimique du parpaing analysé dans le tableau est la suivante :

SiO₂ (Silice) - 21,46% : C'est le composant principal du parpaing, il apporte la rigidité et la résistance à la compression. Sa teneur élevée confère au parpaing une bonne résistance mécanique.

Al₂O₃ (Alumine) - 1,91% : L'alumine améliore la durabilité et la résistance à la chaleur du parpaing. Sa teneur modérée contribue à la solidité du matériau.

Fe₂O₃ (Oxyde de fer) - 2,5% : L'oxyde de fer donne sa couleur grise au parpaing et améliore sa résistance à la compression. Sa présence en quantité modérée renforce la solidité du matériau.

CaO (Chaux) - 53,44% : La chaux est le liant qui permet de compacter les granulats et assure la cohésion du parpaing. Sa teneur élevée confère une bonne résistance mécanique et une bonne résistance à l'eau au parpaing.

MgO (Oxyde de magnésium) - 1,59% : L'oxyde de magnésium améliore la résistance à la chaleur et à la compression du parpaing. Sa teneur modérée contribue à la solidité et à la durabilité du matériau.

SO₃ (Anhydride sulfurique) - 0,32% : L'anhydride sulfurique peut avoir un effet négatif sur la durabilité du parpaing en cas de présence excessive. Sa faible teneur dans ce cas ne pose pas de problème majeur.

K₂O (Oxyde de potassium) - 0,3% & Na₂O (Oxyde de sodium) - 0,1% : Ces alcalins peuvent affecter la résistance à l'eau du parpaing en cas de teneur élevée. Leurs faibles teneurs respectives n'ont pas d'impact significatif.

la composition chimique du parpaing lui confère une bonne résistance mécanique, une bonne durabilité et une bonne résistance à l'eau.

b) .La Brique rouge

SiO₂ (Silice) - 60,45% : La silice est le composant principal de la brique rouge, elle apporte la rigidité et la résistance à la compression. Sa teneur élevée confère à la brique une bonne résistance mécanique.

Al₂O₃ (Alumine) - 10,26% : L'alumine améliore la durabilité et la résistance à la chaleur de la brique. Sa teneur modérée contribue à la solidité et à la résistance à la chaleur du matériau.

Fe₂O₃ (Oxyde de fer) - 5,86% : L'oxyde de fer donne sa couleur rouge à la brique et améliore sa résistance à la compression. Sa présence en quantité modérée renforce la solidité du matériau.

CaO (Chaux) - 9,17% : La chaux est un liant naturel présent dans l'argile qui assure la cohésion de la brique. Sa teneur modérée confère une bonne résistance mécanique à la brique.

MgO (Oxyde de magnésium) - 2,85% : L'oxyde de magnésium améliore la résistance à la chaleur et à la compression de la brique. Sa teneur modérée contribue à la solidité et à la durabilité du matériau.

SO₃ (Anhydride sulfurique) - 0,85% : L'anhydride sulfurique peut avoir un effet négatif sur la durabilité de la brique en cas de présence excessive. Sa faible teneur dans ce cas ne pose pas de problème majeur.

K₂O (Oxyde de potassium) - 1,63% & Na₂O (Oxyde de sodium) - 0,6% : Ces alcalins peuvent affecter la résistance à l'eau de la brique en cas de teneur élevée. Leurs faibles teneurs respectives n'ont pas d'impact significatif).

la composition chimique de la brique rouge lui confère une bonne résistance mécanique, une bonne durabilité, une bonne résistance à la chaleur et une certaine résistance à l'eau.

c) . Les trois type d'argile (argile jaune , argile gabouhiya, argile zirarka)

Les trois (argile jaune, argile gabouhiya et argile Zararka) ont une composition chimique différente. :

L'argile jaune est riche en CaO (oxyde de calcium) et pauvre en SiO₂ (dioxyde de silicium) et Al₂O₃ (oxyde d'aluminium).

En raison de sa composition, l'argile jaune est souvent utilisée comme liant dans la fabrication de briques et de carrelages. CaO contribue à la formation de liaisons chimiques fortes lors de la cuisson, garantissant la résistance et la durabilité des produits finaux.

L'argile de gabouhiya est riche en MgO (oxyde de magnésium) et en SO₃ (trioxyde de soufre).

L'argile gabouhiya est connue pour ses propriétés absorbantes dues à sa composition chimique spécifique. Il est utilisé comme agent absorbant dans la purification de l'eau, où MgO et SO₃ jouent un rôle crucial dans l'absorption des polluants et des impuretés présents dans l'eau.

Argile de Zararka Composition chimique Riche en SiO₂ (dioxyde de silicium) et K₂O (oxyde de potassium). L'argile Zirarka a une composition riche en SiO₂ et K₂O, ce qui lui confère des propriétés adaptées à une utilisation dans les peintures et revêtements. Le SiO₂ contribue à renforcer la structure des peintures, tandis que le K₂O peut agir comme stabilisant et modifier les propriétés de surface de la peinture.

Les différences de composition chimique entre l'argile jaune, l'argile Gabouhiya et l'argile Zararka conduisent à des applications spécifiques dans divers secteurs industriels, où chaque type d'argile est utilisé scientifiquement en fonction de ses propriétés physiques et chimiques distinctives, en plus de son utilisation dans la construction.

V-2 -1). Impact de la composition chimique sur les propriétés thermiques et mécaniques des argiles jaune , argile de gabouhiya et argile de zirarka .

a). La Conductivité thermique

En général, l'argile a une faible conductivité thermique mais cette propriété peut varier car la conductivité thermique de l'argile dépend en grande partie de sa composition chimique, notamment de la présence de certains minéraux comme SiO₂ (dioxyde de silicium), CaO (oxyde de calcium) et MgO. (l'oxyde de magnésium). .

La présence notable de CaO dans l' **Argile jaune** pourrait induire une conductivité thermique légèrement supérieure à celle des argiles de gabouhiya et argile de zirarka.

La teneur élevée en MgO de l'**argile de gabouhiya** pourrait entraîner une conductivité thermique légèrement inférieure à celles des argiles jaune et argile de zirarka .

L'abondance de SiO₂ dans l'argile **de zirarka** pourrait conférer une conductivité thermique légèrement plus élevée que celles des argiles jaune et argiles de gabouhiya .

b). Capacité calorifique et Diffusivité thermique

Bien que l'argile ait tendance à avoir une faible diffusion thermique ainsi que sa capacité thermique globale, elle peut être affectée par sa composition chimique, de manière légère et insignifiante, sans perdre sa propriété première.

c). Résistance à la compression

La microstructure et la composition chimique de l'argile, ainsi que sa densité, sont l'un des facteurs qui déterminent la résistance à la compression à laquelle l'argile peut résister. En général, les argiles riches en SiO₂ et Al₂O₃ présentent un stress plus élevé que celles riches en CaO et MgO.

L'Argile jaune : La prédominance de CaO dans l'argile jaune peut conduire à une résistance à la compression légèrement inférieure à celle de l'argile zararka, ce qui est cohérent avec les résultats du tableau 3.

L'Argile de Jabuhia : En raison de sa teneur élevée en oxyde de magnésium, l'argile de Jabuhia peut avoir une résistance à la compression inférieure à celle de l'argile jaune et de l'argile de Zararka, ce qui est également cohérent avec les résultats expérimentaux du tableau3.

L' Argile de Zirarka : Grâce à sa forte concentration en SiO₂ et Al₂O₃, l'argile de Zarqa peut avoir une résistance à la compression plus élevée que l'argile jaune et l'argile de Gabouhiya , et cela est également cohérent avec les résultats du tableau3.

d). Résistance à la traction

Tout comme la résistance à la compression, la résistance à la traction de l'argile dépend de divers facteurs, notamment de sa composition chimique. De manière générale, les argiles riches en SiO₂ et Al₂O₃ sont plus résistantes que celles riches en CaO et MgO.

Argile jaune : La présence d'un pourcentage élevé de CaO dans l'argile jaune peut entraîner une résistance à la traction légèrement inférieure à celle des argiles Gabouhiya et Zarqa.

Argile Gabouhiya : En raison de sa teneur élevée en oxyde de magnésium, l'argile Gabouhiya peut avoir une résistance à la traction inférieure à celle de l'argile jaune et de l'argile zararka.

Argile zirarka: Avec son abondance de SiO₂ et Al₂O₃, l'argile de zirarka peut présenter une résistance à la traction légèrement supérieure ou égale à celle de l'argile jaune. Ceci est confirmé par les résultats du tableau 3.

Tableaux 5 : comparaison de la composition chimique des trois argile(jaune ,et celle de gabouhiya et zirarka).

Élément	Argile jaune	Argile Gabouhiya	Argile Zirarka	Différence maximale
SiO ₂	20,92 %	53,91 %	47,05 %	32,99 %
Al ₂ O ₃	6,15 %	3,73 %	7,31 %	3,58 %
Fe ₂ O ₃	1,24 %	2,42 %	2,87 %	1,63 %
CaO	35,26 %	21,63 %	19,36 %	15,90 %
MgO	0,31 %	2,21 %	1,08 %	1,90 %
SO ₃	0,00 %	2,50 %	1,21 %	2,50 %
K ₂ O	0,65 %	0,55 %	0,20 %	0,45 %
Na ₂ O	0,07 %	0,04 %	0,20 %	0,13 %

Le tableau montre que les trois types d'argile ont des compositions chimiques différentes. Ces différences de composition conduisent à des propriétés et des utilisations différentes comme mentionné précédemment.

En conclusion préliminaire et sur la base des résultats de l'analyse chimique, nous pouvons dire que la composition chimique de l'argile jaune, de l'argile de Gabouhiya et de l'argile de Zararka a un impact significatif sur leurs propriétés thermiques et mécaniques. Les argiles jaunes riches en CaO peuvent avoir une conductivité thermique légèrement supérieure et des résistances à la compression et à la traction légèrement inférieures à celles des argiles Jabuhia et des argiles Zararka. L'argile Jabuhia riche en oxyde de magnésium peut avoir une conductivité thermique légèrement inférieure et une résistance à la compression et à la traction légèrement inférieure à l'argile jaune et à l'argile zararka. Les argiles de Zararka riches en SiO₂ et Al₂O₃ peuvent avoir une conductivité thermique légèrement supérieure et des résistances à la compression et à la traction légèrement supérieures aux argiles jaunes et aux argiles Gabouhiya .

En effet, Les composants chimiques qui forment et caractérisent l'argile déterminent sa structure et sa forme microscopique, ce qui lui confère la propriété de résistance à la pression et à la flexion. Ces liaisons sont souvent résumées dans les types suivants - liaisons covalentes / liaisons ioniques / liaisons hydrogène / liaisons cationiques. - la liaison - car ils diffèrent entre eux par leur résistance, leur durabilité et leur degré de conductivité également.

Le pourcentage de présence de composés chimiques détermine également le type et le nombre de liaisons qui se forment, ce qui explique également le comportement mécanique différent des différents matériaux étudiés.

V-2-2). Analyse de la composition chimique des deux types de pierre :

La détermination qualitative et quantitative des deux types de pierre (Alig et Eddis) avec la fluorescence X mis à notre disposition par le laboratoire de l'entreprise LAFARGE nous donne les résultats suivants :

Tableaux 6 : composition chimique des deux pierre étudier .

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
PIERRE ALIG	3,72	0,63	0,27	51,2	0,88	3,87	0,28	0,05
PIERRE EDDIS	6,63	2,04	1,13	48,9	0,95	0,37	27	0,07

Le tableau montre la composition de deux roches, Pierre del Aleg et Pierre de Ides, en oxydes minéraux. Les oxydes sont des composés formés par la combinaison d'un métal avec de l'oxygène. Les oxydes métalliques sont des composés ioniques, ce qui signifie qu'ils sont formés par attraction électrostatique entre des ions métalliques positifs et des ions oxygène négatifs.

Si l'on compare les composés des deux pierres et des trois types d'argile, on voit clairement une différence, notamment dans les proportions de K₂O et SiO₂.

Pierre EDDIS est plus riche en oxydes de potassium (K₂O) que Pierre Alig. En effet, la teneur en K₂O de Pierre EDDIS est de 27,00%, alors que celle de Pierre Alig n'est que de 0,28%. Pierre EDDIS est également plus riche en oxydes de silicium (SiO₂) et d'aluminium (Al₂O₃) que Pierre Alig.

De par sa composition, Pierre EDDIS peut être classée comme roche granitique, tandis que Pierre Alig peut être classée comme roche calcaire. Les roches granitiques sont généralement riches en silicium, aluminium et potassium, tandis que les roches calcaires sont riches en calcium.

Tableaux 7 : Comparaison de la composition chimique des deux pierres étudier (Eddis et Alig).

Oxyde	Pierre de l'Alig	Pierre d' Eddis	Différence
SiO ₂	3,72 %	6,63 %	+2,91 %
Al ₂ O ₃	0,63 %	2,04 %	+1,41 %
Fe ₂ O ₃	0,27 %	1,13 %	+0,86 %
CaO	51,20 %	48,90 %	-2,30 %
MgO	0,88 %	0,95 %	+0,07 %
SO ₃	3,87 %	0,37 %	-3,50 %
K ₂ O	0,28 %	27,00 %	+26,72 %
Na ₂ O	0,05 %	0,07 %	+0,02 %

V-2-3). Impact de la composition chimique sur les propriétés thermiques et mécaniques des pierres Alig et Eddis

a). Propriétés thermiques :

La conductivité thermique est la capacité d'un matériau à conduire la chaleur. La pierre Eddis est plus riche en silice (SiO_2) et en potassium (K_2O) que la pierre Alig. Ces deux oxydes sont de bons conducteurs de chaleur. Par conséquent, la pierre Eddis est susceptible d'avoir une conductivité thermique plus élevée que l'Alig.

La capacité calorifique est la capacité d'un matériau à stocker la chaleur. La pierre Alig est plus riche en calcium (CaO) que la pierre Eddis. Le calcium est un élément moyennement bon conducteur de chaleur. Par conséquent, la pierre Alig est susceptible d'avoir une capacité calorifique plus élevée que Pierre Eddis.

b). Propriétés mécaniques

Dureté : La dureté est la résistance d'un matériau à la déformation. La pierre Eddis est plus riche en silice (SiO_2) et en alumine (Al_2O_3) que la pierre Alig. La pierre Eddis est susceptible d'avoir une dureté meilleure que la pierre Alig.

Résistance à la traction : La résistance à la traction est la capacité d'un matériau à résister à une force qui tend à l'étirer ou à le déchirer. La pierre Eddis est plus riche en potassium (K_2O) que l'Alig. Le potassium est un élément fragile. Par conséquent, la pierre Alig est susceptible d'avoir une résistance à la traction plus élevée que Pierre Eddis.

c). Utilisations

En raison de sa teneur élevée en calcium, la pierre Alig est une bonne roche pour la fabrication de la chaux et du ciment. La chaux est utilisée comme un liant dans la construction, tandis que le ciment est utilisé comme agglutinant dans le béton.

En raison de sa teneur élevée en silice et en aluminium, la pierre Eddis est une bonne roche pour la fabrication de verre et de céramique. Le verre est utilisé dans les fenêtres, les bouteilles et d'autres applications, tandis que la céramique est utilisée dans les tuiles, les sanitaires et d'autres applications.

V-2 -4). Analyse de la composition chimique des parpaing et brique rouge

La composition chimique de deux matériaux de construction les plus utilisés : le parpaing et la brique rouge est étudiée par le même procédé. Les résultats des compositions chimiques sont exprimés en pourcentage en masse dans le tableau suivant :

Tableau 8 : la composition chimique des parpaing et brique rouge

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
PARPAING	21,46	1,91	2,5	53,44	1,59	0,32	0,3	0,1
BRIQUE ROUGE	60,45	10,26	5,86	9,17	2,85	0,85	1,63	0,6

- Le parpaing est plus riche en chaux que la brique rouge. Cela signifie que le parpaing est plus susceptible de réagir avec l'eau et de former de la chaux hydratée, ce qui peut entraîner des problèmes de fissuration et de dégradation.
- La brique rouge est plus riche en alumine (Al₂O₃) que le parpaing. Cela signifie que la brique rouge est plus résistante aux acides et aux produits chimiques.
- Le parpaing est plus riche en oxyde de fer (Fe₂O₃) que la brique rouge. Cela signifie que le parpaing est plus susceptible de se tacher et de se décolorer.

De point de vu conductivité thermique :

Le parpaing, avec sa teneur élevée en chaux, a une conductivité thermique plus élevée que la brique rouge, ce qui signifie qu'il transfère la chaleur plus rapidement. Cela peut être un avantage dans les climats chauds où il est important d'évacuer la chaleur de la maison. Cependant, dans les climats froids, cela peut entraîner une perte de chaleur plus importante, ce qui peut augmenter les coûts de chauffage.

De point de vu Capacité thermique :

Les briques rouges, avec leur forte teneur en alumine, ont une capacité thermique plus élevée que les briques en béton. Cela signifie qu'il peut stocker plus de chaleur, ce qui peut aider à réguler la température interne en absorbant la chaleur pendant la journée et en la restituant la nuit.

Résistance à la compression :

Le bloc de béton, à haute teneur en chaux, a une résistance à la compression supérieure à celle de la brique rouge. Cela signifie qu'il peut supporter plus de poids sans se fissurer ni se casser. Il s'agit d'un facteur important pour les murs porteurs et autres structures qui supportent des charges importantes. (Ils n'ont pas été soumis à l'expérience car le matériel utilisé, comme expliqué dans la deuxième unité, ne correspond pas à la taille des briques rouges et de parpaing).

V-3). Analyse du comportement thermique des matériaux testés

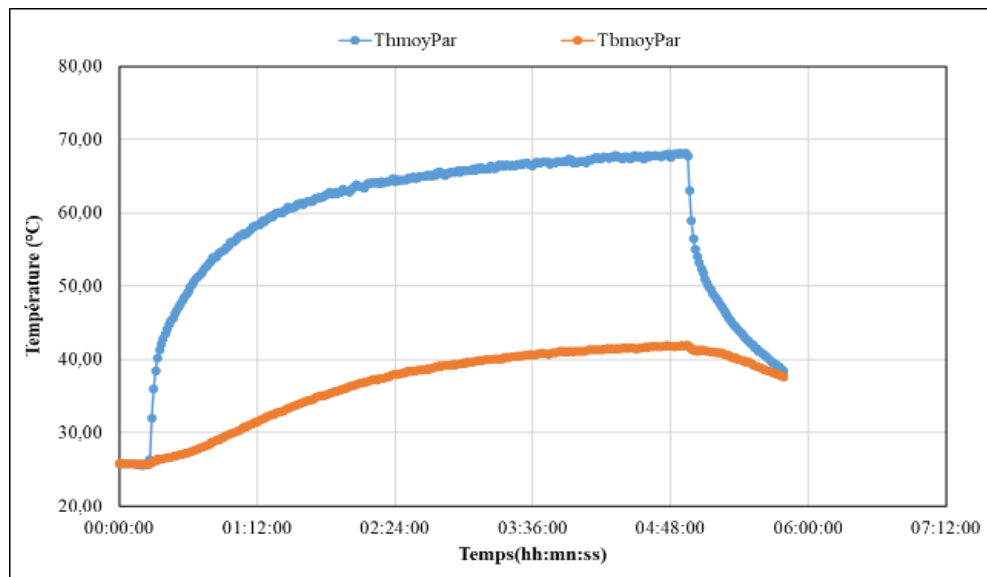
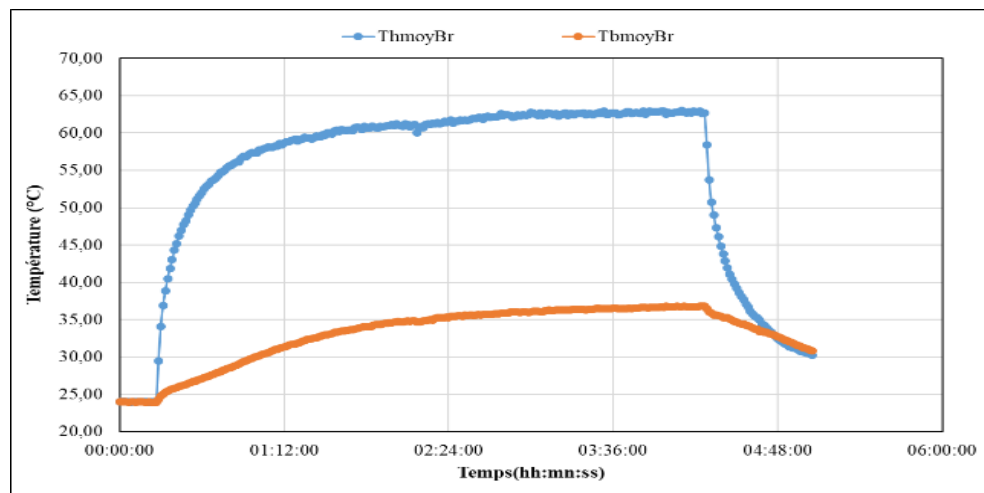
Les matériaux de construction sont généralement divisés en pierres de différents types, ainsi que toutes sortes d'argile, briques rouges et parpaing. Un type de pierre a été choisi, ainsi que l'argile, en plus de la brique rouge et le parpaing ont été soumis à cette étude.

Le comportement thermique se fait par le suivi des températures avec des 06 capteurs sur chaque face de l'échantillon et pendant les deux phases de chauffage et de refroidissement. Pendant la phase de chauffage,

les échantillons sont exposés à un flux continu de rayonnement provenant d'une lampe halogène de 1000W produisant la chaleur provenant du rayonnement solaire pendant 5 heures. La phase de refroidissement à l'air libre se fait sans source de chaleur (pendant une heure). De plus, les faces de la géométrie rectangulaire des échantillons sont soigneusement isolées sur leurs bords pour assurer le transfert de chaleur de deux faces parallèles, exposées et non rayonnées. Les températures sont enregistrées toutes les minutes pendant le temps des deux phases.

Les acquisitions des températures pendant les deux phases sont regroupées sur les courbes suivantes :

Respectivement : Courbe 1 pour l'échantillon du Brique, Courbe 2 pour l'échantillon du Parpaing, Courbe 3 pour l'argile et la Courbe 4 pour la Pierre.



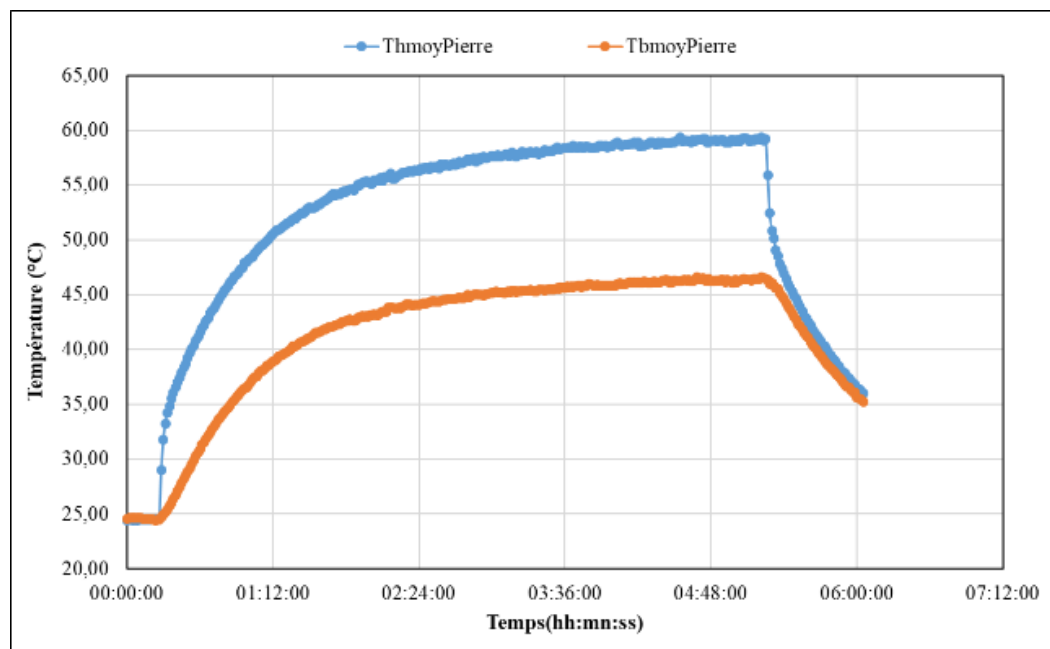
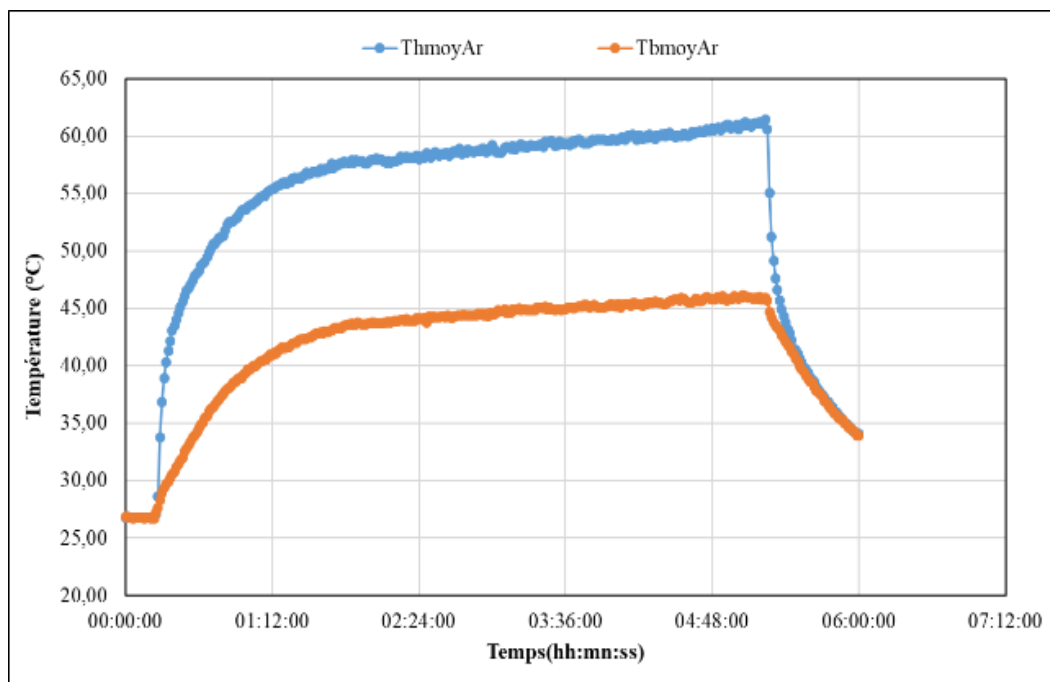


Figure 56 : Evolution de la Température des 04 échantillons pendant les phases de chauffage et de refroidissement.

D'après la Figure 56, tous les échantillons des différents matériaux montrent un comportement similaire pendant le chauffage et le refroidissement. Pendant que le rayonnement de lampe est incident, elle émet un flux thermique qui est absorbé en partie par la face exposée, augmentant ainsi sa température. En même temps, une partie du flux incident est conduite à travers le matériau jusqu'à la face non exposée, augmentant également sa température. Après l'extinction de la lampe, les deux faces commencent à se refroidir en cédant de la chaleur à l'air ambiant, qui est à une température d'environ 25°C, la température ambiante du laboratoire où les expériences ont été menées.

V-3-1) . Comportement thermique au chauffage

La Figure 57 illustre la variation de la température moyenne de la face exposée au rayonnement pour les quatre matériaux examinés. Il convient de souligner que les températures moyennes présentées ici sont calculées à partir de trois relevés de température effectués sur les faces extrêmes des échantillons analysés.

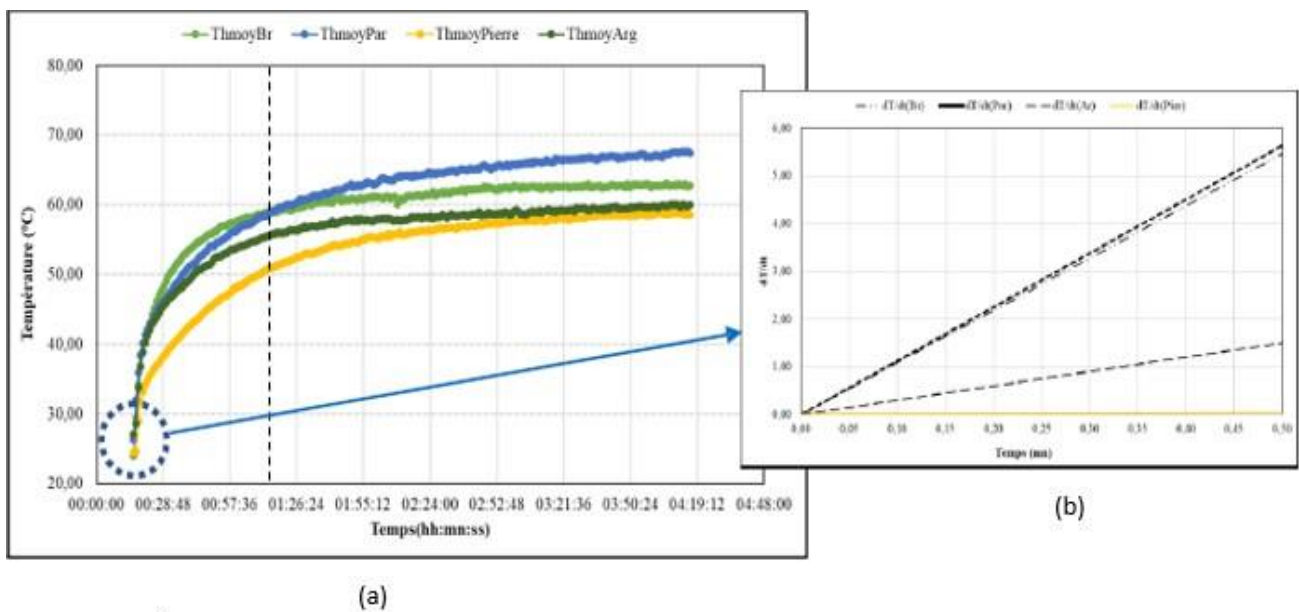


Figure 57 : Évolution de la température moyenne des surfaces exposées au rayonnement pour les quatre matériaux testés.

D'après les données de la Figure 57 (a) ,les matériaux testés révèlent des comportements distincts lors du chauffage. Le parpaing, tout d'abord, atteint une température de surface maximale de 64.63°C après 4 heures et 16 minutes, suivi de la brique rouge à 63.03°C, de l'argile à 60.10°C, et enfin de la pierre à 58.90°C. Notons cependant que l'ordre varie légèrement entre la 7ème et la 61ème minute de chauffage, où la température de surface de la brique dépasse celle du parpaing jusqu'à 2.8°C maximum. La surface de la pierre exposée au rayonnement connaît une lente augmentation de la température, ce qui explique le résultat enregistré, à savoir la température la plus basse.

Dès l'allumage de la lampe (Figure 57 (b)) , on constate une montée rapide en température du parpaing, suivie de la brique rouge, de l'argile, puis de la pierre, avec des taux respectifs de 5.63 °C/min, 5.47 °C/min, 1,5 °C/min et 0.03 °C/min, comme représenté sur la partie droite de la Figure 57. Ainsi, il est raisonnable de conclure que le parpaing possède le taux d'absorption du rayonnement le plus élevé, tandis que la pierre présente le taux le plus bas.

Partant du principe que la capacité thermique d'une substance est une mesure de la quantité de chaleur nécessaire pour élever sa température d'une certaine quantité. Plus la capacité thermique est élevée, plus la substance absorbe de chaleur pour élever sa température. On peut classer les capacités thermiques des matériaux étudiés de la plus élevée à la plus faible, comme suit : le bloc de béton (parpaing), suivi de la brique rouge, puis de l'argile, et enfin de la pierre.

Il convient également de noter que la capacité thermique d'une substance est une propriété complexe qui dépend de la combinaison de sa composition chimique, de sa structure cristallographique et de la présence de porteurs de charges libres (électrons) qui sont aussi responsables du transport de la chaleur. Comprendre ces facteurs est essentiel pour concevoir des matériaux dotés des propriétés thermiques souhaitées pour diverses applications, telles que le stockage de l'énergie thermique, l'isolation et la gestion thermique des composants électroniques.

Sur la Figure 58 on représente un facteur décrivant la vitesse de variation de la température en fonction du temps (dT/dt : °C/mn). Il permet de mieux mettre en lumière les variations de la température pendant la période de chauffage et de refroidissement. On distingue deux régimes, un régime transitoire caractérisé par le facteur $dT/dt \neq 0$, et un régime permanent où le facteur $dT/dt = 0$.

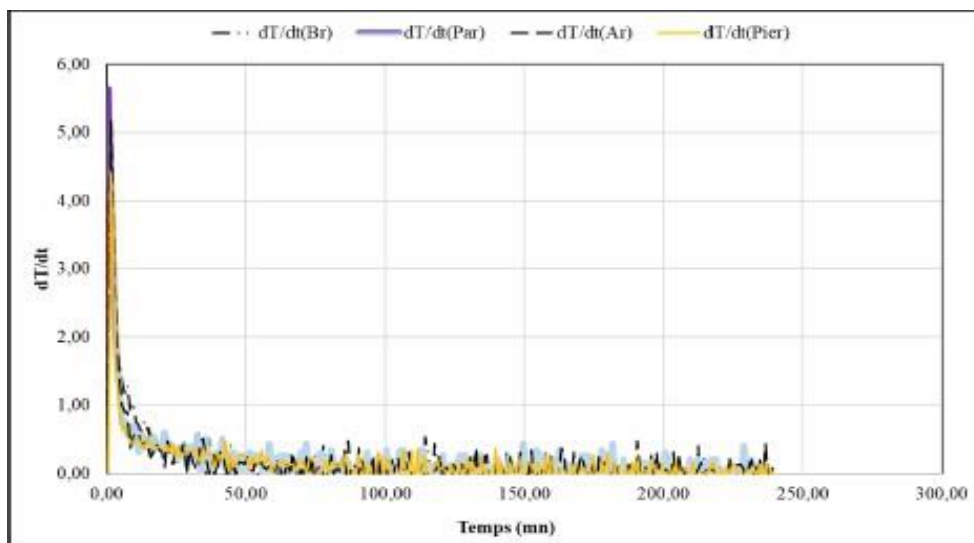


Figure 58 : Taux de variation de la température de la face exposée au rayonnement de la lampe des quatre matériaux testés.

Après une heure d'ensoleillement avec la lampe, tous les matériaux testés atteignent un régime stationnaire (Figures 56 et 58). La de la Figure 59 présente concrètement l'évolution de l'écart de la

température en fonction du temps pour les différents échantillons. Les deux régimes se distinguent clairement à partir de la 50 eme min.

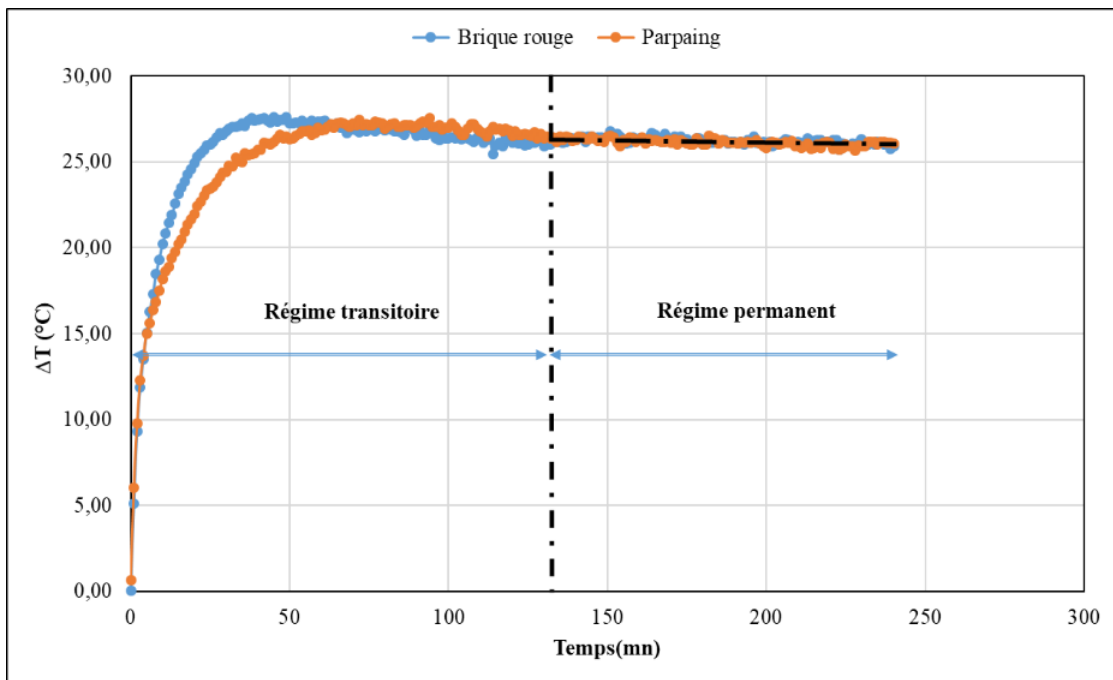


Figure 59 : Taux de variation de la température de la face exposée au rayonnement des quatre matériaux testés.

L'explication qualitative du phénomène de transfert thermique consiste à dire que les particules (ou les éléments des charges libres) en surface (s'étalant sur une certaine profondeur) des échantillons transfèrent leur énergie thermique, c'est-à-dire la chaleur absorbée, aux particules avoisinantes, engendrant ainsi un flux de chaleur se conduisant à travers l'épaisseur (transfert unidirectionnel). Ceci se produit puisque les bords des échantillons étudiés sont isolés.

Selon les lois du transfert de chaleur conductif en régime établi, la résistance thermique des matériaux peut être calculée. Elle correspond au rapport entre la différence de température et le flux de chaleur, comme exprimé par l'équation suivante :

$$R = \Delta T / \Phi \quad \text{V-1}$$

Où R représente la résistance thermique en degrés Celsius par watt (°C/W).

De plus, la conductivité thermique peut être déterminée à partir de l'épaisseur de l'échantillon (e), de sa résistance thermique (R) et de l'aire de sa surface d'échange (S), par la relation suivante :

$$\lambda = e/RS$$

Où e est l'épaisseur de l'échantillon en mètres, R est la résistance thermique en $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ et S est l'aire de la surface d'échange en mètres carrés.

Le Tableau 9 présente les valeurs de la résistance thermique et de la conductivité thermique obtenues pour la brique et le parpaing.:

Le Tableau 9 : les valeurs de la résistance thermique et de la conductivité thermique obtenues lors des expériences pour la brique et le parpaing.

Matériaux	Resistance thermique $R(^{\circ}\text{C}/\text{W})$	Conductivité thermique $\lambda(\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C})$	Epaisseur (m)/Surface d'échange (m^2)
Parpaing	1.025	1.28	0.1* / 0,076*
Brique rouge de 10cm	1.28	1.30	0,1* / 0,06*
Argile	6.05	1.03	0,04** / 0,0064**
Pierre	5.30	1.18	0,04** / 0,0064**

*Dimensions réelles ; ** Dimensions réduites.

En ce qui concerne la conductivité thermique, l'argile a une conductivité thermique la plus modeste ($1,03 \text{ W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$), tandis que la brique rouge affiche la conductivité thermique la plus élevée ($1,30 \text{ W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$). Autrement dit, la brique creuse transfère la chaleur de manière plus efficace que le parpaing, l'argile et la pierre, à travers une épaisseur de 1 mètre et un écart de température de 1 degré Celsius (ou 1 kelvin). Cependant, une différence infime persiste entre la brique de 10 cm et le parpaing. En tenant compte des dimensions réelles des briques issues des matériaux testés, on remarque d'après le Tableau 12 que le parpaing offre une résistance thermique inférieure à celle de la brique rouge, signifiant ainsi que la brique en parpaing conduit mieux la chaleur que la brique rouge.

La Figure 60 illustre la résistance thermique et l'écart de température résultant des dimensions réelles des briques composées des matériaux testés pour une surface de 1 mètre carré et une densité de flux de $0,1 \text{ kW}/\text{mètre carré}$.

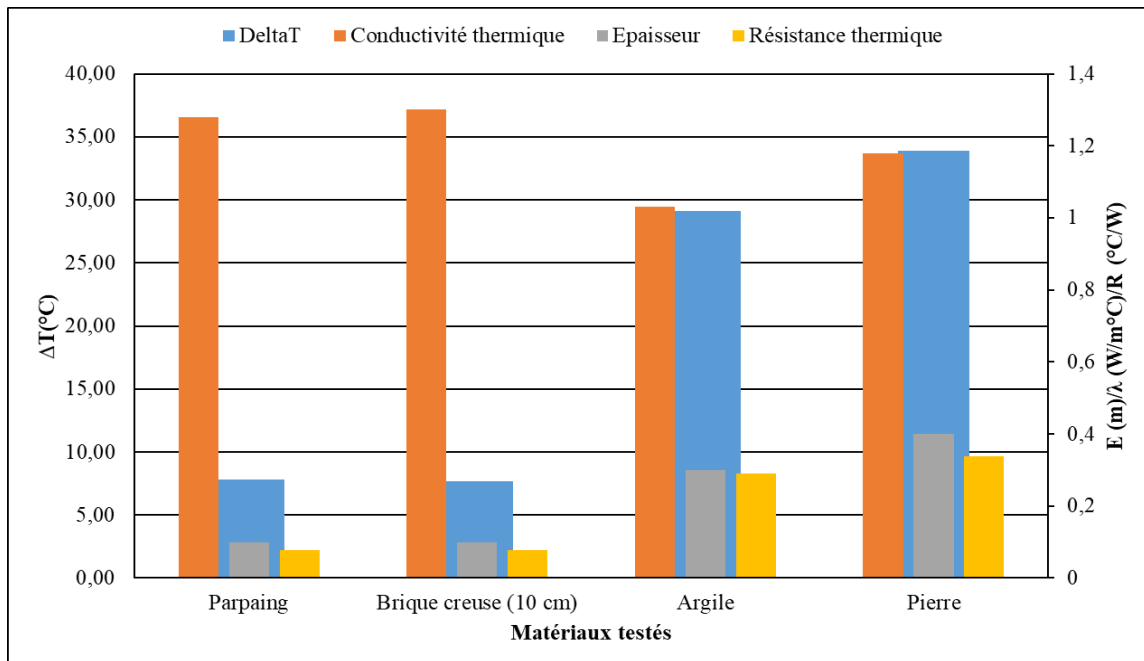


Figure 60: Variation de l'écart de température et de la résistance thermique des briques composées des matériaux testés dans leurs dimensions réelles.

L'épaisseur de la brique joue un rôle crucial dans la détermination de sa résistance thermique, et donc de la différence de température générée pour un même flux thermique. En effet, la différence de température entre deux extrémités de la pierre testée, dont l'une est exposée au rayonnement, peut atteindre 34°C pour une épaisseur de 40 cm, soit 4,4 fois l'épaisseur de la brique et 4,3 fois l'épaisseur du béton. De plus, les écarts de température enregistrés entre les surfaces en briques terre cuite et en briques béton sont quasiment identiques et restent bien inférieurs à ceux de la terre cuite et de la pierre. Cela explique pourquoi les anciennes maisons en terre cuite ou en pierre offrent un confort toute l'année, restant fraîches en été et chaudes en hiver. En revanche, les maisons contemporaines construites avec des blocs de béton ou des briques nécessitent une forte consommation d'énergie pour le chauffage et la climatisation.

Plus la conductivité thermique (λ) est faible, plus la résistance thermique (R) est grande. En d'autres termes, un α inférieur signifie une meilleure défense contre la chaleur.

On remarque que l'argile présente la pente la plus douce, suivie de près par la brique creuse, puis le bloc de béton et enfin la pierre. Cela fait de l'argile le champion incontesté de l'isolation thermique parmi les quatre, suivie respectivement par la brique creuse, les blocs de béton et la pierre.

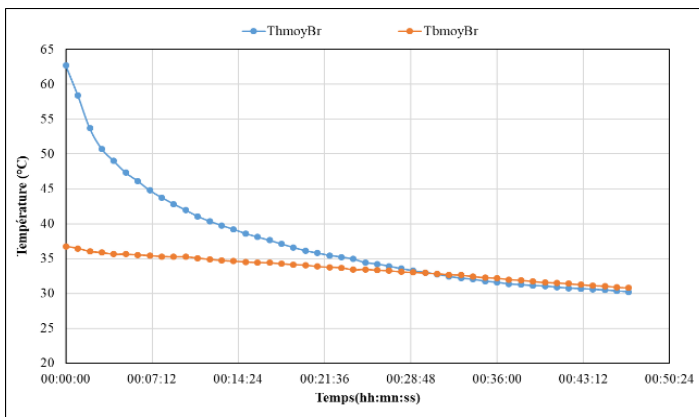
En conclusion, la figure60 permet de comparer les performances des matériaux en termes de résistance à la chaleur. Ceux qui présentent une résistance thermique élevée s'avèrent être de meilleurs isolants thermiques. Dans ce concours, l'argile brille en premier, suivie par les briques creuses, les blocs de béton et enfin la pierre.

Il convient de noter que la résistance à la propagation de la chaleur à travers les briques constituées des matériaux testés est proportionnelle à leur épaisseur, et l'écart de température généré est lié à cette résistance.

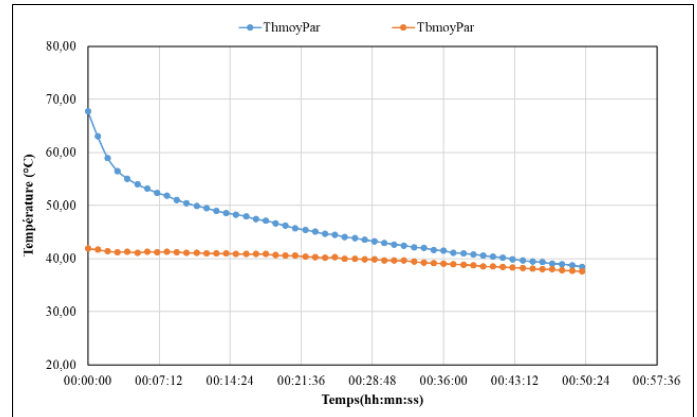
Comportement thermique lors du refroidissement La Figure 61 illustre l'évolution de la température moyenne des surfaces opposées des briques fabriquées à partir des quatre matériaux testés après l'extinction de la lampe (comportement lors du refroidissement).Brique rouge de 10 cm.

V-3-2).Comportement thermique au refroidissement

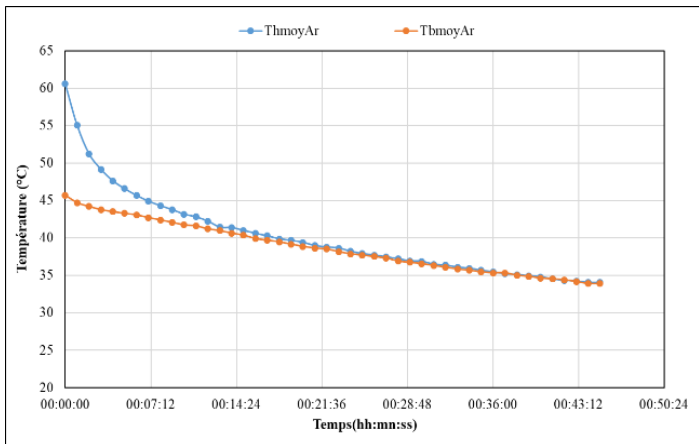
La Figure 61 représente l'évolution de la température moyenne en fonction du temps. Les faces actives des briques construites des quatre matériaux testés après l'extinction de la lampe (comportement au refroidissement).



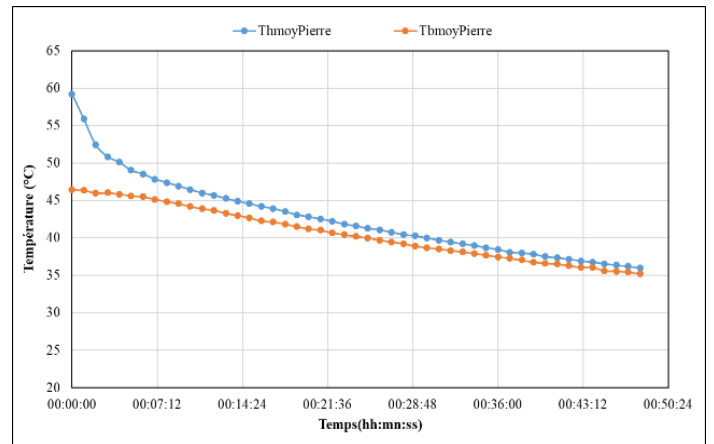
Brique rouge



Parpaing



Argile



Pierre

Figure 61 : Evolution de la température des faces extrêmes des briques des matériaux testés après l'extinction de la lampe

Les briques testées se refroidissent après la mise en arrêt de la source de chaleur qui les réchauffait et cela se traduit par la baisse des températures de leurs faces extrêmes due à l'échange de chaleur par rayonnement et par convection avec l'air qui les entoure et qui se trouvait à 25 °C (température du laboratoire où les essais ont été réalisés)

En outre, les surfaces exposées au rayonnement de la lampe ont tendance à se refroidir plus rapidement que celles non réchauffées directement, due à leurs températures plus élevées qui favorisent l'échange thermique conductif, convectif et radiatif. La loi de transfert de chaleur qui décrit l'échange thermique par convection et rayonnement est donnée par la formule suivante :

$$\Phi = hS(T_s - T_\infty) \quad \text{V-3}$$

Où :

- Φ représente le flux de chaleur échangé, exprimé en W,
- h est le coefficient global de transfert de chaleur, exprimé en W/m²K,
- S est la surface d'échange, exprimée en m²,
- T_s est la température de surface de l'échantillon, exprimée en K, et
- T_∞ représente la température de l'air ambiant, exprimée en K.

Quant au transfert de chaleur conductif à travers l'épaisseur des échantillons testés, il est régi par la loi de Fourier, formulée comme suit :

$$\Phi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{V-4}$$

Pendant un certain laps de temps, toutes les briques ont tendance à s'ajuster thermiquement à leur environnement, ce qui signifie qu'elles atteignent une température similaire à celle de leur milieu environnant. Ce phénomène est clairement observable sur la Figure 61. Malheureusement, les expériences de refroidissement n'ont pas été poussées jusqu'à ce que cet état d'équilibre soit atteint.

La Figure 61 montre que les briques testées présentent des comportements distincts lors de leur refroidissement, ce que nous allons examiner ci-dessous. Sur la Figure 62, nous avons représenté l'évolution de la température des faces directement exposées à la source de chaleur, après son extinction, pour les briques fabriquées à partir des quatre matériaux testés.

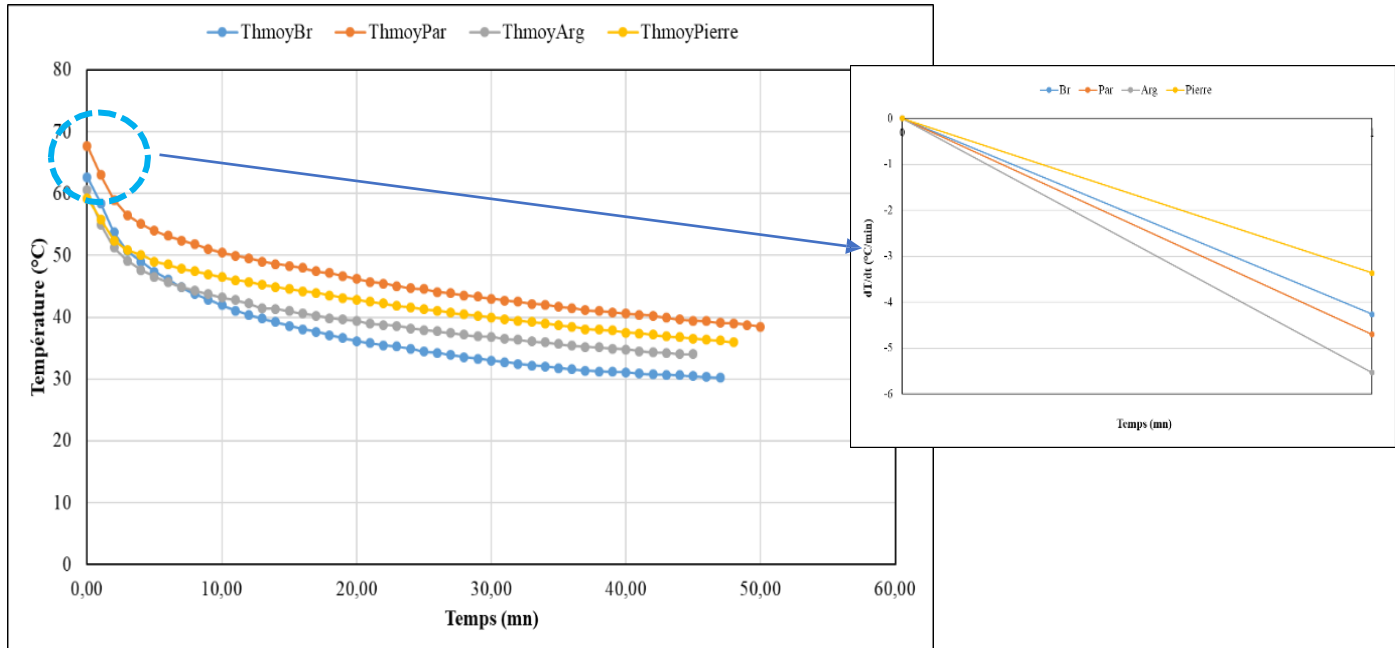


Figure 62 : Évolution de la température des faces des quatre briques exposées directement à la lampe après son extinction.

Dès l’extinction de la lampe, la surface lui faisant face de l’argile se refroidit rapidement, suivie de celle du parpaing, de la brique, puis de la pierre à des taux de 5,5 °C/min, 4,7 °C/min, 4,3 °C/min et 3,4 °C/min, respectivement, comme illustré sur la Figure 62 à droite. De plus, le taux de refroidissement des matériaux testés (variation de leur température au cours du temps) n’est pas constant, il décroît le long de la période de refroidissement. Effectivement, il ne dépasse pas les 1 °C/min pour tous les matériaux testés après la 8e minute qui suit la mise en arrêt de la source de chaleur.

La surface chauffée du parpaing reste la plus chaude après l’extinction de la lampe, suivie de celle de la pierre, de l’argile, puis de la brique, un ordre qui reste constant après 10 minutes de refroidissement. Ceci est important car la perception de la chaleur ou du froid est directement liée aux températures enregistrées. Par exemple, à la 45e minute de la phase de refroidissement, les températures relevées sur les surfaces exposées au rayonnement étaient les suivantes : 39,47°C pour le parpaing, 36,57°C pour la pierre, 34,03°C pour l’argile et 30,50°C pour la brique rouge. Il est à noter que la superficie des briques testées pourrait potentiellement influencer les résultats obtenus.

Selon les conclusions tirées de ces résultats, les murs en parpaing sont plus chauds que ceux en brique rouge, que ce soit de jour ou de nuit. Par conséquent, ils sont déconseillés dans les zones arides ou en été, mais recommandés dans les zones froides ou en hiver.

L’évolution de la température des surfaces non exposées au rayonnement de la lampe après son extinction est présentée sur la Figure 62 pour les briques composées des quatre matériaux testés.

Les quatre courbes montrent une tendance générale à la baisse, indiquant que la température des matériaux diminue avec le temps, avec une vitesse de refroidissement non uniforme. La brique rouge et l'argile refroidissent plus rapidement que la pierre et les blocs de béton (pendant la dernière minute de la période d'étude). La brique rouge a la courbe de refroidissement la plus raide, suivie par la brique, la pierre et l'argile. La courbe de refroidissement de l'argile est plate, ce qui indique que ce matériau refroidit plus lentement.

Les différences de vitesse de refroidissement entre les matériaux s'expliquent par leurs propriétés thermiques spécifiques, notamment la conductivité thermique et la capacité thermique.

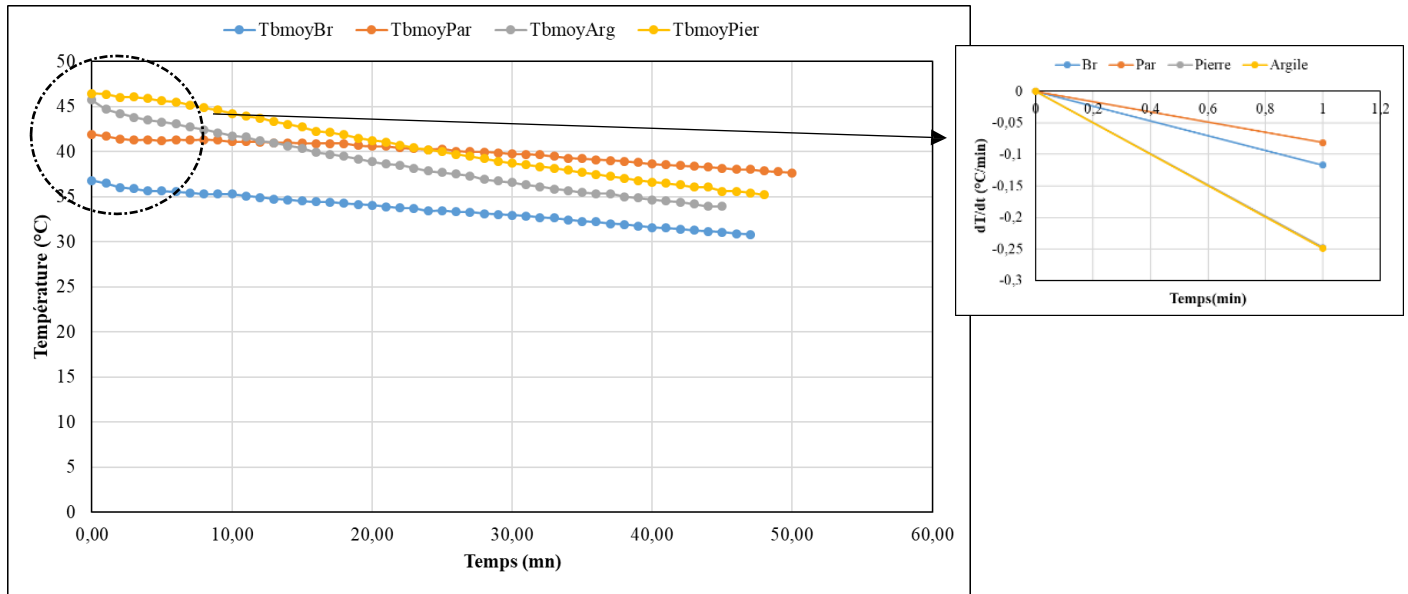


Figure 63 : Évolution de la température des faces non exposées à la lampe des quatre briques après son extinction .

Après l'extinction de la lampe, les surfaces de l'argile et de la pierre non exposées à son rayonnement se refroidissent plus rapidement que celles de la brique et du parpaing à des taux de 0,2493 °C/min, 0,2478 °C/min, 0,1169 °C/min et 0,081 °C/min, conformément à la figure 63 à droite. De plus, leurs températures diminuent de manière progressive (linéaire) au fil du temps selon les modèles empiriques suivants :

$$T_{Par} = -0.081 \cdot t + 41.981 \quad \text{V-5.}$$

$$T_{Br} = -0.1169 \cdot t + 36.344 \quad \text{V-6.}$$

$$T_{Pierre} = -0.2478 \cdot t + 46.502 \quad \text{V-7.}$$

$$T_{Arg} = -0.2493 \cdot t + 44.311 \quad \text{V-8.}$$

Les modèles de régression, caractérisés par des coefficients de détermination R^2 significatifs, estimés à 0,9703, 0,9958, 0,9932 et 0,9857 respectivement, décrivent bien l'évolution de la température des surfaces non exposées au rayonnement de la lampe après son extinction.

La brique creuse en terre cuite se distingue comme étant le matériau le plus frais parmi ceux testés. En effet, le taux d'échange thermique avec son environnement est élevé pendant la phase de refroidissement. En contraste que le parpaing libère la chaleur plus lentement, d'où le profil de température presque constant. À partir de la 29^e minute après l'extinction de la lampe, la pierre et l'argile présentent un comportement intermédiaire entre le parpaing et la brique rouge. Par exemple, à la 45^e minute de la phase de refroidissement, les températures relevées sur les surfaces non exposées au rayonnement étaient respectivement de 38,13°C pour le parpaing, 35,60°C pour la pierre, 33,90°C pour l'argile et 31,07°C pour la brique rouge. Il est souligné que la surface des briques testées pourrait potentiellement influencer les résultats obtenus.

Sur la base de la conductivité thermique et de l'analyse des courbes de température, le parpaing est le matériau qui présente le meilleur transfert thermique parmi les quatre options présentées. Cela signifie que le parpaing est le plus efficace pour absorber, transporter et dissiper la chaleur.

V-4). Impact du matériau sur l'évolution de la température intérieure

Le secteur du bâtiment est connu pour sa consommation excessive d'énergie, ce qui constitue un inconvénient majeur. Outre l'industrie et le transport, il est reconnu comme l'un des secteurs les plus énergivores au monde [50], [51]. En effet, on estime que le secteur du bâtiment consomme de 25 à 40 % de l'énergie primaire dans la plupart des pays [52]-[53]. Cette énergie est utilisée pour créer un bon environnement intérieur pour le bien-être des occupants [54]- [55].

Selon un rapport de l'APRUE (Agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie) publié en 2020, le secteur résidentiel est l'un des plus gros consommateurs d'énergie en Algérie, représentant 33 % de la consommation totale d'énergie [54]. La consommation moyenne d'énergie d'un logement en Algérie entre 2007 et 2017 a été estimée à 3 262 kWh/ménage. Au cours de cette période, la consommation d'énergie résidentielle a augmenté de 8,3 % par an.

Le secteur du bâtiment est également connu pour son impact environnemental néfaste. En tant que l'un des plus gros consommateurs d'énergie conventionnelle (combustibles fossiles), il génère des quantités importantes de gaz à effet de serre, principalement du CO₂, qui sont libérés dans l'atmosphère, contribuant à la pollution de l'air et au réchauffement climatique [55], [56]-[57]. En effet, le bâtiment représente environ 39 % des émissions mondiales annuelles de CO₂ [56]. De plus, en 2004, la quantité de CO₂ émise par le secteur du bâtiment était de 6,8 milliards de tonnes et ce chiffre devrait atteindre 15,6 milliards de tonnes d'ici 2030 [52].

En Algérie, le secteur résidentiel et tertiaire représente 36 % des émissions totales de gaz à effet de serre, ce qui en fait le deuxième secteur le plus polluant après l'industrie [53].

Ainsi, le secteur du bâtiment contribue à l'épuisement des sources d'énergie conventionnelles, au réchauffement climatique et aux dommages environnementaux. La réduction de la consommation d'énergie des bâtiments est une étape cruciale pour résoudre ces problèmes [50], [57]. De plus, économiser l'énergie dans le secteur du bâtiment n'est pas aussi difficile que dans les secteurs de l'industrie et des transports [58].

En raison de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment, celui-ci perd et gagne de la chaleur respectivement en hiver et en été, par toutes les parties de l'enveloppe du bâtiment (murs, fenêtres, sol, toit, etc.). En d'autres termes, le bâtiment échange de l'énergie thermique avec son environnement et la direction de cet échange est déterminée par la différence de température. La majorité des échanges de chaleur (pertes ou gains) se font par les murs extérieurs, dont la performance thermique est dictée par les matériaux utilisés dans leur construction et leur isolation [59], [60].

Les maisons en terre (construites en briques crues, en torchis, en pisé et en plâtre) sont naturellement climatisées et sont classées comme habitations solaires passives [61]. Les matériaux de construction en terre sont connus pour leur faible conductivité thermique et leur capacité thermique élevée [62], [63]. En conséquence, les maisons plus anciennes construites avec ces matériaux sont exceptionnellement économes en énergie.

Cette recherche s'appuie sur des travaux antérieurs sur les matériaux de construction naturels. Après avoir montré, dans notre première étude, la capacité de plusieurs matériaux de construction naturels à être

utilisés comme isolant pour les capteurs thermiques [64], puis évalué expérimentalement leur conductivité thermique [65], le présent travail expérimental est une partie du travail présenté à la Conférence internationale sur les énergies renouvelables et les énergies de qualité (ICREPQ 2020) [66,64]. Il compare l'évolution de la température à l'intérieur des bâtiments bâtis avec quatre matériaux couramment utilisés en Algérie. Autrement dit, il évalue le comportement thermique de ces matériaux de construction en situation réelle.

V-3-1) .Analyse des résultats expérimentaux

Comme souligné auparavant, la brique ordinaire (brique rouge creuse) demeure le matériau dominant dans les chantiers algériens. Ainsi, le comportement thermique des autres échantillons testés, à savoir la laine de mouton, le calcaire et la brique de terre, est mis en confrontation avec celui de la brique rouge.

La Figure 64 montre l'évolution de la température intérieure captée au cœur des chambres en brique rouge et en laine de mouton, juxtaposée à la température extérieure enregistrée au cours d'une journée ensoleillée du mois de Mai, durant 24 heures. Il apparaît que les températures internes des deux chambres ont suivi le même mouvement que la température externe, avec deux points extrêmes : un minimum à l'aube et un maximum en après-midi.

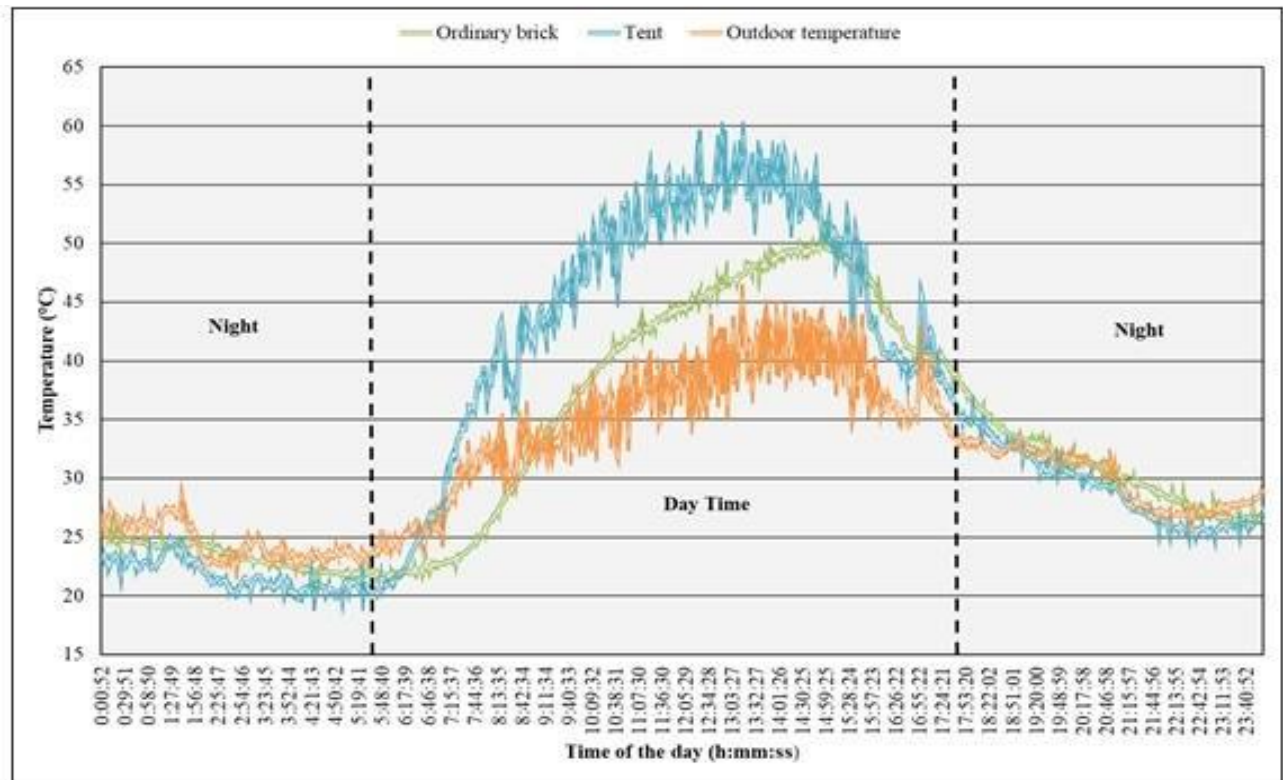


Figure 64: Evolution de la température intérieure d'une tente et d'une chambre ordinaire en brique, ainsi que l'évolution de la température extérieure au cours d'une journée (24 heures).

La température de l'air ambiant (température extérieure) est déterminée par la quantité de rayonnement solaire reçue par la surface de la Terre. Pendant la journée, la terre reçoit une grande quantité d'énergie solaire qui réchauffe l'air ambiant de l'atmosphère. En une position sur la surface de la terre, la température augmente (Figure 64) à partir du levé (05h38 du mois de Mai) jusqu'au milieu de la journée (vers 13h15 du mois de Mai) où le soleil est en position la plus proche de la surface de la terre au point considéré. Les variations de la température de l'air ambiant suivent donc une évolution similaire à celle de l'énergie incidente sur la terre avec des effets à en tenir compte lorsque les perturbations atmosphériques sont critiques. A partir de l'après-midi, le soleil commence à s'éloigner de sa position proche et la surface de la terre se refroidit lentement en fonction de l'atmosphère et la température de l'air ambiant baisse jusqu'au lever du soleil.

La Figure 64 illustre un comparatif de l'évolution de la température au sein d'une tente et d'une chambre en briques rouges. Nous pouvons voir que la tente était plus chaude que la chambre tout au long de la journée. Cependant, la nuit, la tente était plus froide. En effet, la température la plus élevée dans la chambre en briques rouges était inférieure de 8,4 °C à celle de la tente. La température minimale dans la chambre en brique rouge était 1,7 °C plus élevée que dans la tente. De plus, la température intérieure de la chambre en briques rouges a atteint son apogée après 02:04:57 du pic de la tente. Après 00:24:59 du minimum de la tente, la température intérieure de la chambre en briques rouges a atteint sa valeur la plus basse. La tente et la chambre en briques présentent donc des comportements thermiques différents. Cette disparité était plus marquée le jour que la nuit.

Comme le montrent les données présentées ci-dessus, la chaleur de l'environnement extérieur (irradiation solaire) passe plus facilement à travers le tissu de laine de mouton qu'à travers la brique rouge creuse, ce qui est dû aux différences dans les propriétés thermo physiques (conductivité thermique, capacité thermique et densité) des deux matériaux, ainsi que l'épaisseur des enveloppes des chambres (murs et toiture). Contrairement à la chambre en brique, la chaleur gagnée par la tente au cours de la journée est facilement évacuée à travers son enveloppe.

Malgré la faible conductivité thermique de la laine de mouton, d'une valeur de 0,04 W/m. K [66] (désigné comme isolant), sa finesse (0,2 cm) facilite avec succès les échanges thermiques entre le milieu extérieur et l'intérieur de la tente et vice versa.

Comme le montre la Figure 64, la température à l'intérieur de la tente pendant la journée était beaucoup plus élevée que la température de l'air ambiant, car l'irradiation solaire chauffe le volume d'air emprisonné à l'intérieur de la tente plus rapidement que l'environnement extérieur. Il convient de mentionner que la température de l'air ambiant dans cette expérience a été prise à une hauteur de 1,5 m sans abri.

En réalité, le pied (sol) des tentes utilisées dans des conditions sahariennes est humidifié, ce qui rafraîchit l'environnement intérieur et assure un confort thermique lors des chaudes journées d'été. Cependant, la tente a été installée sur un support sec dans cette étude et le mouillage du sol n'a pas été pris en compte. De plus, la conception de la tente (il ne s'agit pas d'un cube fermé) améliore son confort thermique, comme le montre la Figure 64. Cette étude visait à étudier l'impact des matériaux de construction et nous avons donc utilisé la même forme et la même taille de chambre, en modifiant uniquement la construction. matériaux.



Figure 65: Une tente saharienne traditionnelle .

La Figure 66 montre l'évolution de la température intérieure prise au centre des chambres en brique rouge et calcaire et de la température extérieure enregistrée lors d'une journée ensoleillée du mois de mai sur une période de 24 heures. Comme on peut le constater, la courbe illustrant l'évolution de la température au sein de la chambre calcaire est assez similaire à celle de la chambre en brique rouge. En effet, la température la plus élevée dans la chambre en briques rouges était inférieure de $1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ à celle dans la chambre en pierre calcaire. À l'inverse, la température minimale dans la chambre en briques rouges était supérieure de $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ à celle dans la chambre en pierre calcaire. De plus, la température intérieure de la chambre en briques rouges a atteint son apogée après 00:09:00 du pic de la chambre en calcaire.

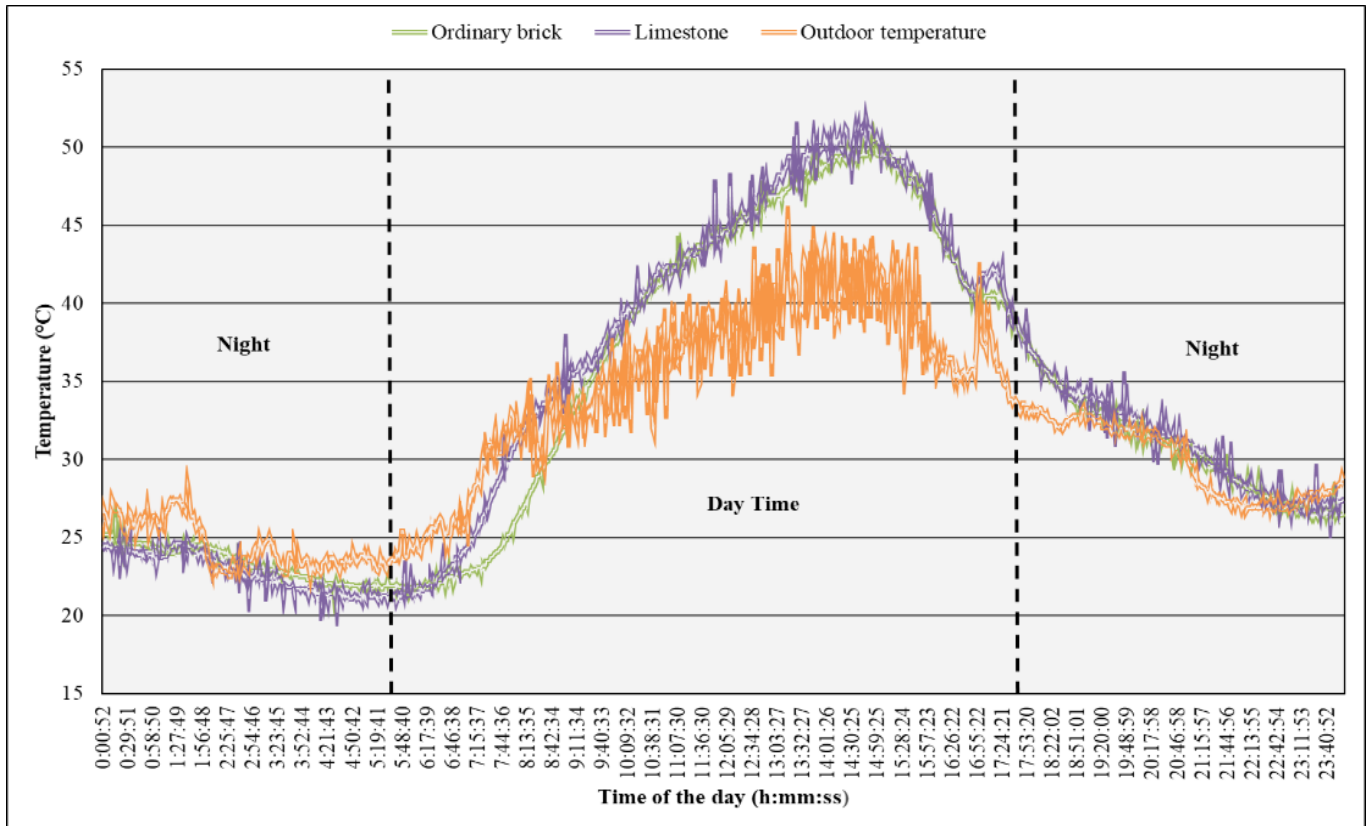


Figure 66 : Evolution de la température intérieure des chambres en pierre calcaire et en briques ordinaires, ainsi que l'évolution de la température extérieure sur une journée (24 heures).

Après 00:03:00 du minimum de la chambre en briques rouges, la température intérieure de la chambre en calcaire a atteint sa valeur la plus basse. Ainsi, on peut dire que les chambres en calcaire et en briques rouges présentaient des comportements thermiques assez similaires.

Il convient de noter que la brique rouge utilisée a une épaisseur un peu plus élevée (5 cm) que le calcaire (3 cm). La pierre calcaire utilisée dans ces travaux est couramment employée pour embellir les façades des murs extérieurs (Figure 67). A l'opposé, les murs en pierre calcaire des demeures historiques ont une épaisseur de 50 cm (Figure 67), offrant un excellent confort thermique intérieur selon les témoignages de leurs habitants.

Malheureusement, dans cette étude, nous n'avons pas pu déterminer les propriétés thermo physiques des différents matériaux, soit la conductivité thermique, la densité et la capacité thermique. Au lieu de cela, nous avons étudié leurs comportements thermiques en suivant l'évolution de la température intérieure des chambres. Comme indiqué ci-dessus, la chaleur se propage de la même manière à travers un mur de briques creuses de 5 cm d'épaisseur qu'à travers un mur de pierre calcaire de 60 Cm d'épaisseur.



Figure 67 : Applications actuelles et historiques du calcaire dans le secteur de la construction.

La Figure 68 montre l'évolution de la température intérieure prise au centre des chambres en brique rouge et brique de terre et de la température extérieure enregistrée lors d'une journée ensoleillée du mois de mai sur 24 heures. Comme on peut le constater, la courbe illustrant l'évolution de la température au sein de la chambre en briques de terre diffère de celle de la chambre en briques rouges. La chambre en brique ordinaire était plus chaude que la chambre en brique de terre pendant la journée. Cependant, la nuit, les deux chambres ont montré un comportement similaire. En effet, la température la plus élevée dans la chambre en briques rouges était de 2,9 °C plus élevée que dans la chambre en briques de terre. La température minimale dans la chambre en briques rouges était similaire à celle dans la chambre en briques de terre. La température intérieure de la chambre en briques rouges a atteint son maximum avant 00:09:00 du pic de la chambre en briques de terre. Après 01:25:57 du minimum de la chambre en briques rouges, la température intérieure de la chambre en briques de terre a atteint sa valeur la plus basse. En conséquence, la différence de comportement thermique entre les chambres en brique de terre et en brique rouge est nette. Cet écart est visible pendant la journée. Bien que les températures les plus basses dans les deux chambres ne se soient pas produites au même moment, elles se sont comportées de la même manière la nuit, comme l'illustre la Figure 68.

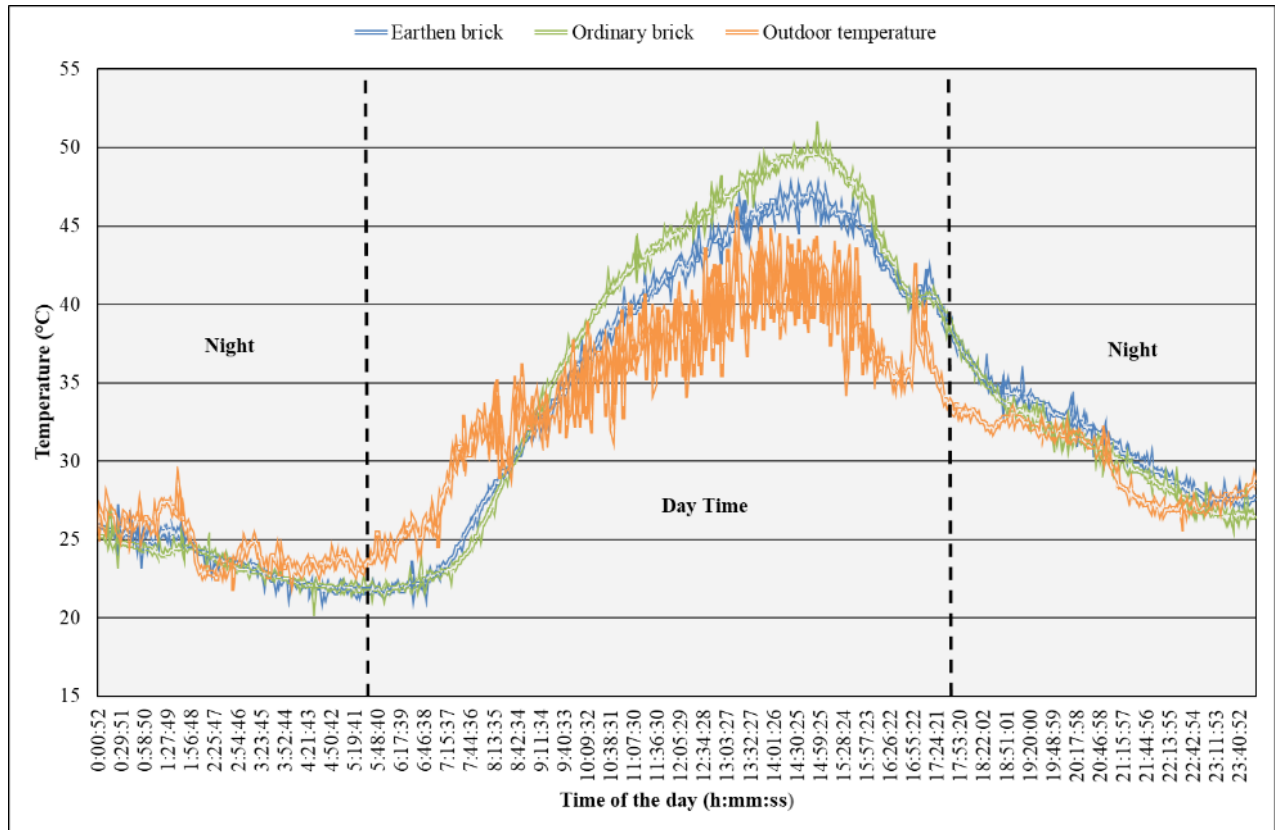


Figure 68 : Évolution de la température intérieure des chambres en briques de terre et en briques ordinaires, ainsi que l'évolution de la température extérieure sur une journée (24 heures).

En raison des différences dans les propriétés thermo physiques des deux matériaux, l'énergie de l'irradiation solaire incidente se propage mieux à travers le mur de briques rouges qu'à travers le mur de briques de terre, ce qui explique pourquoi les températures intérieures des deux chambres ont augmenté à des rythmes différents. Autrement dit, la brique rouge diffuse mieux la chaleur que la brique en terre cuite.

D'un point de vue quantitatif, la diffusivité thermique est une propriété liée au matériau. Il caractérise la conduction thermique instable et décrit le taux de propagation de la température à travers un matériau. La diffusivité thermique α est donnée par l'équation suivante :

$$\alpha = \lambda / \rho c \quad \text{V-1}$$

où λ est la conductivité thermique du matériau ; ρ est la densité du matériau ; et c est la capacité thermique spécifique du matériau.

De ce qui précède, nous pouvons affirmer que la diffusivité thermique de la brique en terre est inférieure à celle de la brique rouge sans faire de calculs. En effet, le jour des tests, qui était chaud, la chambre en brique de terre était plus froide qu'une chambre en brique rouge d'égale épaisseur. En réalité, sans climatisation, les maisons traditionnelles en briques de terre sont fraîches lors des chaudes journées d'été

car la chaleur ne se diffuse pas bien à travers leurs murs plus épais. Il convient de noter que les murs épais des maisons anciennes sont considérés comme un inconvénient car ils limitent l'espace intérieur.

Le comportement thermique des chambres diffère sensiblement au cours de la journée. Lorsque le soleil se couche, ces chambres échangent à peu près la même quantité de chaleur avec leur environnement, entraînant la même évolution de température. De plus, ces différences ne sont pas trop importantes car la plupart des échanges thermiques se font par le toit, et dans cette étude, nous avons utilisé le même toit sauf pour le cas de la tente.

- Le but de cette étude expérimentale était d'étudier le comportement thermique de quatre matériaux de construction différents – la laine de mouton, la brique de terre, le calcaire et la brique ordinaire dans des conditions réalistes.

Il a été constaté que, outre l'épaisseur de l'enveloppe du bâtiment (murs et toiture), les propriétés thermo physiques (diffusivité thermique) des matériaux de construction ont un impact significatif sur les échanges thermiques entre les environnements intérieur et extérieur.

Il a été prouvé quantitativement que la brique en terre présente les meilleures performances thermiques parmi les matériaux examinés. Les propriétés thermiques de la brique rouge et du calcaire étaient les mêmes. Malgré sa faible conductivité thermique, la laine de mouton diffuse plus efficacement la chaleur en raison de sa finesse.

Cette étude vise à promouvoir la réutilisation des briques en terre cuite en raison de leurs avantages en matière d'économie d'énergie et de préservation de l'environnement.

V-5). L'effet de l'orientation sur la température des parois Etude expérimentale

Comme ailleurs dans le monde, les bâtiments en Algérie sont parmi les plus gros consommateurs d'énergie [69,70,71], qu'ils utilisent l'électricité ou le gaz. Ces énergies sont principalement utilisées pour le refroidissement en été et le chauffage en hiver. De plus, le réchauffement climatique a accru les besoins en climatisation. Par exemple, la ville de M'Sila, dans le nord de l'Algérie, a récemment connu des étés plus longs et plus chauds, ainsi que des hivers plus courts et moins froids. Selon les statistiques d'un document de l'Agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'usage de l'énergie publié en 2020, le secteur résidentiel en Algérie est responsable de 33 % de la consommation totale d'énergie du pays [72]. De plus, de 2007 à 2017, la consommation d'énergie résidentielle a augmenté de 8,3 % par an. L'expansion du secteur immobilier, la baisse du coût de l'énergie traditionnelle, le niveau de vie élevé des Algériens et le manque de sensibilisation aux économies d'énergie sont parmi les principaux contributeurs à cette augmentation de la consommation énergétique.

D'autre part, 36% des émissions totales de gaz à effet de serre en Algérie sont produites par les secteurs résidentiel et éducatif, ce qui en fait le deuxième secteur le plus polluant après l'industrie [70,71].

Les murs extérieurs constituant une grande partie de l'enveloppe du bâtiment, le flux de chaleur entre le bâtiment et son environnement est fortement affecté par les propriétés thermiques des matériaux de construction, ainsi que par les dimensions et l'orientation de ces murs. De plus, on estime que ces murs représentent 35 % des déperditions thermiques d'un bâtiment [75,76].

La brique et la pierre, d'anciens matériaux argileux, étaient répandues sur les chantiers de construction algériens l'année dernière. Désormais, leur règne s'efface, le sceptre étant cédé aux blocs de béton et aux briques creuses. Ces deux concurrents se disputent la vedette dans le secteur de la construction, chacun avec ses propres atouts [77]. Le bloc de béton se caractérise par sa résistance inébranlable [77], mais est moins isolant que la brique creuse. De plus, ces briques creuses, disposées parallèlement et d'une taille maximale de 30 cm [78], sont agrémentées de 4, 8, 12 ou 16 trous.

La surface des bâtiments algériens est généralement constituée de murs verticaux (maçonnerie), de toitures inclinées ou de murs plats (toits horizontaux). De plus, la majorité de ces constructions présentent des silhouettes parallèles.

Dans cette partie de l'analyse, nous dévoilons le fruit de nos recherches, apportant un nouvel éclairage sur l'effet de l'orientation des murs sur la température de leurs surfaces extérieures en été. Une exploration inédite, axée sur ce paramètre thermique plutôt que sur le rayonnement solaire incident, qui fait l'objet de nombreuses études antérieures [79,80,81,82,83]. Comme chacun le sait, la température d'un système change en fonction de l'échange d'énergie qui s'y produit, qu'elle augmente ou qu'elle perde (en l'occurrence la chaleur absorbée par le soleil). La température devient ainsi un indicateur précieux du flux de chaleur, augmentant avec l'absorption et diminuant avec la perte. C'est pourquoi nous en avons fait un pilier de notre étude. De plus, la majorité des recherches, tant théoriques (modélisation) qu'expérimentales, portent sur l'effet de l'orientation des bâtiments sur le confort thermique (température interne) des espaces habités [84,85,86,87]. Ces enquêtes montrent que l'orientation des bâtiments est l'un des principaux facteurs affectant la température intérieure et donc la demande énergétique. Pendant ce temps, les esprits scientifiques se sont concentrés sur l'effet de l'orientation des murs sur le décalage temporel et le taux d'amortissement (propriétés d'inertie thermique) [88,89]. Notre objectif diffère donc de celui des articles

précédents disséminés dans la littérature. Cette étude fournit également un aperçu plus approfondi de nos recherches antérieures sur l'effet de l'orientation des murs sur les températures des surfaces extérieures [90].

V-5-1) . Présentation et analyse des résultats expérimentaux

L'expédition expérimentale s'est amorcée à Ouled Sidi Brahim, un recoin septentrional de l'Algérie, géographiquement situé à 35° 17' 49" de latitude, 4° 10' 27" de longitude, et élevé à 541 mètres au-dessus du niveau de la mer [91]. De surcroît, l'atmosphère ambiante se dessine comme un demi-désert, une terre sèche et glaciale exerçant son règne sur le terrain d'observation.

Dans l'hémisphère septentrional, l'été s'étend du 21 juin au 21 septembre, lorsque le soleil grimpe à son zénith le 21 juin pour rejoindre ensuite le plan de l'équateur le 21 septembre. Les expériences se sont déroulées tout au long de cette trilogie estivale, une période réputée pour ses températures enflammées (le pic de chaleur de l'année).

Pour cette incursion, une salle en briques rouges a été modélisée (une miniature construite est représentée dans le module 2), la température en son centre ainsi que la température de sa surface extérieure, orientée vers chacun des quatre compas cardinaux (est, ouest, nord et sud), enregistrées avec précision à intervalles d'une minute, tout au long d'une journée entière (24 heures). pendant l'été.

- **Résultat final.**

La figure 69 représente l'évolution de la température le 23 juin 2020 au centre des faces extérieures des parois de la chambre orientées dans les quatre directions principales. Il est important de noter que cette illustration sert d'exemple de ce qui se passe au début de l'été (fin juin).

Comme le montre la figure 69, l'orientation des murs n'affecte la température de leurs surfaces extérieures que pendant la journée, lorsque le rayonnement solaire est disponible. La nuit, les températures extérieures de tous les murs sont pratiquement identiques et diminuent du coucher du soleil à l'aube. C'est pourquoi leurs températures extérieures les plus basses sont enregistrées à l'aube. À ce stade, il est possible d'affirmer que le soleil chauffe la chambre. Le confort thermique des espaces intérieurs est également fortement impacté par le soleil en raison du transfert de chaleur à travers leurs enveloppes extérieures.

Tout au long de la journée, les quatre surfaces des murs extérieurs reçoivent différentes quantités d'énergie solaire en fonction de leurs interactions avec le rayonnement solaire incident [86, 87, 89]. L'énergie interceptée les amène à se réchauffer différemment, comme le montre la figure 69. Les surfaces de leurs murs externes subissent également une diminution de température lorsqu'elles ne sont pas exposées au rayonnement solaire. Le comportement nocturne des surfaces extérieures des quatre murs en est une bonne illustration. De plus, lorsque le rayonnement solaire tombe sur une surface, une partie de ce rayonnement est réfléchi, une autre est absorbée et la dernière est transmise à travers cette surface par conduction. De plus, le rayonnement absorbé augmente l'énergie interne de la surface et détermine sa température.

Comme le montre la figure 69, les courbes montrant la progression de la température au milieu des quatre surfaces des murs extérieurs ont le même profil : elles montent, culminent, puis descendent. Ce modèle

ressemble beaucoup au modèle de rayonnement solaire incident évoqué dans la littérature [86, 87, 89], qui correspond à nos données de température.

Le mur orienté à l'est (qui fait face au soleil levant) est exposé à un rayonnement solaire matinal plus important que les autres murs, ce qui entraîne une augmentation rapide de la température de sa surface externe par rapport aux murs dans les autres orientations, comme l'illustre la figure 61. Ainsi, le matin, c'est le mur qui est le plus chaud. De plus, l'échange thermique entre le mur orienté à l'est et ses environs fait que la température de sa surface extérieure atteint un maximum le matin (avant midi), puis diminue lorsque le soleil se dirige vers l'ouest pour se coucher. [92, 93, 94].

En raison de la position du soleil vers l'est au lever du soleil, la température de la surface extérieure du mur orienté à l'ouest augmente lentement pendant cette période, comme le montre la figure 69. Par exemple, entre 6 h 30 et 7 h 00, la température de la face extérieure du mur est augmentée de 7,4 °C, tandis que la surface extérieure du mur ouest ne subit qu'un changement de température de 1,2 °C. Ainsi, le mur orienté à l'ouest est le plus froid le matin. La position du soleil fait que la température de la surface extérieure du mur orienté à l'ouest augmente plus rapidement dans l'après-midi, atteint un pic, puis commence à baisser à mesure que le soleil se dirige vers son coucher et que sa puissance diminue. La surface extérieure du mur orienté à l'ouest enregistre la température la plus élevée, qui est atteinte plus tard que sur les autres murs (Fig. 69).

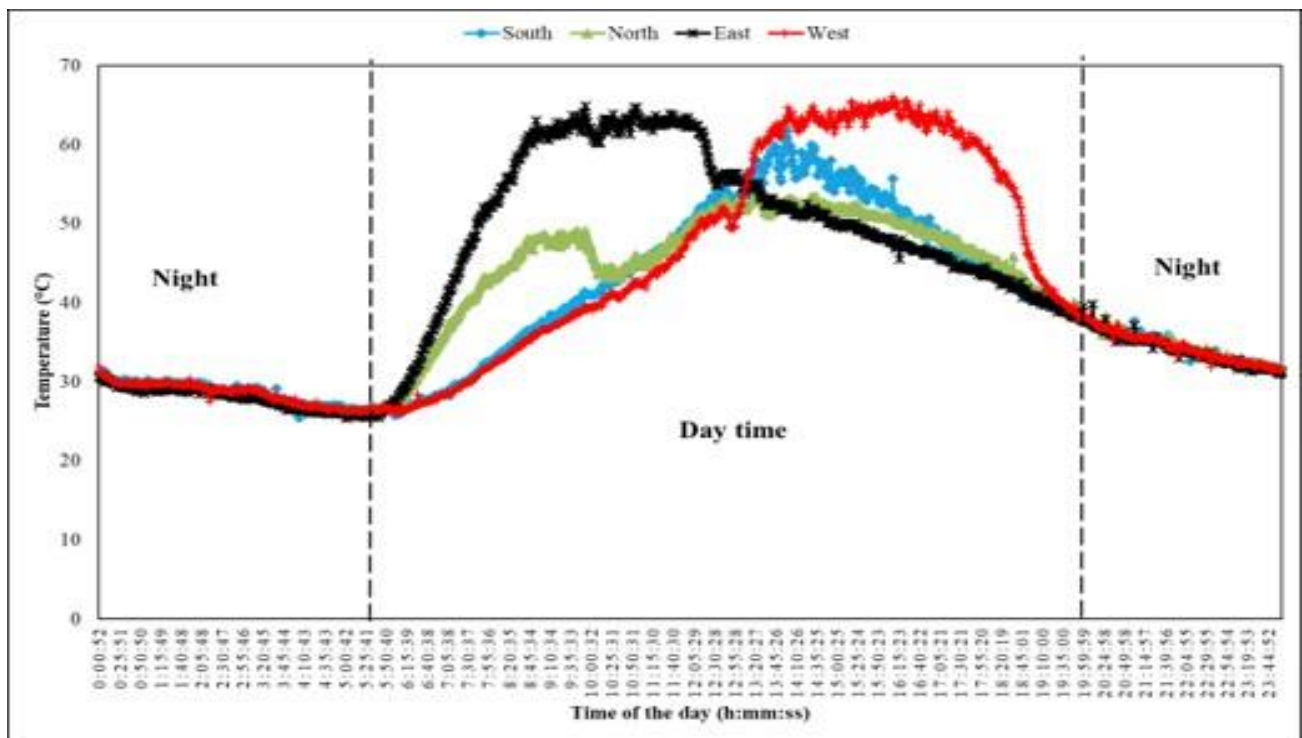


Figure 69 : Évolution de la température le 23 juin 2020 au milieu des faces extérieures des parois de la chambre orientées dans les quatre directions principales.

Le matin, la température de la surface extérieure du mur orienté sud est comparable à celle du mur orienté ouest (Fig. 69). Cependant, dans l'après-midi, cela n'est pas vrai puisque la température de la surface extérieure du mur sud atteint son maximum plus tôt. Sa température maximale est donc inférieure à celle de la surface extérieure du mur ouest.

Comme observé sur la figure 69 , la courbe montrant l'évolution de la température de la surface extérieure du mur orienté au nord est la plus aplatie car la différence de température entre ses deux extrêmes est la plus petite. De plus, en raison du soleil d'été qui se lève du nord-est (Fig. 13 CHAPITRE II), le mur orienté au nord se réchauffe plus rapidement que les murs orientés au sud et à l'ouest le matin.

Le seul mur dont la température la plus élevée sur sa surface extérieure est enregistrée le matin est le mur orienté à l'est ; par conséquent, ce mur est le plus chaud le matin, suivi par les surfaces extérieures des murs orientés au nord, au sud et à l'ouest dans cet ordre. En effet, les températures moyennes matinales des surfaces extérieures des murs est, nord, sud et ouest étaient respectivement de 51,9°C, 41,49°C, 36,27°C et 35,15°C le 23 juin 2020. cet ordre est inversé.

Les températures moyennes des surfaces extérieures des quatre murs au cours des jours d'expérimentation révèlent que la surface extérieure du mur orientée à l'est semble être la plus chaude, suivie par les surfaces extérieures des murs orientées vers l'ouest, le nord et le sud dans cet ordre (journée entière sur la Fig. 69). De plus, il ne semble pas y avoir de changements considérables dans la température moyenne entre toutes les orientations. Le 23 juin 2020 , par exemple, la température moyenne des surfaces extérieures des murs orientés est et sud (max et min) variait de 3,38 °C.

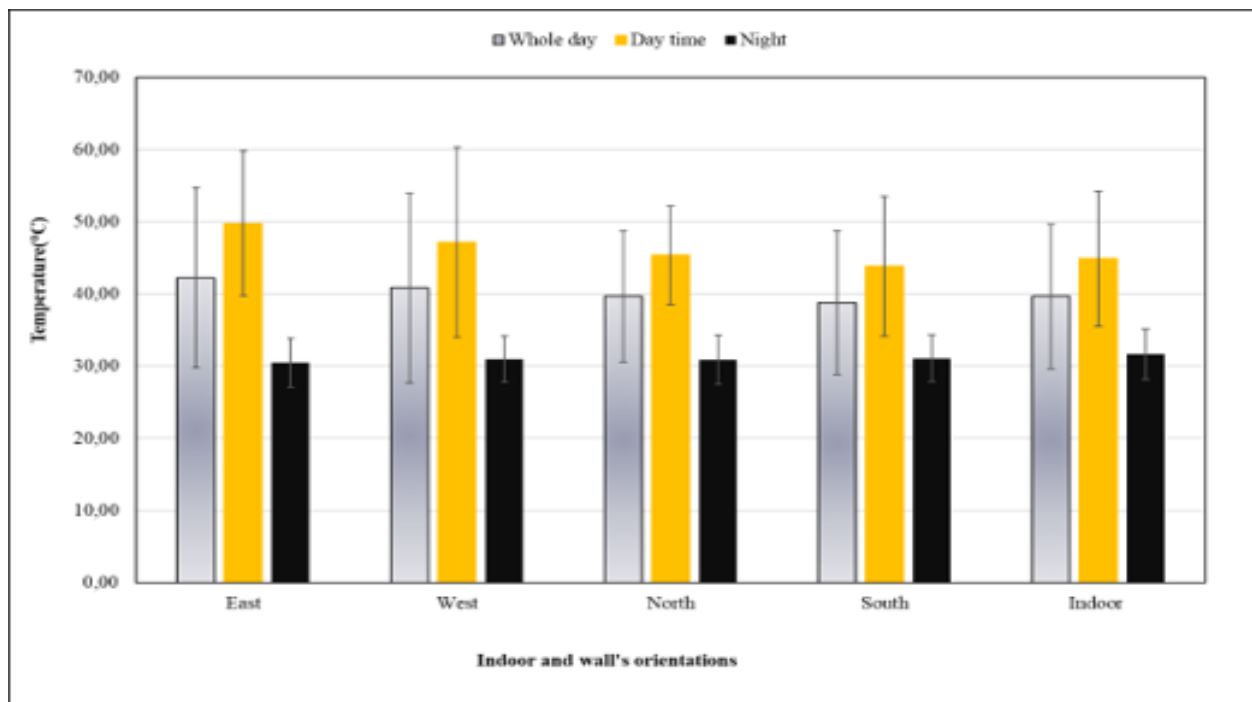


Figure 70 : Température intérieure moyenne de la chambre, ainsi que température moyenne de ses quatre surfaces extérieures pendant la journée, la nuit et toute la journée du 23 juin 2020 .

Comme indiqué précédemment et observé sur la Fig. 71, l'orientation des murs a peu d'impact sur la température nocturne de leur surface extérieure (barres noires), qui était en moyenne autour de 30,9 °C le 23 juin. En effet, l'écart de température moyen maximum enregistré entre les différentes orientations pendant la nuit étaient de 0,6 °C le 23 juin. De plus, nous observons que, comme le confirme la faible erreur standard, les températures des surfaces extérieures des différents murs ne varient pas autant la nuit que pendant la nuit. jour.

La surface extérieure du mur ouest présente la plus grande différence entre les températures maximales et minimales, 40,3 °C le 23 juin, tandis que la surface extérieure du mur nord présente la plus petite différence, 27,7 °C le même jour. Ce résultat est en accord avec l'écart type présenté sur la figure 70 (journée entière).

La température intérieure de la chambre est uniquement le résultat du transfert de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur de la chambre à travers son enveloppe (les quatre murs et les tuiles supérieures et inférieures). En prenant en compte la température moyenne des surfaces extérieures des murs au 23 juin 2020, la figure 71 représente l'échange thermique entre l'espace intérieur de la chambre et les surfaces extérieures de ses murs pendant le jour et la nuit d'un même jour indépendamment du temps (état stationnaire conditions).

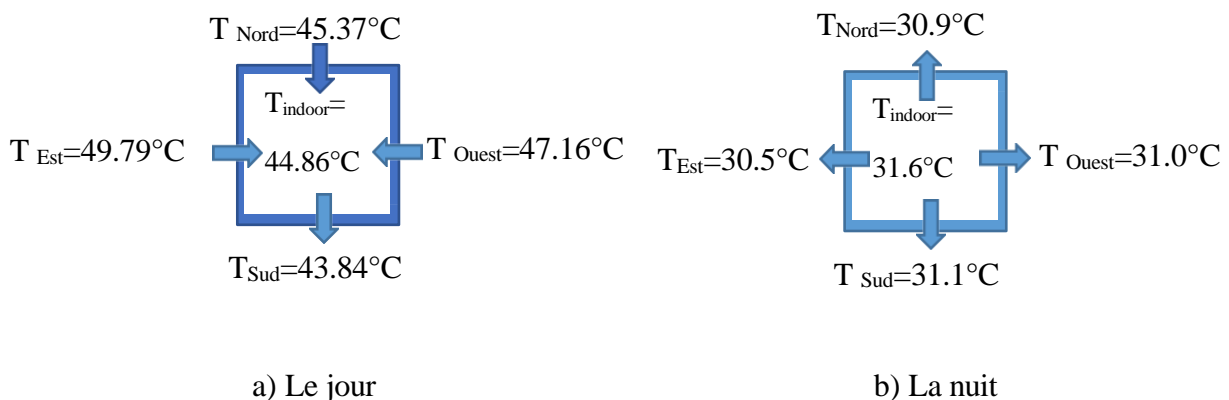


Figure 71 : Direction du transfert de chaleur à travers l'enveloppe de la chambre le 23 juin 2020.

Comme on le voit, les murs orientés vers l'est, l'ouest et le nord pendant la journée contribuent à chauffer l'espace intérieur en raison du concept bien connu selon lequel la chaleur se déplace d'un milieu chaud vers un milieu froid (Fig. 71). . La nuit, la chaleur acquise pendant la journée s'échappe à travers ces quatre murs et sort (fig. 71).

- **Résultats de juillet**

La figure 72 représente l'évolution de la température le 18 juillet 2020 au milieu des faces extérieures des parois de la chambre orientées dans les quatre directions fondamentales. Cet exemple sert de représentation de ce qui se passe en juillet. Encore une fois, l'effet d'orientation des murs peut n'être perceptible que lorsque le soleil brille (c'est-à-dire pendant la journée). Comme le montre la figure 72, la

température des surfaces extérieures des murs diminue pendant la nuit et est indépendante de l'orientation. Les courbes représentant l'évolution de la température au milieu des surfaces extérieures des quatre murs présentent à nouveau le même schéma, comme le montre la figure 72 : croissante, maximale, puis descendante. Par ailleurs, la majorité des observations formulées précédemment sur la forme des courbes obtenues à partir des directions principales sont toujours valables pour juillet. Par rapport à juin, le mur le plus froid se trouve toujours du côté ouest, mais seulement pendant une partie de la matinée (le 18 juillet 2020, illustré sur la figure 72, en est un bon exemple).

Les figures 72 et 69 démontrent que, contrairement au mois de juin, il existe une différence entre les températures les plus élevées enregistrées sur les surfaces extérieures des murs est et ouest. En réalité, un écart moyen de plus de 6 °C entre ces deux maximums a été enregistré au cours de l'expérience.

Là encore, il apparaît que le mur orienté à l'est est le seul dont la surface extérieure enregistre sa température la plus élevée le matin (c'est-à-dire entre le lever du jour et midi). Cette dernière est donc la plus chaude à cette période. Ensuite, les surfaces extérieures des murs pointaient vers le nord, le sud et l'ouest dans cet ordre. À titre d'exemple, le 18 juillet, les surfaces extérieures des murs est, nord, sud et ouest ont enregistré des températures matinales moyennes de 48,22 °C, 37,02 °C, 35,46 °C et 33,62 °C, respectivement. Mais dans l'après-midi, la surface extérieure du mur orientée vers l'ouest est la plus chaude, suivie par celles orientées vers le sud, l'est et le nord dans cet ordre, avec des températures moyennes de 57,24 °C, 51,48 °C, 45 °C et 42,05 °C. respectivement, enregistrés le 18 juillet.

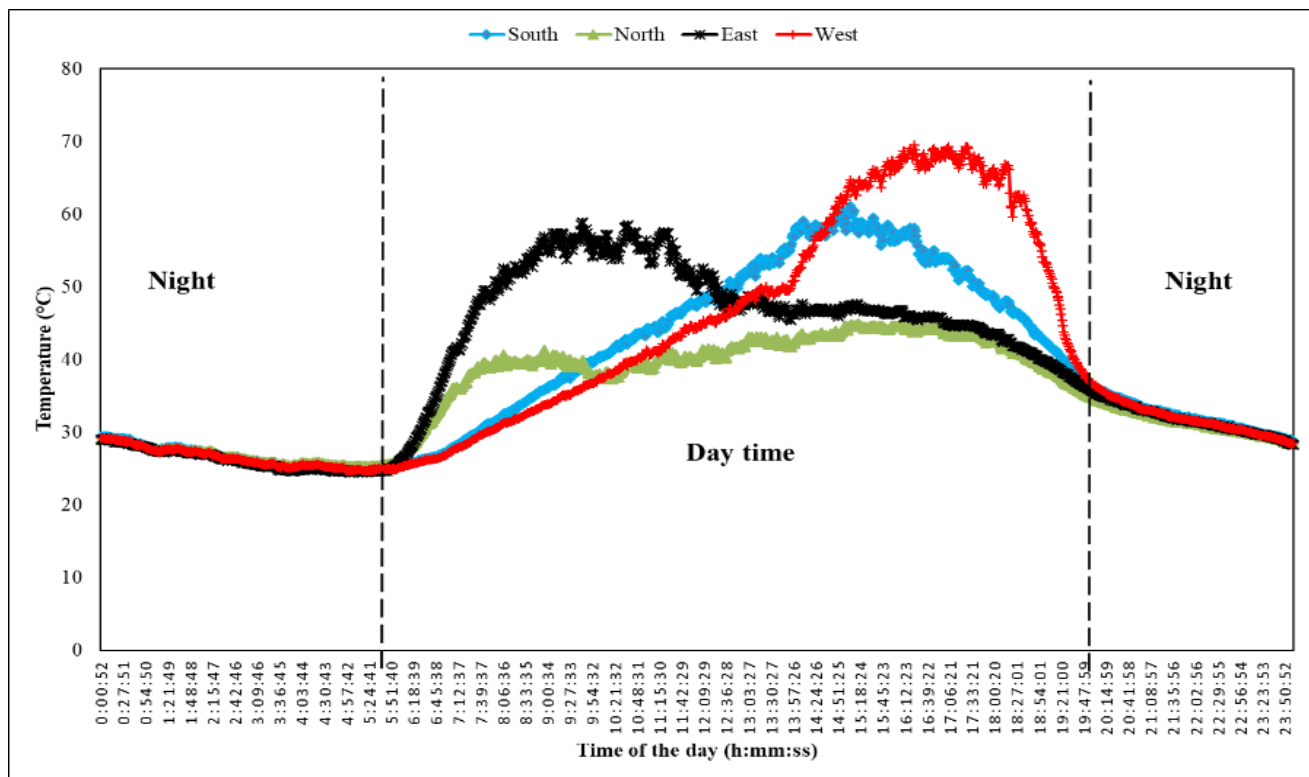


Figure 72 :Evolution de la température le 18 juillet 2020 au milieu des faces extérieures des parois de la chambre orientées dans les quatre directions principales .

Selon les températures moyennes de chacune des surfaces extérieures des quatre murs au cours des jours d'expérimentation, les surfaces extérieures des murs orientées à l'est et à l'ouest sont les plus chaudes et viennent après les surfaces extérieures des murs sud et nord dans cette séquence. (voir toute la journée sur la Fig. 72). De plus, il n'y a pas d'écart considérable de température moyenne entre les surfaces extérieures des murs orientés vers l'est et vers l'ouest (moins de 1,05 °C). Cependant, le mur orienté vers le nord semble avoir la surface extérieure la plus fraîche, avec une différence de température de plus de 3,9 °C par rapport à la face extérieure du mur orienté vers l'est (journée entière et diurne sur la figure 73).

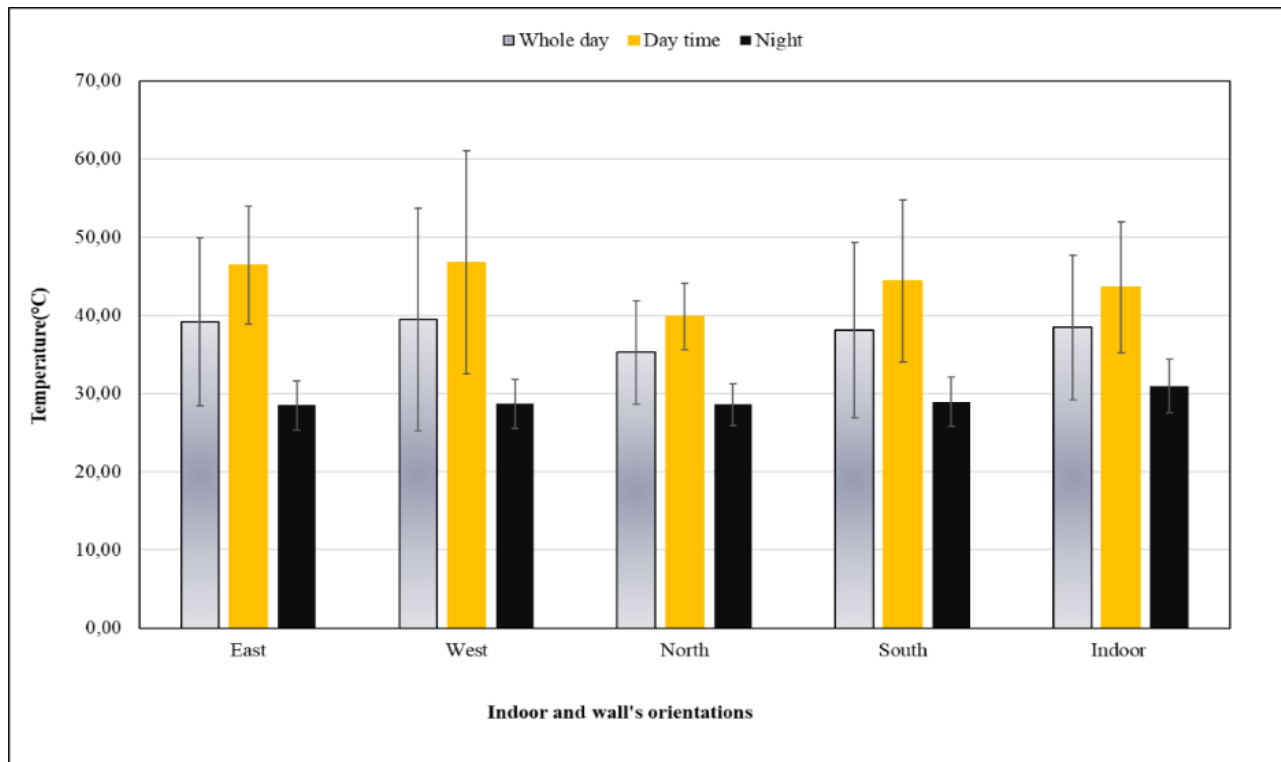


Figure 73 :Température intérieure moyenne de la chambre, ainsi que température moyenne de ses quatre surfaces extérieures pendant la journée, la nuit et toute la journée du 18 juillet 2020 .

Là encore, l'orientation des murs a un effet minime sur la température nocturne de leur surface extérieure (barres noires sur la figure 73), qui était en moyenne autour de 28,7 °C le 18 juillet. En effet, l'écart de température moyen maximum enregistré entre les différentes orientations la nuit du 18 juillet 2020 était de 0,43 °C. Les températures des différents murs ne varient pas autant la nuit que pendant la journée, ce qui est encore une fois corroboré par la faible erreur type (barres noires sur la figure 73).

La surface extérieure du mur ouest présentait une différence de température entre son maximum et son minimum de 44,60 °C, tandis que la surface extérieure du mur nord présentait une différence de température de seulement 19,50 °C le 18 juillet 2020. Ce résultat est cohérent avec l'écart type illustré sur la figure. 74 (journée entière). Comme à la fin du mois de juin, la surface extérieure du mur nord enregistre la plus faible variation de température, tandis que la surface extérieure du mur ouest enregistre la plus grande.

Sur la base des résultats présentés sur la figure 73, la figure 72 représente l'échange thermique entre l'espace intérieur de la chambre et les surfaces extérieures de ses parois pendant le jour et la nuit dans des conditions stables (indépendantes du temps) le 18 juillet 2020 .

Comme on peut le constater, les murs orientés vers le sud, l'est et l'ouest pendant la journée de juillet contribuent au chauffage de la chambre puisque la température de leur surface extérieure est supérieure à la température de l'espace intérieur. La chaleur accumulée tout au long de la journée s'échappe à travers les quatre murs pendant la nuit, comme le montre la Fig. 74.

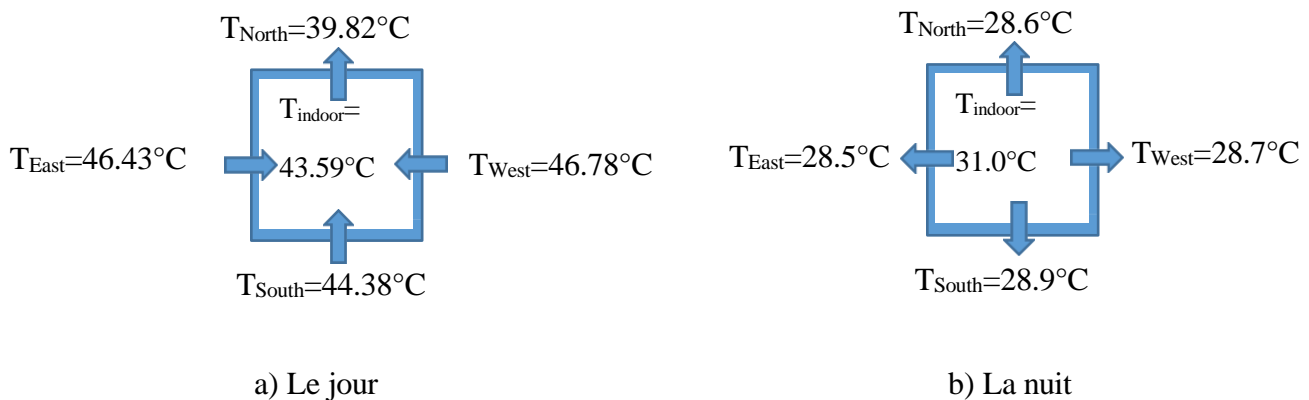


Figure 74 : Direction du transfert de chaleur à travers l'enveloppe de la chambre le 18 juillet 2020.

- **Résultats du mois d'août**

La figure 75 montre la progression de la température le 30 août 2020 au milieu des surfaces extérieures des parois de la chambre faisant face aux quatre directions cardinales principales. Il convient de noter que cet exemple constitue une illustration représentative de ce qui se passe fin août. Là encore, l'effet de l'orientation des murs sur la température de leurs surfaces extérieures ne peut être observé que lorsque le soleil est présent (de jour). La nuit, les quatre murs se comportent de la même manière quelle que soit leur orientation. En d'autres termes, ils ont presque la même température de surface extérieure, qui diminue du coucher du soleil jusqu'à l'aube (Fig. 75).

Les courbes illustrant l'évolution de la température au milieu des surfaces extérieures des quatre murs suivent à nouveau le même schéma, comme le montre la figure 75 , elles montent, atteignent leur maximum, puis diminuent. La majorité des observations mentionnées précédemment concernant la forme des courbes obtenues dans les quatre directions principales restent valables pour le mois d'août. La surface extérieure du mur orienté à l'ouest est la plus fraîche le matin pendant un certain temps, notamment jusqu'à 10 h 45 le 30 août, comme cela a été observé en juillet. Au début du mois d'août et vers la fin du mois, respectivement, les surfaces extérieures des murs ouest et sud enregistrent les températures les plus élevées. Encore une fois, la température de la surface extérieure du mur ouest atteint son maximum tardivement (Fig. 75). Contrairement aux observations précédentes (mois de juin), le mur orienté au sud se comporte différemment le matin que le mur orienté à l'ouest (Fig. 72 et 69).

Encore une fois, la température de la surface extérieure du mur orienté à l'est ne culmine que le matin (c'est-à-dire entre le lever du soleil et midi). C'est donc cette dernière qui est la plus chaude le matin, puis les surfaces extérieures des murs qui sont orientées respectivement vers le nord, le sud et l'ouest au début du mois d'août. Vers la fin du mois, cet ordre change légèrement, permettant à la surface extérieure du mur sud d'être plus chaude que celle du mur nord (Fig. 75). Par exemple, les températures matinales moyennes de la surface extérieure des murs est, nord, sud et ouest le 14 août étaient respectivement de 46,76 °C, 35,87 °C, 35,20 °C et 33,41 °C. Les températures respectives de la surface extérieure de ces murs le 30 août étaient de 45,52 °C, 36,46 °C, 38,23 °C et 35,38 °C. Début août, la surface extérieure du mur orientée vers l'ouest présente la température la plus élevée l'après-midi, suivie par celles orientées vers le sud, l'est et le nord. Cependant, la surface extérieure du mur sud est la plus chaude vers la fin du mois, suivie par les surfaces extérieures des murs ouest, est et nord dans cet ordre. À titre d'illustration, le 14 août dans l'après-midi, les températures moyennes sur les surfaces extérieures des murs ouest, sud, est et nord étaient respectivement de 59,91 °C, 59,17 °C, 50,74 °C et 44,14 °C. Le 30 août, les températures correspondantes pour les surfaces extérieures de ces murs étaient de 54,36 °C, 57,45 °C, 47,74 °C et 45,33 °C. De plus, la surface extérieure du mur sud atteint sa température la plus élevée d'abord dans l'après-midi, suivie par les surfaces extérieures des murs nord et ouest dans cet ordre (Fig. 75). Les résultats obtenus au mois d'août peuvent être attribués au mouvement du soleil qui, comme le montre la figure 13 chapitre II, se rapproche de l'équateur vers la fin du mois d'août. Durant cette période, le soleil se lève presque à l'est et se couche presque à l'ouest.

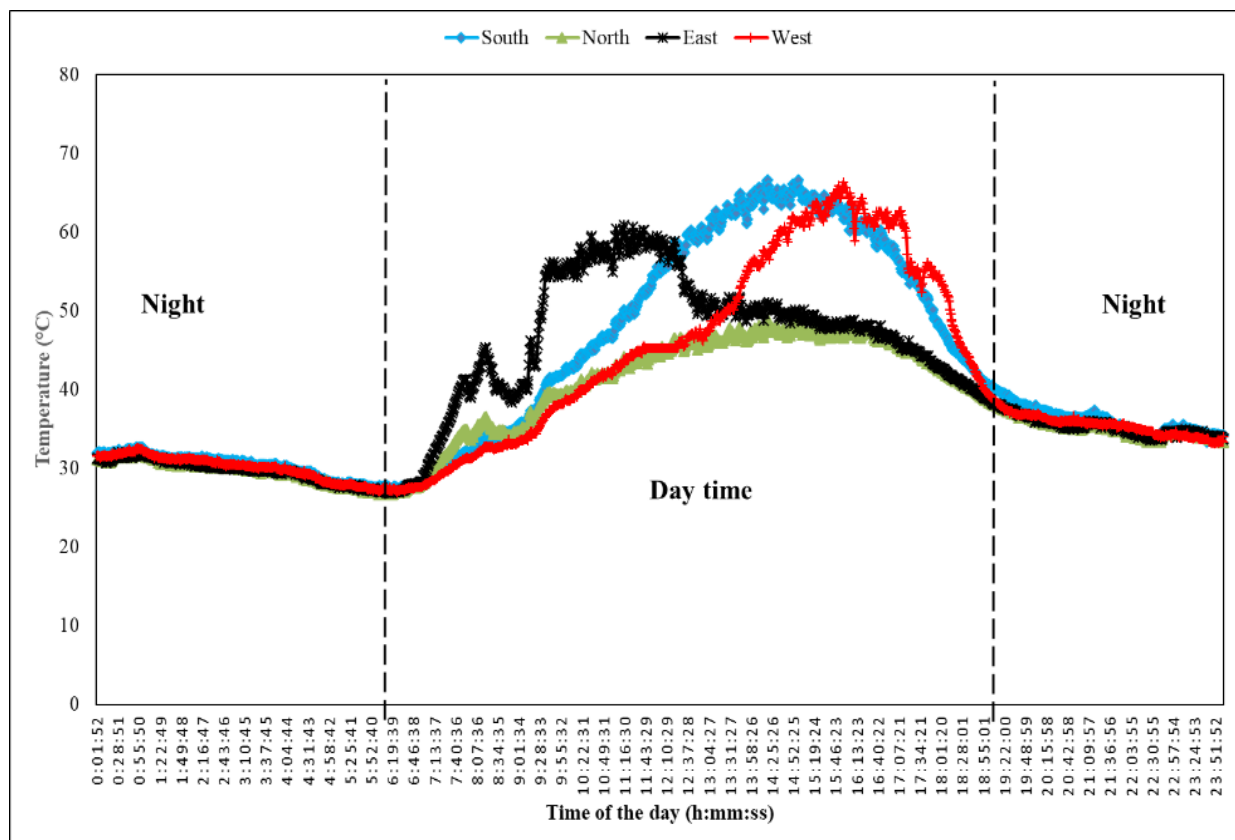


Figure 75 : Évolution de la température au 30 août 2020 au milieu des faces extérieures des parois de la chambre orientées dans les quatre directions principales.

D'après les calculs des températures moyennes de toutes les surfaces extérieures des murs au cours de la période expérimentale, la surface extérieure du mur orientée au sud semble être la plus chauffée, suivie par les surfaces extérieures des murs est, ouest et nord dans cet ordre (l'ensemble jour sur la Fig. 75). De plus, il existe une légère variation de la température moyenne des surfaces extérieures des murs sud, est et ouest, comme le montre la figure 75 (journée entière), utilisée comme exemple à la fin du mois d'août. En effet, la différence de température moyenne entre les parois extérieures des murs sud et ouest est de 1,1 °C. Il fait 0,6 °C entre les surfaces extérieures des murs est et ouest. Cette différence dépasse 5 °C entre les surfaces extérieures des murs orientées au sud et au nord. En conséquence, il semble que le mur orienté au nord soit le plus froid en août, comme en juillet.

Là encore, l'orientation des murs a peu d'impact sur la température nocturne de leur face extérieure (barres noires sur la figure 76), qui, le 30 août, était en moyenne d'environ 32,3 °C (pris à titre d'exemple). En effet, l'écart de température moyenne maximum enregistré entre les différentes orientations lors de la dernière nuit du mois d'août n'était pas supérieur à 0,95 °C. La faible erreur standard illustrée sur la figure 64 (sur les barres noires) confirme une fois de plus que les températures des surfaces extérieures des différents murs ne varient pas autant la nuit que pendant la journée.

Le 30 août 2020, la surface extérieure du mur sud présentait la différence de température la plus élevée entre son maximum et son minimum, soit 39,40 °C, tandis que la surface extérieure du mur nord présentait la différence de température la plus faible, soit seulement 22,20 °C. Ce résultat est en accord avec l'écart type représenté sur la figure 76 (journée entière). De plus, le 14 août, la surface extérieure du mur ouest a enregistré l'écart de température le plus élevé entre son maximum et son minimum, tandis que la surface extérieure du mur nord a enregistré le plus faible. Ce comportement début août est similaire à celui observé en juin et juillet.

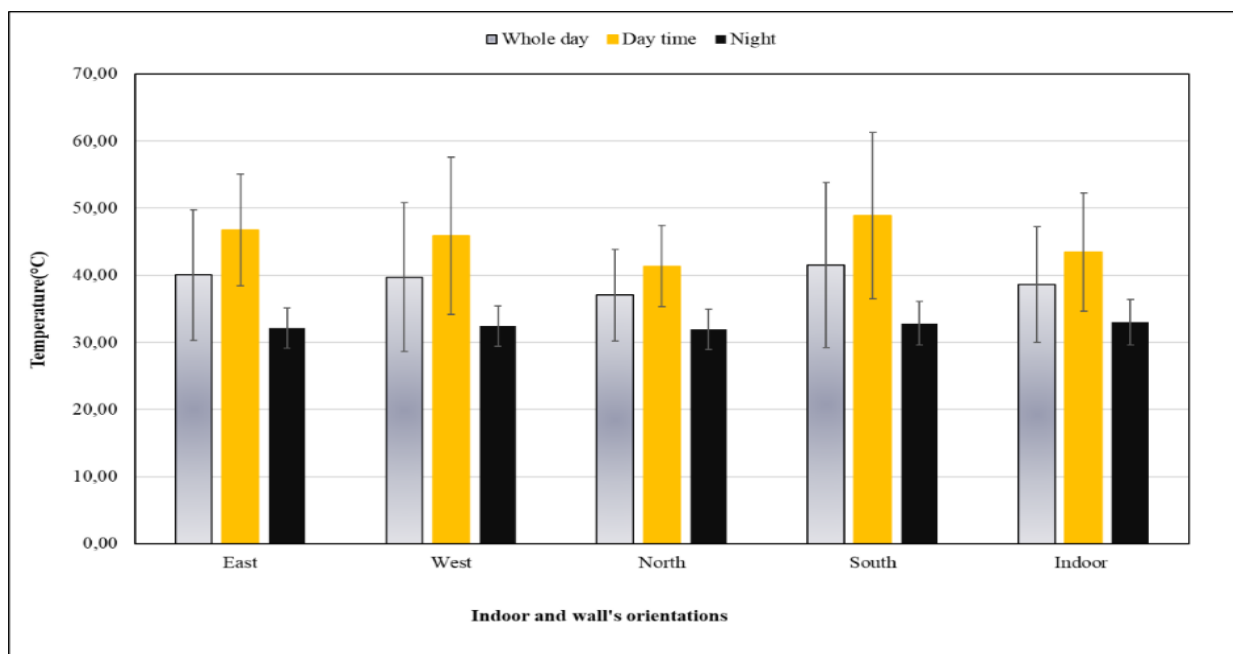


Figure 76 : Température intérieure moyenne de la chambre, ainsi que température moyenne de ses quatre surfaces extérieures pendant la journée, la nuit et toute la journée du 30 août2020 .

La figure 77 représente l'échange thermique entre l'espace intérieur de la chambre et les surfaces extérieures de ses parois tout au long de la journée et de la nuit du 30 août dans des conditions stables, sur la base de ce qui est montré sur la figure 75.

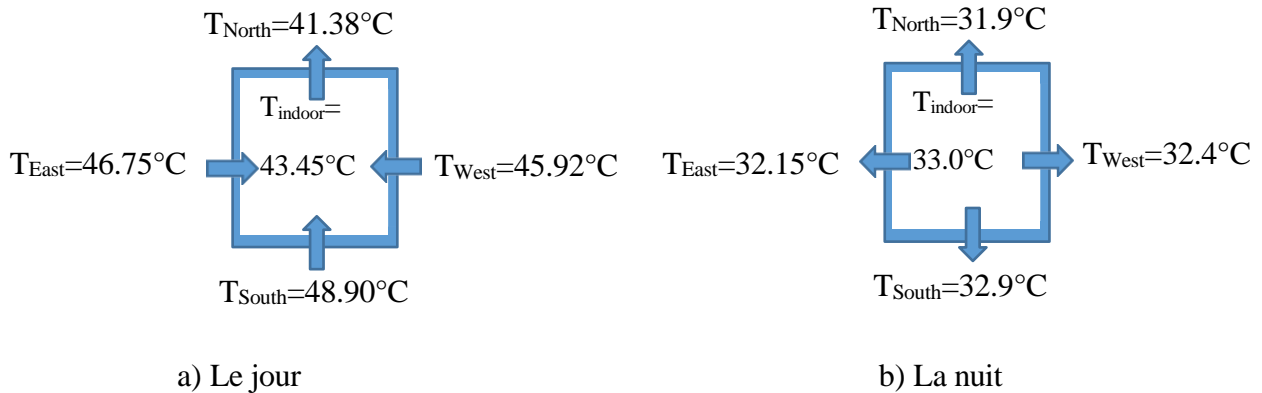


Figure 77 : Direction du transfert de chaleur à travers l'enveloppe de la chambre le 30 août 2020 .

Encore une fois, la chambre est chauffée n'importe quel jour du mois d'août par les murs orientés vers l'est, l'ouest et le sud. La nuit, les quatre murs permettent à la chaleur accumulée toute la journée de s'échapper.

- **Résultats de septembre**

La figure 78 représente l'évolution de la température le 11 septembre 2020 au milieu des faces extérieures des parois de la chambre faisant face aux quatre directions principales. Il convient de mentionner que cet exemple est une bonne représentation de ce qui se passe à la fin de l'été (début septembre).

La première chose qui ressort est la baisse de température de la figure 78, provoquée soit par le vent, soit par la présence de nuages cachant le soleil, comme ce fut le cas le 11 septembre. Comme nous l'avons constaté précédemment, l'influence de la direction des murs sur leurs surfaces extérieures, la température n'est apparente qu'en présence du soleil, c'est-à-dire pendant la journée. La nuit, les surfaces extérieures des quatre murs ont presque la même température, qui descend du coucher du soleil jusqu'à l'aube. Comme le montre la figure 78, les courbes de variation de température au centre des surfaces extérieures des quatre murs ont à nouveau le même profil : elles augmentent, culminent, puis diminuent. Là encore, la plupart des observations faites précédemment sur la forme des courbes acquises dans les quatre directions primaires sont encore applicables à la fin de l'été. La face extérieure du mur orienté à l'ouest est la plus fraîche le matin pendant une certaine période, en particulier jusqu'à 11 h 38 le 11 septembre, ce qui est différent de juin tout en étant comparable à juillet et août. Comme constaté fin août, la face extérieure du mur orienté au sud a également enregistré la température la plus élevée au début du mois de septembre. La surface extérieure du mur orienté à l'ouest est plus froide le matin que celle du mur orienté au sud, mais comme le montre la figure 68, leurs températures convergent avant la tombée de la nuit. Le même comportement s'observe début septembre pour les surfaces extérieures des murs orientés au nord et à l'est que pour le reste de l'été. La surface extérieure du mur sud atteint sa température maximale d'abord dans l'après-midi, puis la surface extérieure du mur nord et enfin la surface extérieure du mur ouest (Fig. 78).

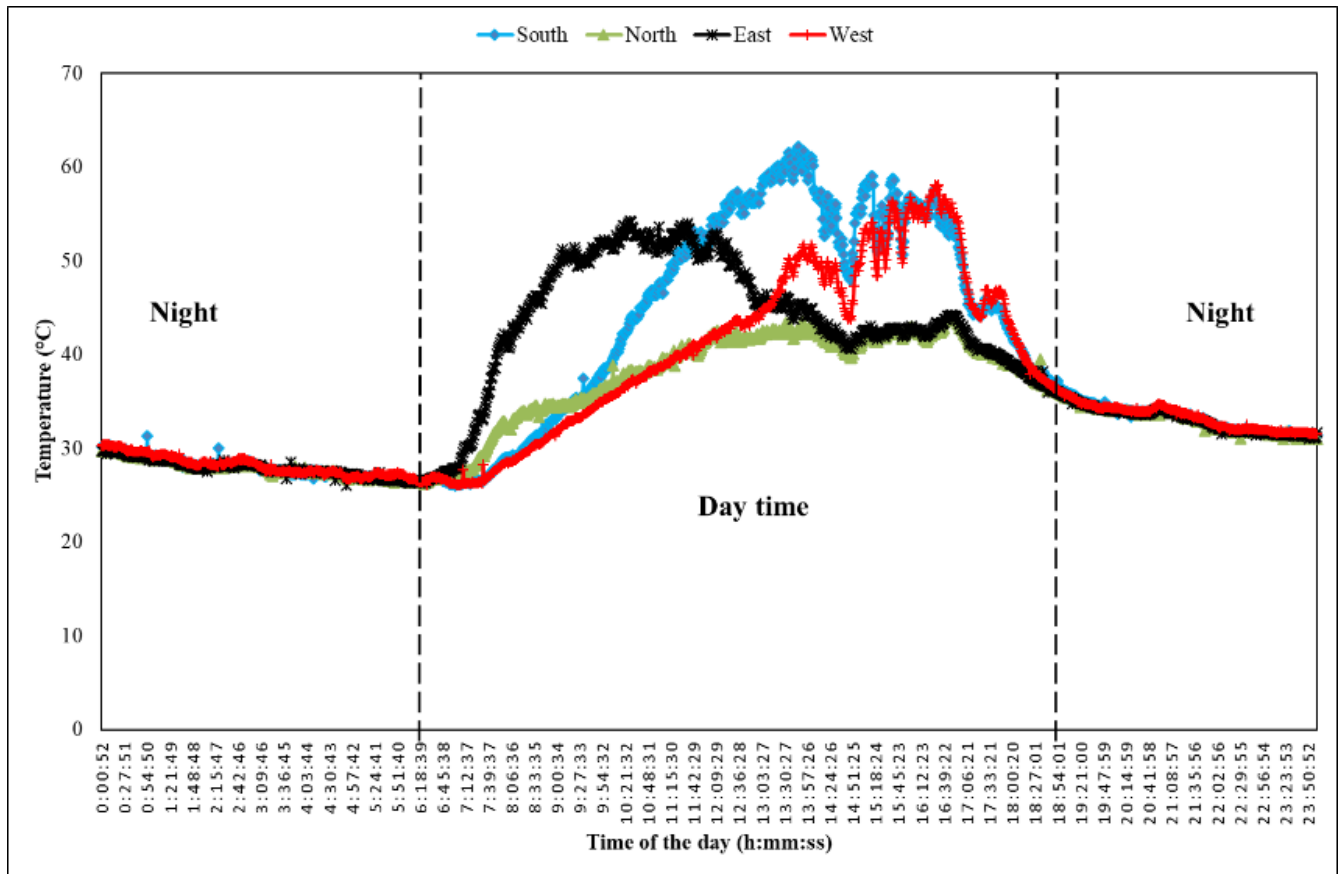


Figure 78 : Évolution de la température le 11 septembre 2020 au milieu des faces extérieures des parois de la chambre orientées dans les quatre directions principales.

Là encore, la surface extérieure du mur orientée vers l'est est la seule qui atteint sa température la plus élevée le matin (du lever du jour à midi). Par conséquent, comme on l'a constaté à la fin du mois d'août, cette dernière est la plus chaude le matin, suivie par les surfaces extérieures des murs orientées vers le sud, le nord et l'ouest dans cet ordre. Les températures matinales moyennes sur les faces extérieures des murs est, sud, nord et ouest, par exemple, étaient respectivement de 44,74 °C, 36,31 °C, 34,44 °C et 32,81 °C le 11 septembre. Surfaces des parois de la chambre, les températures moyennes de l'après-midi restent dans le même ordre qu'à la fin du mois d'août. En effet, le 11 septembre, par exemple, les surfaces extérieures des murs sud, ouest, est et nord ont enregistré des températures moyennes l'après-midi de 52,04 °C, 47,49 °C, 42,96 °C et 41,18 °C, respectivement.

Comme le montre la figure 78 (journée entière), utilisée comme exemple typique début septembre, les calculs des températures moyennes de toutes les surfaces extérieures des murs pendant la durée de l'expérience indiquent que la surface extérieure du mur orientée vers le sud semble être la plus chauffée, suivie des surfaces extérieures des murs orientées vers l'est, l'ouest et le nord, dans cet ordre. En effet, le 11 septembre, la différence de température moyenne entre les surfaces extérieures des murs sud et est était de 0,72 °C. Il faisait 2,08 °C entre les surfaces extérieures des murs sud et ouest et dépassait 3 °C entre

les surfaces extérieures des murs orientés au sud et au nord. Début septembre, il apparaît que le mur orienté au nord est le plus froid (journée entière et journée sur la figure 78), comme en juillet et août.

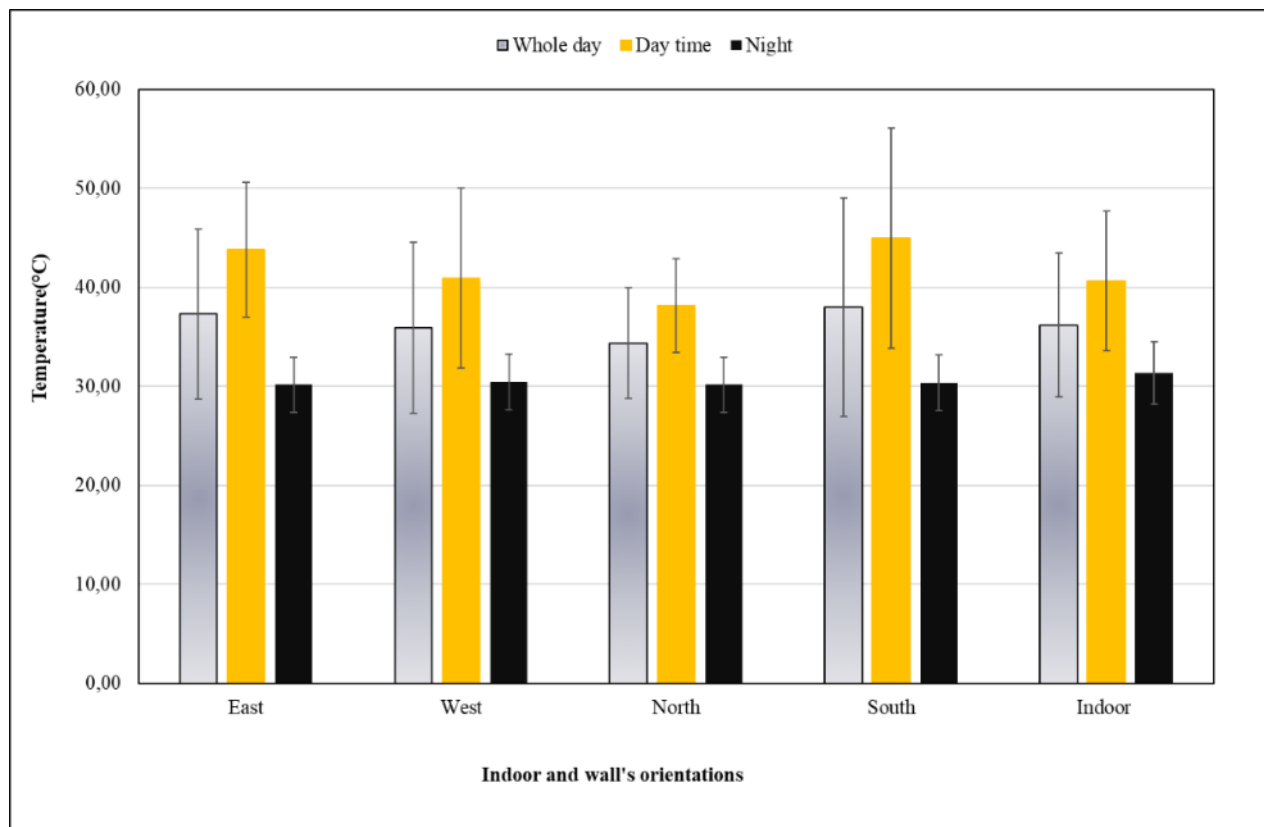


Figure 79 : Température intérieure moyenne de la chambre, ainsi que température moyenne de ses quatre surfaces extérieures pendant la journée, la nuit et toute la journée du 11 Septembre 2020 .

Une fois de plus, l'orientation des murs a un effet minime sur les températures nocturnes de leurs surfaces extérieures (barres noires sur la figure 79), qui, le 11 septembre, étaient en moyenne d'environ 30,3 °C (pris comme exemple). En effet, la différence maximale de température moyenne enregistrée entre les différentes orientations était de 0,30 °C le même jour. La faible erreur standard de la figure 79 (sur les barres noires) démontre une fois de plus que les variations de température entre les surfaces extérieures des différents murs sont moins prononcées la nuit que pendant la journée.

Début septembre et comme observé fin août, la surface extérieure du mur sud présente la différence de température la plus élevée entre son maximum et son minimum, tandis que la surface extérieure du mur nord présente la différence de température la plus faible. Par exemple, nous avons enregistré respectivement 36,20 °C et 17,80 °C pour les surfaces extérieures des murs précédents le 11 septembre. Ce résultat est conforme à l'écart type présenté sur la figure 78 (journée entière).

Sur la base de ce qui est montré sur la figure 78, la figure 79 représente l'échange thermique entre l'espace intérieur de la chambre et les surfaces extérieures de ses murs tout au long de la journée et de la nuit du

11 septembre, indépendamment du temps. Début septembre, la chambre est à nouveau chauffée par le soleil tout au long de la journée, tombant sur les murs orientés est, ouest et sud (Fig. 80 a). La chaleur ainsi accumulée toute la journée est évacuée la nuit à travers les quatre murs (Fig. 80b).

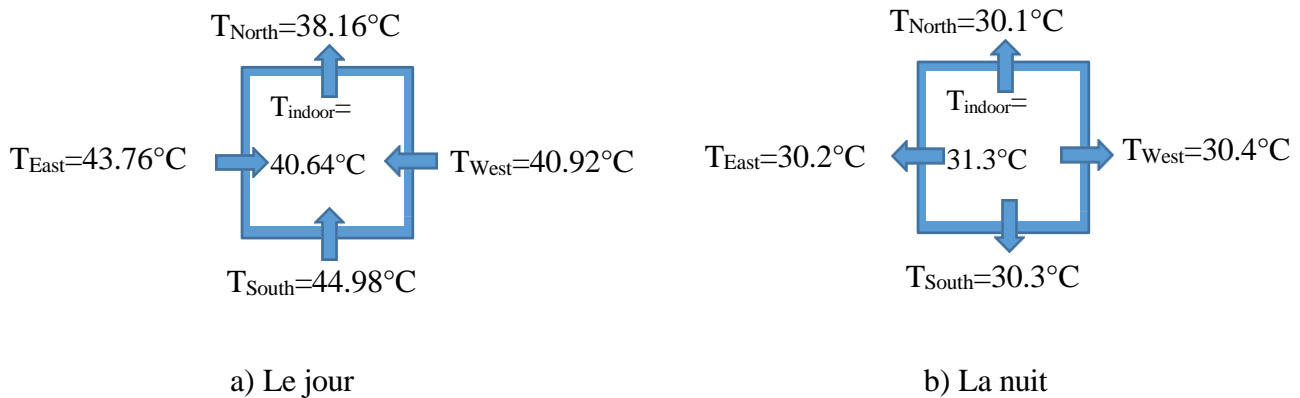


Figure 80 : Direction du transfert de chaleur à travers l'enveloppe de la chambre le 11 septembre 2020 .

L'évolution de la température de la face extérieure des mêmes murs orientés vers les quatre orientations principales en été a été étudiée pour la première fois à travers cette enquête dans des conditions stables (indépendantes du temps) et instationnaires (dépendantes du temps). De plus, les résultats confirment ce qui a été rapporté dans la littérature, tant théorique qu'expérimentale, concernant l'impact de l'orientation sur le rayonnement solaire incident [95, 96], qui a un effet substantiel sur la température des surfaces extérieures des murs, comme le montre précédemment. Le vent affecte également cette température car il pourrait accélérer le processus de transmission de chaleur entre les surfaces extérieures des murs et l'environnement (convection forcée). De plus, la position du soleil dans le ciel a un impact significatif sur le rayonnement solaire incident et, par conséquent, sur la température des surfaces extérieures des murs. Comme chacun le sait, l'angle selon lequel le rayonnement solaire frappe une surface détermine la quantité d'énergie que cette surface collecte du soleil. En effet, il capte moins d'énergie lorsque le rayonnement incident est parallèle à la surface que lorsqu'il est perpendiculaire ; cette dernière situation entraîne la capture de la plus grande quantité d'énergie. Comme nous l'avons déjà mentionné, la surface extérieure du mur est est la plus chaude le matin, lorsque le soleil est à l'est, car les rayons du soleil la frappent perpendiculairement. De plus, le rayonnement solaire frappe le mur sud perpendiculairement en septembre et août lorsqu'il est bas dans le ciel et parallèlement en juin lorsqu'il est haut, ce qui fait que le mur sud est respectivement le mur le plus chaud et le plus froid. Ce résultat est cohérent avec notre enquête expérimentale antérieure sur l'effet de l'orientation sur le rayonnement solaire incident [98]. La nuit, lorsque le soleil se couche, la terre se refroidit, tout comme les parois de la chambre, quelle que soit leur orientation.

Cette étude est très significative pour les maisons en brique en Algérie qui manquent d'isolation et de peinture sur leurs façades extérieures (Fig. 81). De plus, l'étude actuelle indique que les matins d'été, les façades sud et ouest (orientations) sont les plus fraîches, à l'exception de la fin de la saison (fin août et début septembre), où le nord est plus frais que le sud. Comme ces façades sont plus fraîches que la façade la plus chaude (la façade Est) de plus de 9°C , nous pouvons installer des fenêtres avec protection solaire sur ces murs extérieurs (S/O ou N/O) et les ouvrir le matin pour rafraîchir l'intérieur. Cependant, l'après-midi, ce sont les façades ouest et sud qui deviennent les plus chaudes, nécessitant la fermeture de ces

fenêtres. En été, la façade Est est la plus chaude le matin, tandis que les façades Nord et Est sont les plus fraîches l'après-midi, avec un écart de température de plus de 8° par rapport à la face la plus chaude.



Figure 81 : Maisons en brique en Algérie .

Celui-ci recommande que, afin de réduire la consommation excessive d'énergie pour refroidir une pièce comportant un mur extérieur et occupée toute la matinée de l'été, l'orientation ouest de son mur extérieur soit privilégiée par rapport aux orientations est, nord et sud. Si une pièce est occupée toute l'après-midi, les orientations Est et Nord sont à privilégier plutôt que les orientations Sud et Ouest pour ses façades extérieures. La cuisine est le lieu où l'on cuisine (source de chaleur). Si cette dernière ne possède qu'une seule façade extérieure (mur extérieur), il est recommandé de l'orienter vers le nord pour diminuer les apports de chaleur estivale. La façade nord étant la plus froide, des unités de climatisation extérieures doivent y être placées pour un meilleur rejet de la chaleur en été.

Conclusion

Au vu de l'étude en cours sur l'évolution de la température de la face extérieure de ces mêmes murs orientés vers les quatre directions principales en été à Ouled Sidi Brahim (Algérie), on peut retenir les points suivants :

- L'effet de l'orientation des murs sur la température de leurs surfaces extérieures n'est apparent qu'en présence du soleil, c'est-à-dire pendant la journée. L'orientation des murs ne semble pas faire de différence notable la nuit. De plus, les températures des différents murs ne varient pas autant la nuit que le jour .

-Le matin est le moment le plus chaud de la journée sur le mur orienté à l'est tout au long de l'été. Le mur orienté à l'ouest, en revanche, présente la surface extérieure la plus froide pendant une partie de la matinée. De plus, au début de l'été, la face extérieure du mur exposé au nord est plus chaude que celle du mur exposé au sud le matin ; vers la fin de la saison, cependant, c'est le contraire qui se produit .

- L'après-midi, au début de l'été, c'est la face extérieure du mur exposé à l'ouest qui est la plus chaude. Cependant, la surface extérieure du mur sud prendra sa place vers la fin de la saison .

- Les après-midi d'été sont les plus frais sur le mur orienté au nord, sauf en juin, où la surface extérieure du mur orienté à l'est enregistre les températures les plus basses .
- Les faces extérieures des murs ouest et sud reçoivent en été davantage de rayonnement solaire l'après-midi que les deux autres orientations .
- La surface extérieure du mur est culmine en premier pendant l'été, suivie par les surfaces extérieures des murs sud, nord et ouest dans cet ordre. Cet ordre varie peu en juin, où le mur nord précède le mur sud .
- Sur la base des températures moyennes des quatre murs pendant les jours de l'expérience (état stable), la surface extérieure du mur orientée vers l'est semble être la plus chaude en juin et juillet. En août et début septembre, c'est la surface extérieure du mur orienté au sud qui est la plus chaude. Pendant l'été, la surface extérieure du mur nord est la plus fraîche, sauf en juin, lorsque le mur sud est le plus froid .
- Sauf en juin, les murs orientés est, ouest et sud contribuent au chauffage de la chambre tout au long de l'été. En juin, la chaleur provenant du soleil peut pénétrer par les murs nord, est et ouest et s'échapper par le mur sud. En été, la chaleur accumulée toute la journée s'échappe la nuit par les quatre murs.
- Les murs orientés est et ouest sont les plus chauds au début de l'été, tandis que ceux orientés sud et est sont les plus chauds en fin de saison.
- Les trajectoires journalières et annuelles du soleil ont un impact majeur sur la température des murs des bâtiments. De ce fait, l'orientation des murs d'un bâtiment doit être soigneusement choisie afin d'économiser l'énergie .

V-6).Présentation et analyse des résultats d'une étude de l'effet de la direction et de l'inclinaison de la surface sur la quantité de rayonnement solaire incident

Dans une étude expérimentale sur l'effet de l'orientation et de l'inclinaison de la surface sur l'irradiation solaire incidente application aux bâtiments l'effet de l'orientation et de l'angle du toit sur le rayonnement solaire incident . application aux bâtiments, deux aspects ont été abordés au cours de cette étude : l'effet de la direction et de l'angle d'inclinaison sur le rayonnement solaire incident, indépendamment de la nature de la surface exposée. au soleil. A l'exception du mois de février, les jours choisis pour les expérimentations correspondent à des journées types. En d'autres termes, le rayonnement extraterrestre quotidien des jours sélectionnés est quasiment égal au rayonnement extraterrestre mensuel moyen. Au lieu d'utiliser les valeurs de l'angle d'azimut (γ), nous avons directement utilisé les orientations elles-mêmes dans l'analyse suivante. En effet, les angles d'azimut sont donnés comme suit : $\gamma = 0^\circ$ pour le sud, $\gamma = 90^\circ$ pour l'ouest, $\gamma = 180^\circ$ pour le nord et $\gamma = 270^\circ$ pour l'est.

V-6-1). L'effet de l'orientation des surfaces exposées au soleil sur le rayonnement solaire incident

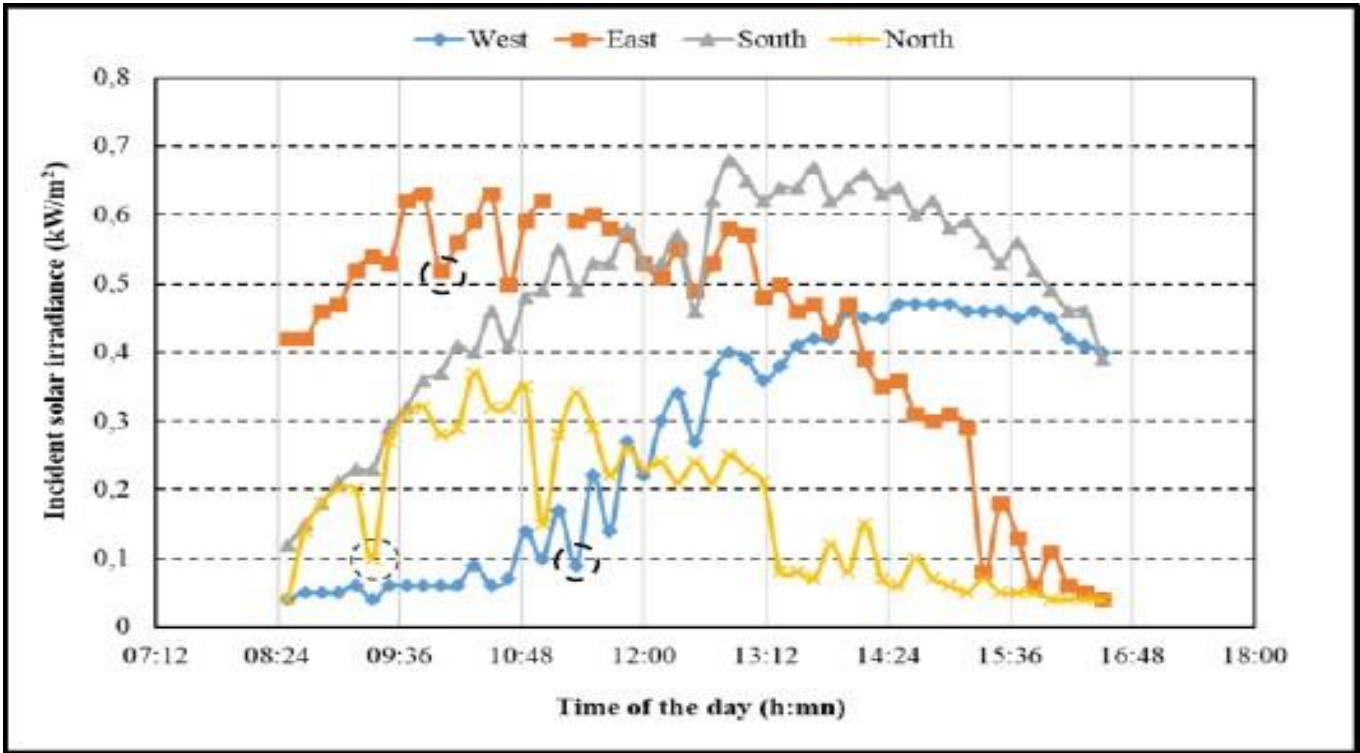
L'orientation des surfaces exposées au soleil par rapport aux quatre points cardinaux affecte la quantité d'énergie rencontrée. La figure 82 montre cinq exemples de rayonnement solaire tombant sur une surface inclinée à un angle de 40 degrés et dirigée vers les quatre points cardinaux au cours des cinq jours d'étude. L'énergie solaire incidente est clairement affectée par la direction de la surface exposée au soleil, comme en témoigne la différence de rythmes obtenus selon la direction.

En chiffres, par exemple, le 27 février 2019, la surface orientée sud a reçu le plus de rayonnement solaire, soit 23,95 kW/m², tandis que la surface orientée nord en a reçu le moins (8,42 kW/m²). De plus, la surface orientée à l'est a reçu plus de rayonnement solaire que la surface orientée à l'ouest, avec des valeurs de 20,55 kW/m² et 13,43 kW/m², respectivement.

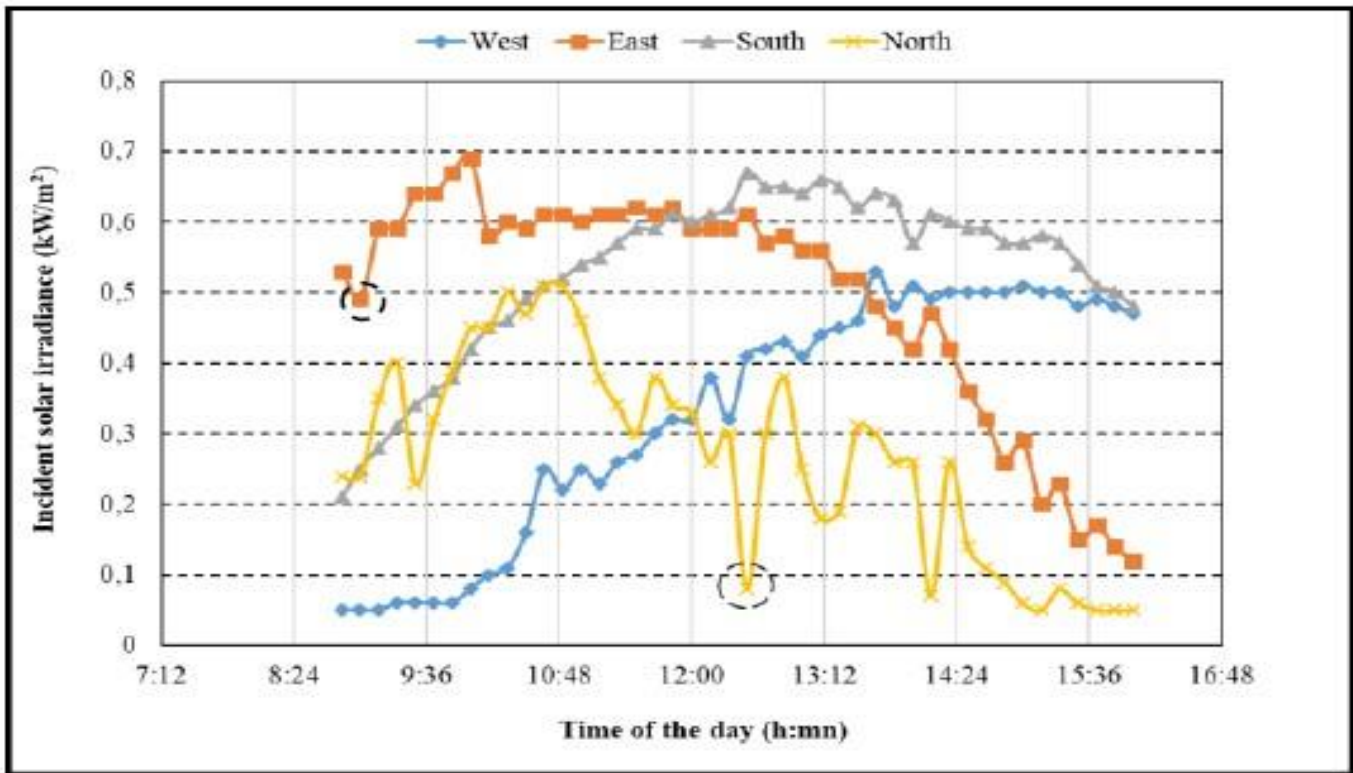
Les oscillations observées sur les courbes de la figure 82 (cercles noirs en pointillés) sont provoquées par le passage de nuages qui empêchent le rayonnement solaire d'atteindre la surface de la Terre. Par conséquent, les expériences ont été menées pendant des journées généralement ensoleillées, avec de courtes périodes de couverture nuageuse bloquant par intermittence le soleil.

Dans le cas d'un toit en pente de 40 degrés, le toit orienté à l'est a reçu le plus d'énergie le matin au cours de la période d'essai de cinq mois, tandis que le toit orienté à l'ouest a reçu le moins d'énergie le matin (Figure 82). Ce résultat peut s'expliquer par la trajectoire quotidienne du soleil, qui se lève à l'est et se couche à l'ouest. De plus, il n'est pas possible de généraliser pour les surfaces orientées dans les quatre directions PM.

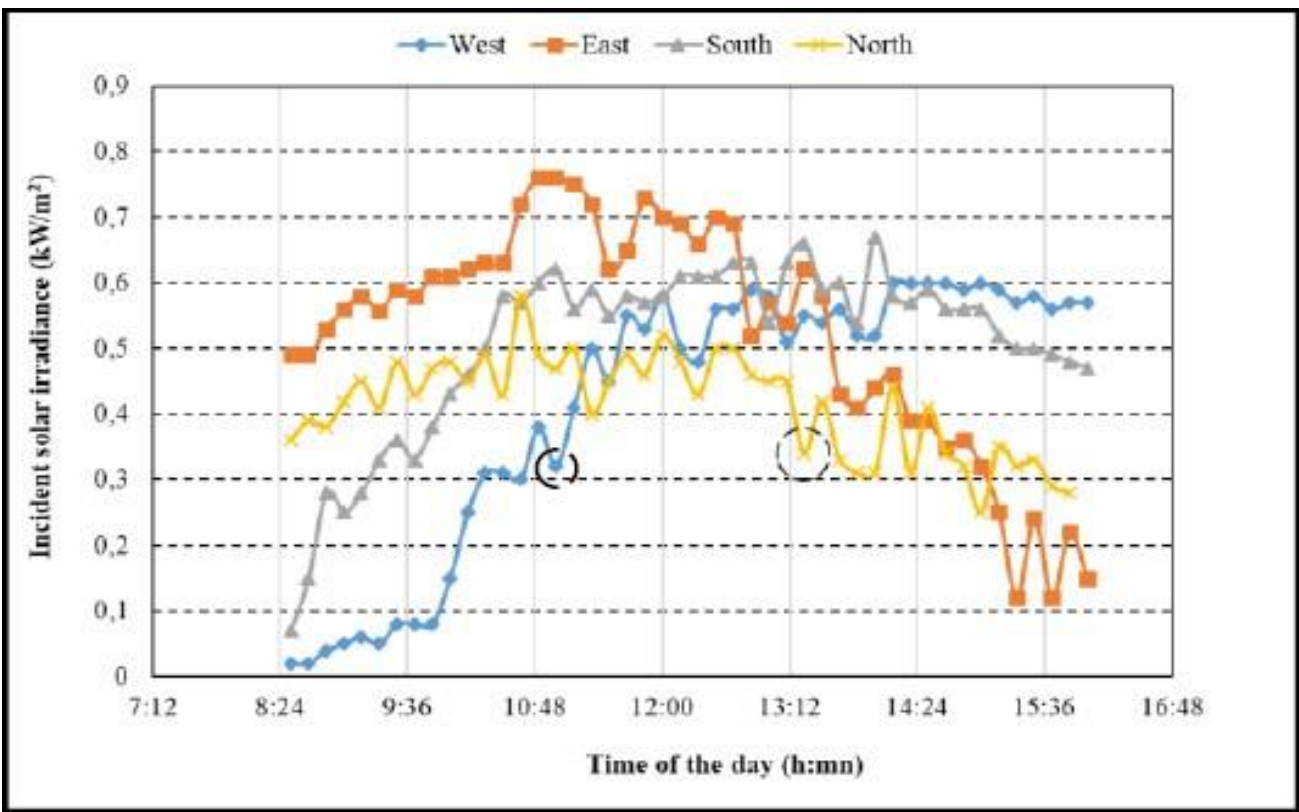
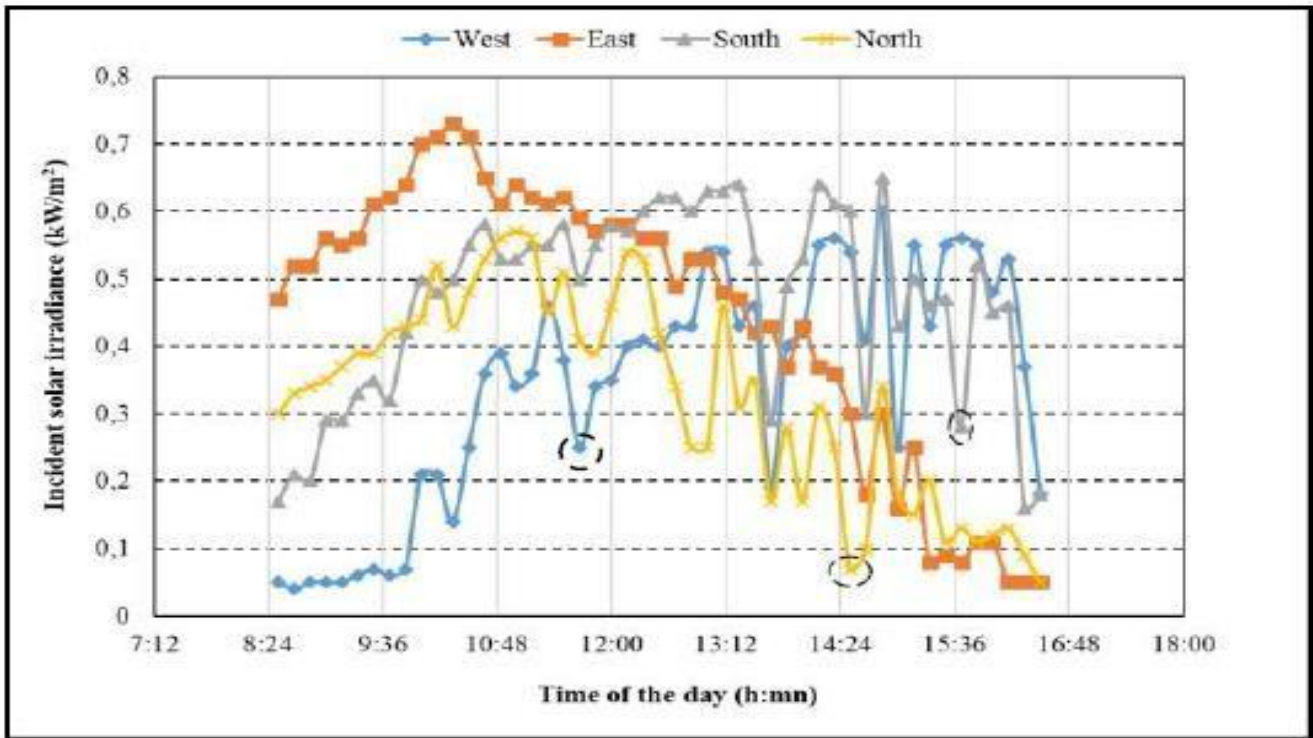
Lorsque le soleil est bas dans le ciel en février et mars, une surface orientée au sud reçoit plus d'énergie l'après-midi que dans les autres directions. A l'inverse, la surface orientée au nord reçoit le moins d'énergie durant cette période (voir Figure 82).

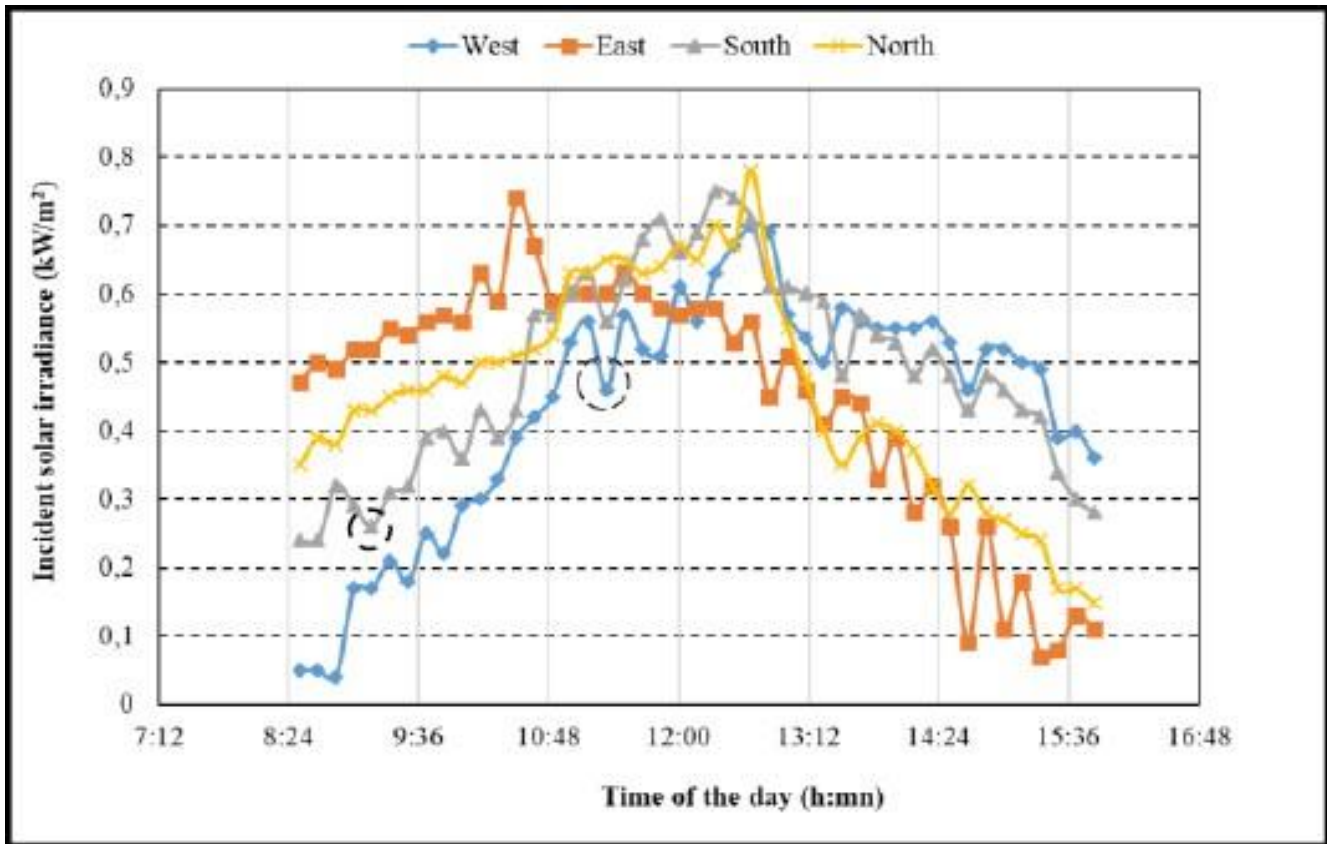


27 FEBRIER 2019



17 MARS 2019





10 JUIN 2019

Figure 82 : Irradiation solaire incidente sur une surface inclinée à 40° dirigée vers quatre points cardinaux au cours des cinq jours d'étude.

Les données recueillies sur l'effet de l'orientation pendant les jours d'essai ont montré une distribution non normale. De plus, les groupes représentant l'irradiation solaire par direction ont été appariés, car les mesures ont été prises pour le même angle. Par conséquent, le test de Friedman, un test non paramétrique, a été appliqué dans ce cas pour déterminer s'il existait des différences entre les données mesurées en fonction de l'orientation.

Le tableau 10 présente les résultats du test de Friedman pour chaque jour d'expérience. Comme on peut le constater, il existe une différence significative entre les groupes puisque les valeurs de p à toutes les orientations sont inférieures à la probabilité significative ($p < 0,05$), ce qui signifie que l'orientation de la surface affecte de manière significative la quantité d'énergie solaire reçue.

Tableau 10 : Résultats des tests de Friedman pour l'effet de l'orientation de la surface sur l'irradiance solaire interceptée fournie par SPSS 26.

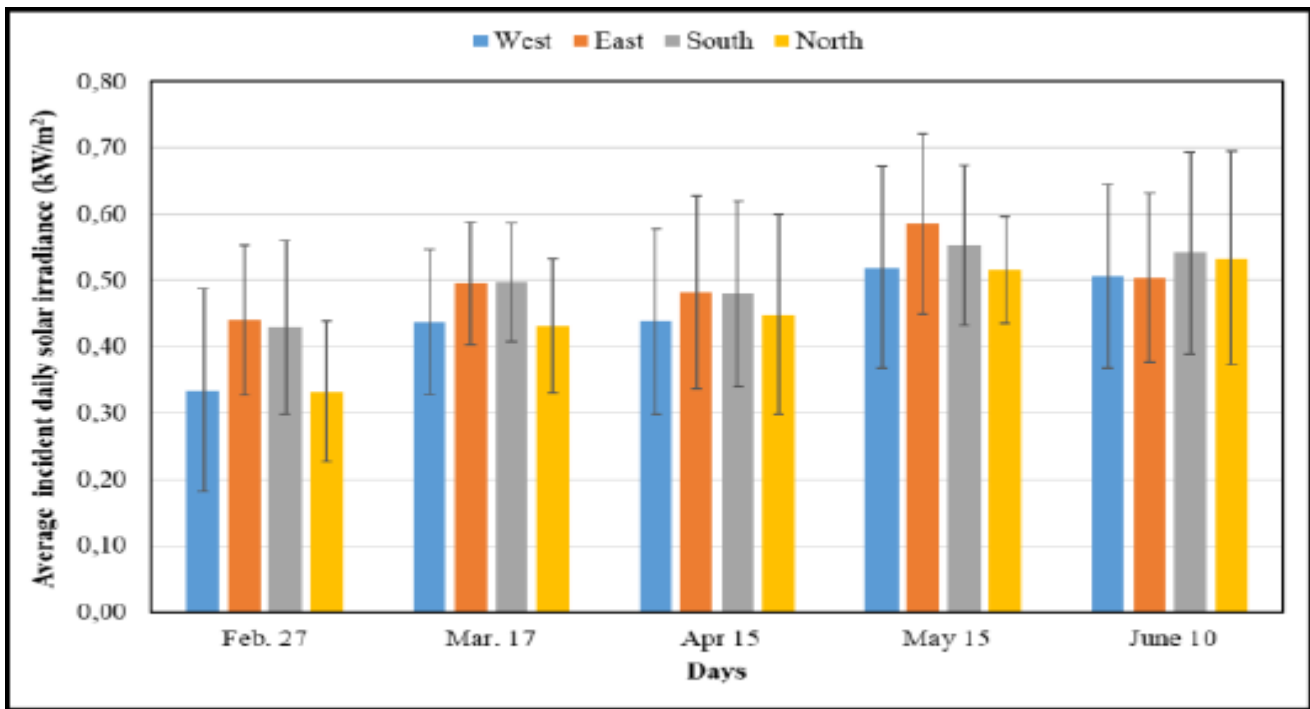
	Échantillonnage numéro	Ch Square	Degree of freedom df	P value
27 Février 2019	19	32.647	3	0.000
17 Mars 2019	19	26.935	3	0.000
15 Avril 2019	19	31.210	3	0.000
15 Mai 2019	19	50.736	3	0.000
10 juin 2019	19	11.103	3	0.001

La quantité d'énergie solaire interceptée par une surface dépend non seulement de son orientation, mais également de la position du soleil dans le ciel. Comme le montre la figure 13 chapitre II, lorsque le soleil se lève plus haut dans le ciel de février à juin, les courbes illustrant l'évolution quotidienne de l'irradiance solaire interceptée dans les directions ouest et sud ont tendance à converger. Les directions est et nord présentent des schémas de changement similaires.

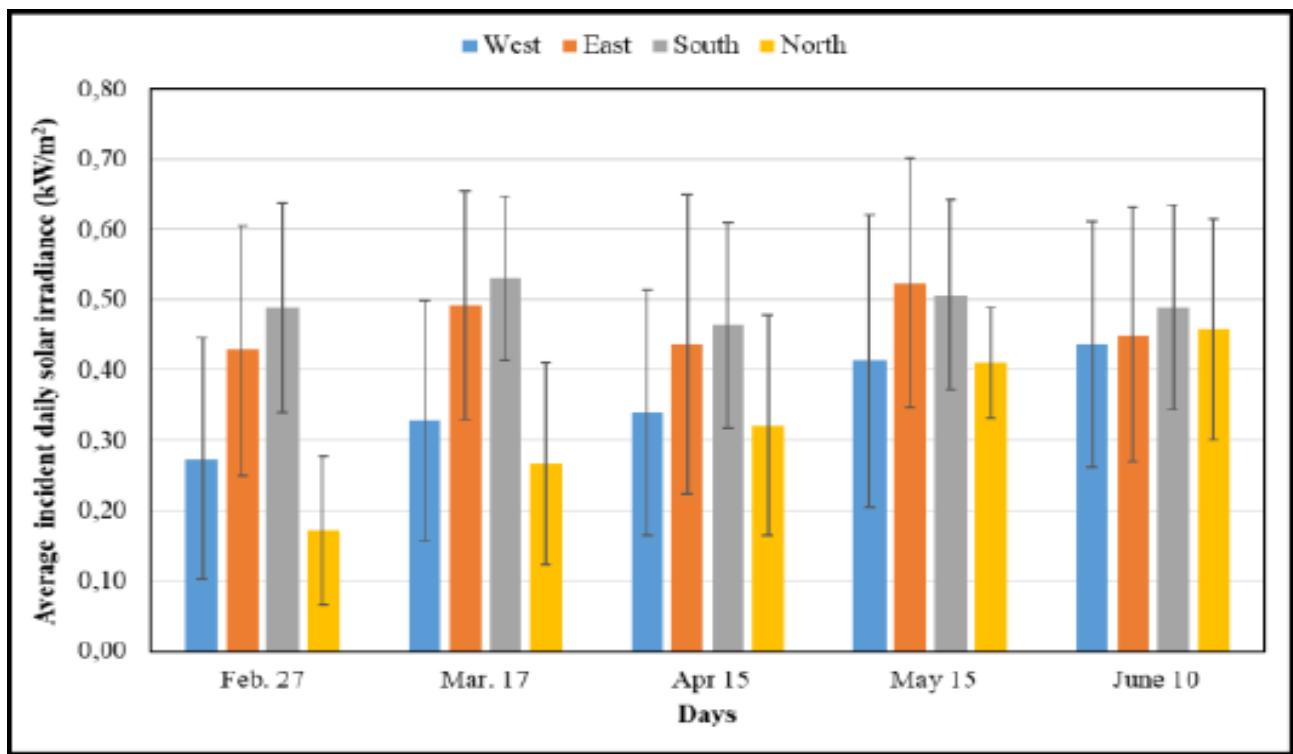
Comme on le sait, le soleil reste en dessous de l'équateur du 21 septembre (équinoxe d'automne) au 21 mars (équinoxe de printemps), en passant par le 21 décembre (solstice d'hiver). Ainsi, pendant cette période, le soleil est bas dans le ciel dans l'hémisphère nord. À l'inverse, il se trouve au-dessus de l'équateur du 21 mars au 21 septembre, en passant par le 21 juin (solstice d'été), et le soleil est haut dans le ciel pendant toute cette période dans l'hémisphère nord.

De plus, le soleil est au même niveau que l'équateur lors des équinoxes de printemps et d'automne. Le solstice d'été marque la plus haute altitude du soleil, tandis que le solstice d'hiver marque la plus basse. La figure 83 illustre l'impact de l'élévation du soleil dans le ciel sur la quantité d'irradiation solaire interceptée à différents angles d'inclinaison orientés vers les quatre points cardinaux. Cette dernière montre qu'en plus de l'orientation et de l'élévation du soleil dans le ciel, l'angle d'inclinaison de la surface exposée au soleil a un impact important sur la quantité d'énergie solaire captée. Par exemple, le 27 février, l'irradiation solaire journalière moyenne incidente sur une surface inclinée à 60° et orientée vers l'ouest était de 0,22 kW/m², alors qu'elle était de 0,33 kW/m² sur une surface inclinée à 20° dans la même direction et le même jour.

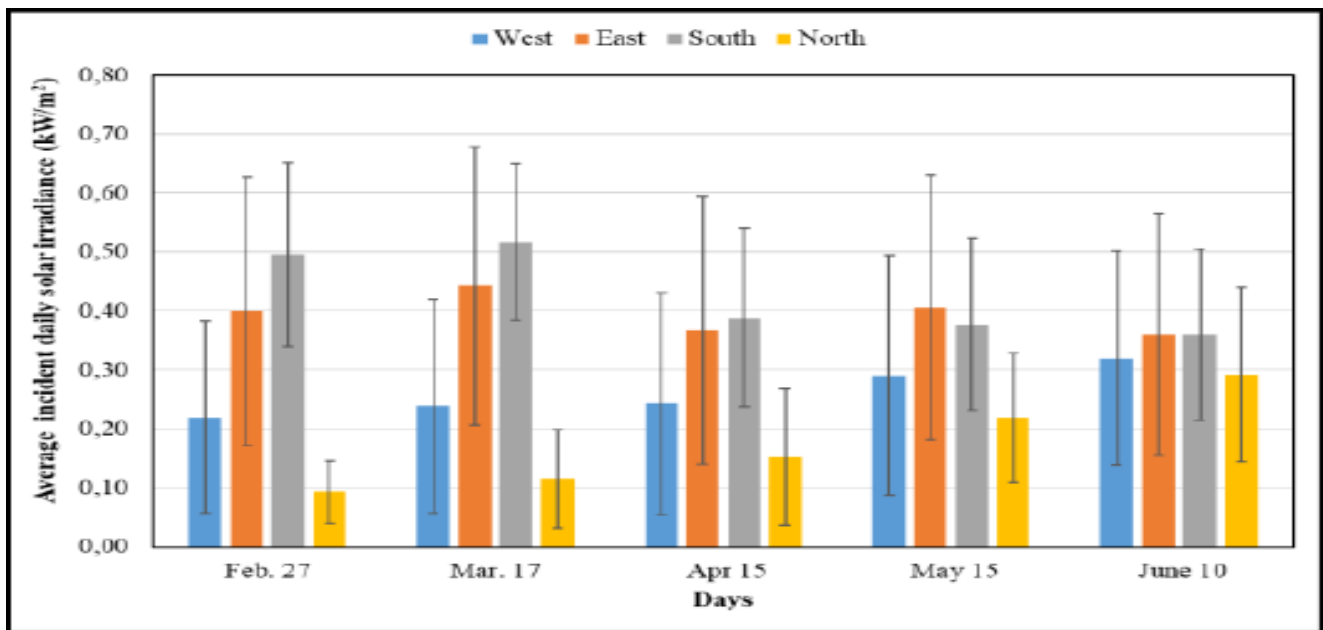
Le tableau 4 présente les résultats du test de Friedman visant à déterminer comment la position du soleil dans le ciel affecte l'énergie solaire interceptée. Comme on peut le voir, il existe une différence significative dans l'irradiation solaire captée selon les jours puisque les valeurs de p sont inférieures à la probabilité de signification ($p < 0,05$), ce qui indique que la position du soleil dans le ciel affecte significativement la quantité d'énergie solaire interceptée.



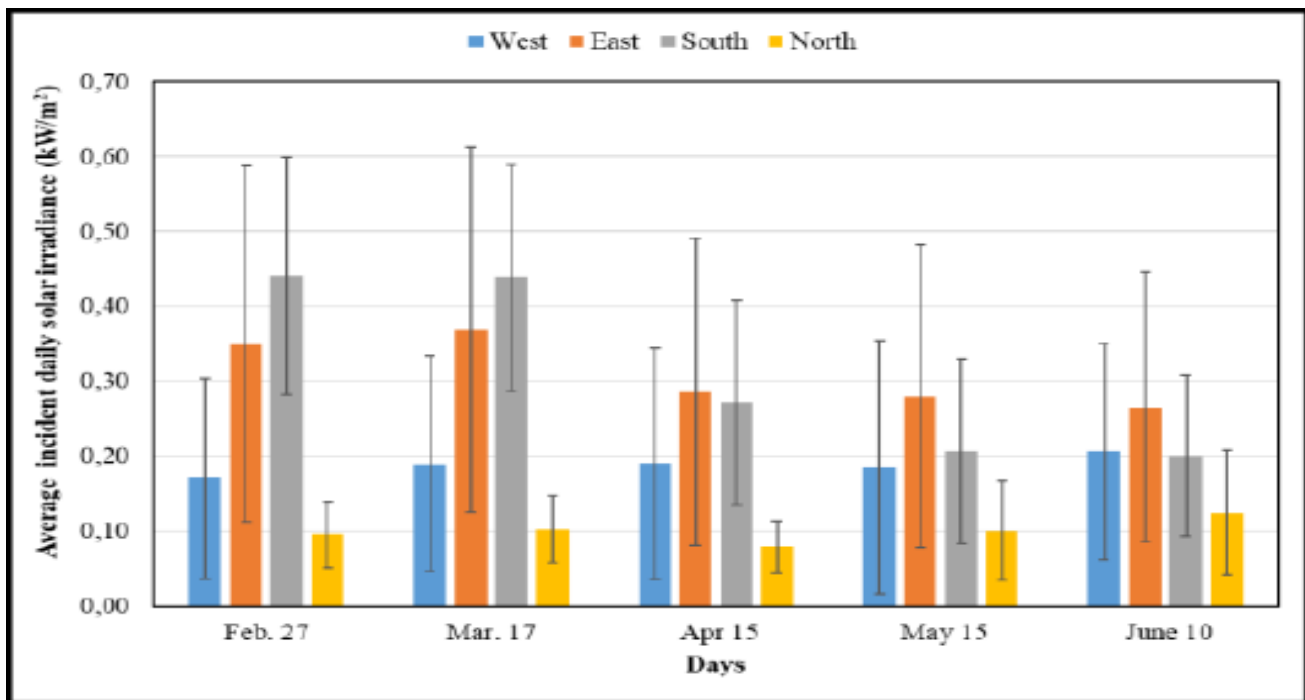
20°



40°



60°



80°

Figure 83 : Effet de l'élévation du soleil dans le ciel sur l'énergie solaire interceptée pour différentes orientations et angles d'inclinaison.

Le tableau 11 diffère du tableau 3 par la présentation d'un résumé condensé des points clés obtenus du test de Friedman, permettant une représentation plus compacte.

Tableau 11 : Résultats du test de Friedman sur l'effet de la position du soleil sur l'irradiation solaire interceptée, fournis par SPSS 26.

Hypothèse nulle	Test	Valeur P	Décision
Les distributions de 27 février. 17 mars. 17 avril. 15 mai et 10 juin sont identiques	Analyse bidirectionnelle de la variance par classement de Friedman pour des échantillons apparentés	0.000	Rejet de l'hypothèse nulle

V-6-2) . Effet de l'inclinaison sur l'irradiation solaire incidente

La Figure 84 illustre l'effet de l'angle d'inclinaison sur l'irradiation solaire incidente pour chacune des quatre orientations tout au long de la période d'essai. Comme on peut le constater, l'irradiation solaire incidente dépend à la fois de l'angle d'inclinaison et de la direction de la surface solaire exposée, car l'allure de la courbe représentant l'évolution de l'irradiation solaire incidente en fonction de l'angle d'inclinaison diffère d'une orientation à l'autre. Il convient de noter que les courbes illustrant la relation entre l'irradiation solaire incidente et l'angle d'inclinaison pour différentes orientations varient en fonction du parcours annuel du soleil.

Lorsque la surface solaire exposée est orientée vers l'est, l'irradiation solaire incidente augmente avec l'angle d'inclinaison, atteint un maximum, puis diminue (Figure 84). La surface verticale (c'est-à-dire inclinée à 90° par rapport à l'horizontale) reçoit la plus faible quantité d'énergie solaire quelle que soit la position du soleil dans le ciel, ce qui affecte l'angle d'inclinaison optimal. En effet, l'angle d'inclinaison optimal pour une surface orientée à l'est dépend de la trajectoire annuelle du soleil (Figure 84). Ce résultat peut être appliqué au secteur du bâtiment à M'Sila, où les toits-terrasses (surfaces horizontales) et les toits (surfaces inclinées) orientés à l'est reçoivent plus d'irradiation solaire que les murs orientés à l'est (surfaces verticales) de février à juin.

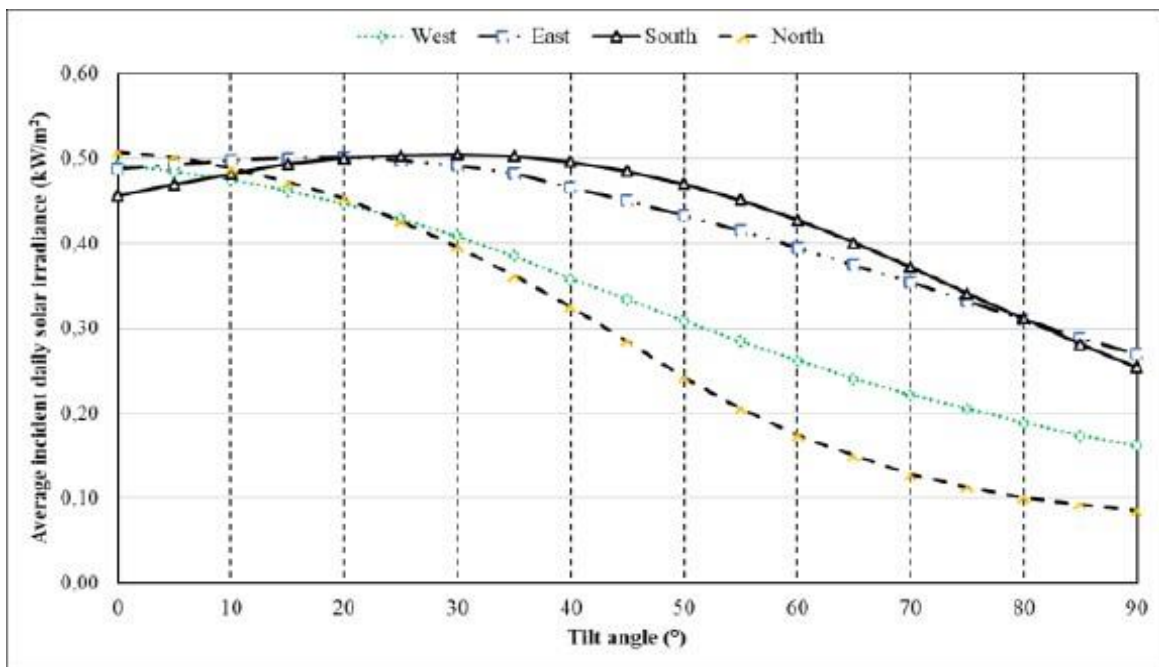
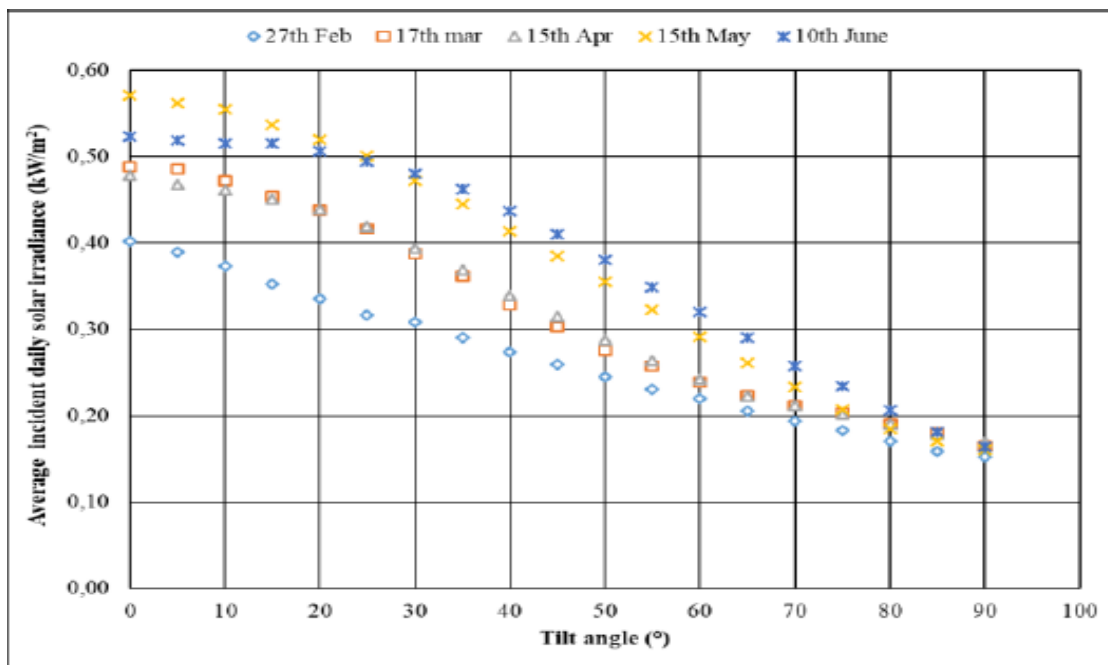
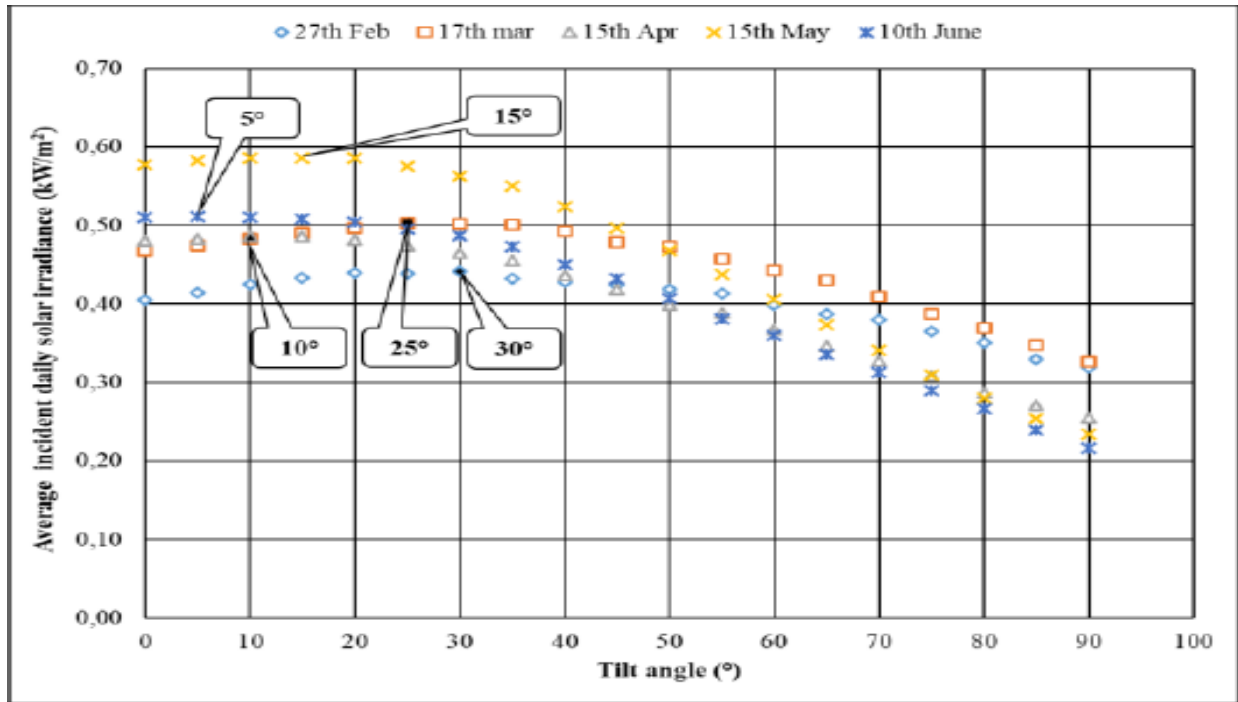


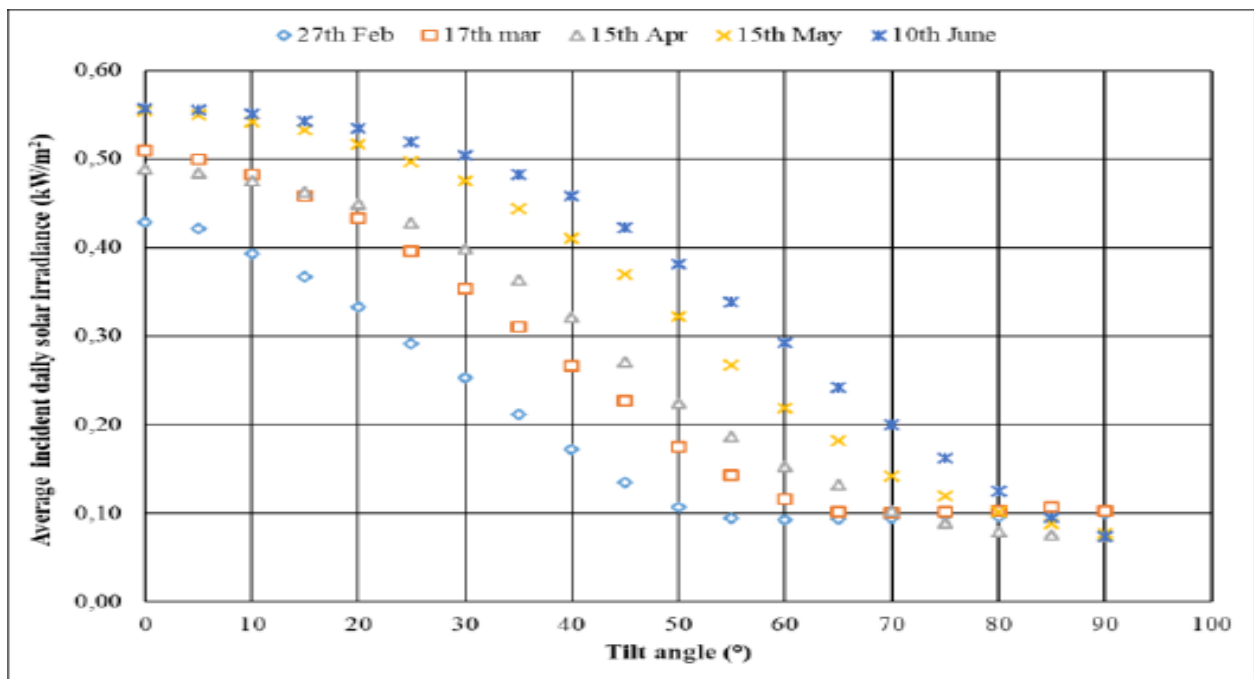
Figure 84 : Effet de l'orientation et de l'inclinaison de la surface sur l'énergie solaire incidente rayonnement de l'air de février à juin.



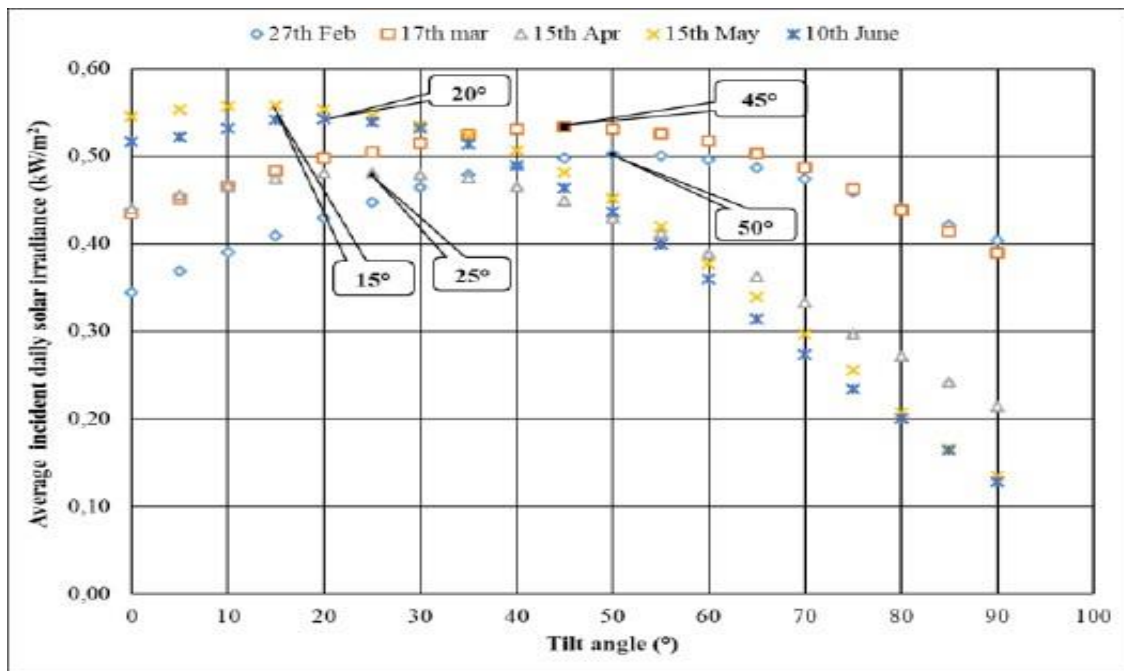
Oorientation EST



orientation OUEST



Orientation NORD



orientation SUD

Figure 85 : Effet de l'angle d'inclinaison sur l'irradiation solaire incidente pour les quatre orientations principales (Est, Ouest, Nord et Sud).

Lorsque le soleil est haut dans le ciel, les surfaces presque horizontales reçoivent plus d'énergie solaire que celles inclinées à différents angles (en raison de l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur ces surfaces). La courbe décrivant l'évolution de l'irradiance solaire incidente en fonction de l'angle d'inclinaison devient plus aplatie lorsque le soleil est bas dans le ciel par rapport à lorsqu'il est haut. Plus précisément, le 27 février, la différence entre l'énergie maximale et minimale reçue était d'environ 38 %. Cependant, le 15 mai, cette différence est passée à plus de 90 %. Le tableau 12 présente les résultats du test de Friedman utilisé pour évaluer l'effet de l'angle d'inclinaison sur l'énergie solaire interceptée dans la direction est. Comme on peut le voir, il existe une différence significative dans l'irradiance solaire collectée à différents angles d'inclinaison puisque les valeurs de p sont inférieures à la probabilité significative ($p < 0,05$).

Cette étude explore l'effet de l'inclinaison et de l'orientation des surfaces sur la quantité d'énergie solaire interceptée. L'angle d'inclinaison joue un rôle majeur, comme le montre la différence significative entre l'énergie maximale et minimale reçue le 27 février (environ 38%) et le 15 mai (plus de 90%). Le tableau 3 présente les résultats du test de Friedman utilisé pour évaluer l'impact de l'inclinaison sur l'énergie solaire interceptée. Ces valeurs de p inférieures à 0,05 indiquent une influence significative de l'inclinaison ($p < 0,05$).

Orientation Est:

- L'angle d'inclinaison affecte fortement l'irradiation solaire incidente (tableau 5, $p < 0,05$).
- D'avril à juin, l'irradiation solaire incidente sur les surfaces orientées à l'est et inclinées de 0° , 5° , 10° , 15° , 20° et 25° ne présente pas de différence significative selon le test de Friedman (respectivement $p = 0,776$, $p = 0,738$ et $p = 0,477$). Cela signifie qu'un toit plat (surface quasi-horizontale) capte autant de rayonnement solaire qu'un toit incliné de 25° durant ces mois.

Orientation Ouest:

- L'irradiation solaire incidente diminue lorsque l'inclinaison augmente (figure 60).
- La surface horizontale ($\beta = 0^\circ$) reçoit toujours le maximum d'irradiation, tandis que la surface verticale ($\beta = 90^\circ$) en reçoit le moins, quelle que soit la position du soleil (février à juin).
- Ce résultat est cohérent avec les travaux de F. Jafarkazemi à Abu Dhabi (Émirats arabes unis) [48].
- De février à juin, le meilleur angle d'inclinaison pour l'ouest est de 0° (surface horizontale).
- Les surfaces quasi-verticales orientées à l'ouest (inclinaison de 75° , 80° , 85° et 90°) reçoivent un rayonnement solaire à peu près équivalent d'avril à juin (variation inférieure à 15% pour chaque inclinaison) (figure 60 et test de Friedman, $p > 0.05$).

Orientation Nord:

- L'irradiation solaire incidente diminue généralement avec l'inclinaison (figure 60).
- La surface horizontale reçoit le maximum de rayonnement solaire quelle que soit la position du soleil.
- L'irradiation solaire incidente ne diminue pas linéairement avec l'inclinaison. Elle peut même passer par un minimum puis augmenter légèrement lorsque le soleil est bas (février et mars).
- La différence entre l'irradiation maximale et minimale peut dépasser 300% sur toute la période d'étude.
- De février à juin, les toits plats captent plus de rayonnement solaire que les toitures ou murs orientés au nord.

Orientation Sud:

- L'irradiation solaire incidente augmente avec l'inclinaison jusqu'à un maximum, puis diminue (similaire à l'est).
- L'angle d'inclinaison optimal varie en fonction de la position du soleil (figure 60).
- D'avril à juin, les murs exposés au sud reçoivent moins de rayonnement solaire que les toits plats ou en pente orientés dans la même direction (différence supérieure à 51%).
- En février, le soleil étant bas, les toits plats captent moins de rayonnement que les murs sud. Cela suggère qu'en hiver, les murs exposés au sud reçoivent plus de chaleur solaire que les toits plats.

Comme le montre la figure 85, la surface plane orientée vers le nord et la surface inclinée de 30° vers le sud ont reçu un rayonnement solaire maximal pendant la période d'étude, de février à juin. En réalité, cette période est insuffisante pour déterminer l'angle d'inclinaison optimal annuel, mais elle permet d'étudier l'effet de l'orientation et de l'inclinaison de la surface sur l'énergie solaire captée.

Tableau 12: Résultats des tests de Friedman pour l'effet de l'angle d'inclinaison sur l'irradiance solaire interceptée dans toutes les directions fournis par SPSS 26.

	ORIENTATION	Hypothèse nulle	test	Valeur P	Décision
27 FEV	EST	Les distributions de 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45°, 50°, 55°, 60°, 65°, 70°, 75°, 80°, 85°, et 90° sont identiques.	Analyse bidirectionnelle de la variance par classement de Friedman pour des échantillons apparentés	0.00	Rejet de l'hypothèse nulle
	OUEST				
	NORD				
	SUD				
17 MARS	EST	Les distributions de 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45°, 50°, 55°, 60°, 65°, 70°, 75°, 80°, 85°, et 90° sont identiques.	Analyse bidirectionnelle de la variance par classement de Friedman pour des échantillons apparentés	0.00	Rejet de l'hypothèse nulle
	OUEST				
	NORD				
	SUD				
15 AVRIL	EST	Les distributions de 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45°, 50°, 55°, 60°, 65°, 70°, 75°, 80°, 85°, et 90° sont identiques.	Analyse bidirectionnelle de la variance par classement de Friedman pour des échantillons apparentés	0.00	Rejet de l'hypothèse nulle
	OUEST				
	NORD				
	SUD				
15 MAI	EST	Les distributions de 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45°, 50°, 55°, 60°, 65°, 70°, 75°, 80°, 85°, et 90° sont identiques.	Analyse bidirectionnelle de la variance par classement de Friedman pour des échantillons apparentés	0.00	Rejet de l'hypothèse nulle
	OUEST				
	NORD				
	SUD				
10 JUIN	EST	Les distributions de 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45°, 50°, 55°, 60°, 65°, 70°, 75°, 80°, 85°, et 90° sont identiques.	Analyse bidirectionnelle de la variance par classement de Friedman pour des échantillons apparentés	0.00	Rejet de l'hypothèse nulle
	OUEST				
	NORD				
	SUD				

Conclusion

Cette étude, qui visait à étudier l'effet de l'orientation et de l'inclinaison de la surface sur l'irradiation solaire incidente dans la région de M'Sila de février à juin, a permis d'obtenir les résultats suivants :

❖ Impact de l'orientation, de l'inclinaison et de la position du soleil sur l'irradiation solaire incidente

L'énergie solaire incidente est fortement affectée par l'orientation, l'inclinaison de la surface exposée au soleil et la position du soleil dans le ciel ($p < 0,05$). Cela s'explique par la manière dont les rayons solaires frappent la surface.

- **Soleil bas dans le ciel** : L'orientation sud est la plus favorable pour une inclinaison supérieure ou égale à 25° . En revanche, lorsque le soleil est haut dans le ciel (avril, mai et juin), l'orientation est privilégiée pour des angles d'inclinaison supérieurs à 75° et inférieurs ou égaux à 90° . Pendant la période d'essai, les surfaces inclinées vers le nord et présentant une forte pente ($\beta \geq 55^\circ$) ont reçu la plus faible quantité d'irradiation solaire.
- ❖ **Variation de l'irradiation en fonction de l'orientation et de l'inclinaison** :
 - Pour les orientations est et sud, l'irradiation solaire incidente augmente en fonction de l'angle d'inclinaison, atteignant un maximum (angle optimal) puis diminuant.
 - Généralement, l'irradiation solaire incidente diminue avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison pour les orientations ouest et nord.
 - De plus, l'angle d'inclinaison optimal pour les orientations est et sud varie en fonction du trajet annuel du soleil, alors qu'il reste constant à 0° pour les orientations ouest et nord.
- **Période d'étude (février à juin)** :
 - La surface plane orientée vers le nord et la surface inclinée de 30° vers le sud reçoivent un maximum de rayonnement solaire.
- ❖ **Application dans le secteur du bâtiment** :
 - Ces résultats permettent d'identifier les orientations (nord, sud, est et ouest) et les inclinaisons (toits-terrasses, toitures et murs verticaux) les mieux adaptées à l'apport de chaleur solaire dans le secteur du bâtiment, été comme hiver.
 - En effet, les murs orientés à l'est reçoivent plus d'énergie solaire que les autres orientations lorsque le soleil est haut dans le ciel. Cependant, lorsque le soleil est bas, les murs orientés au sud sont exposés à plus de rayonnement solaire que les autres orientations.
 - De plus, les murs orientés au nord constituent la partie la plus froide de l'enveloppe du bâtiment car ils reçoivent le moins de rayonnement solaire.
 - Les murs orientés est, ouest et nord ne reçoivent pas autant de rayonnement solaire que les toits-terrasses. En été, les toits-terrasses sont exposés à plus de rayonnement solaire que les murs sud. L'inverse est vrai en hiver.

CONCLUSION GÉNÉRALES

Dans le secteur du bâtiment la consommation énergétique est un facteur crucial pour assurer un confort thermique à forte demande vue l'évolution des technologies. La consommation énergétique du résidentiel doit être réduite et optimisées à travers les éléments fondamentaux du bâtiment, à savoir les matériaux de construction et les revêtements. Les caractéristiques thermiques et mécaniques des matériaux sont les facteurs essentiels dans les études de réduction de la consommation. Au cours de ce travail nous avons pu caractériser des échantillons de matériaux utilisés dans le bâtiment en Algérie sur les normes conventionnelles et il s'avère que beaucoup de paramètres rentrent en jeu. Le premier concerne la fraction énergétique solaire incidente sur les murs d'une construction. Ce paramètre est complexe d'un point de vue architectural. L'énergie thermique solaire que reçoit une surface d'un mur dépend surtout de la position géographique, de l'orientation et de l'inclinaison par rapport au soleil et aussi de la position du soleil dans sa trajectoire.

La partie de mesures expérimentales est faite au site précis du pôle universitaire de MSILA. Il s'agit de l'étude des effets de l'irradiation selon la direction et l'inclinaison sur la répartition spatio-temporelle de la température des murs d'une architecture à murales planes nous permet de révéler que l'énergie solaire incidente est fortement influencée par la direction, l'inclinaison et la position du soleil dans le ciel ($P < 0,05$). La direction sud se montre la plus efficace pour une inclinaison supérieure ou égale à 25 degrés, tandis que la direction est privilégiée lorsque le soleil est haut dans le ciel (avril, mai et juin) pour des angles d'inclinaison spécifiques. Les toits orientés au nord avec une forte pente ont reçu le moins de rayonnement solaire pendant la période de test.

L'effet de l'orientation des murs sur la température de leurs surfaces extérieures n'est apparent qu'en présence du soleil, c'est-à-dire pendant la journée. L'orientation des murs ne semble pas faire de différence notable la nuit. De plus, les températures des différents murs ne varient pas autant la nuit que le jour.

Le matin est le moment le plus chaud de la journée sur le mur orienté à l'est tout au long de l'été. Le mur orienté à l'ouest, en revanche, présente la surface extérieure la plus froide pendant une partie de la matinée.

De plus, au début de l'été, la face extérieure du mur exposé au nord est plus chaude que celle du mur exposé au sud le matin ; vers la fin de la saison, cependant, c'est le contraire qui se produit.

L'après-midi, au début de l'été, c'est la face extérieure du mur exposé à l'ouest qui est la plus chaude. Cependant, la surface extérieure du mur sud prendra sa place vers la fin de la saison.

Les après-midi d'été sont les plus frais sur le mur orienté au nord, sauf en juin, où la surface extérieure du mur orienté à l'est enregistre les températures les plus basses.

Les faces extérieures des murs ouest et sud reçoivent en été davantage de rayonnement solaire l'après-midi que les deux autres orientations.

La surface extérieure du mur est culminée en premier pendant l'été, suivie par les surfaces extérieures des murs sud, nord et ouest dans cet ordre. Cet ordre varie peu en juin, où le mur nord précède le mur sud.

L'étude est complétée par d'autres mesures expérimentales réalisées au site de OULED SIDIBRAHIM – Bousaada. Sur la base des températures moyennes des quatre murs pendant les jours de l'expérience (état stable), la surface extérieure du mur orientée vers l'est semble être la plus chaude en juin et juillet. En août et début septembre, c'est la surface extérieure du mur orienté au sud qui est la plus chaude. Pendant l'été, la surface extérieure du mur nord est la plus fraîche, sauf en juin, lorsque le mur sud est le plus froid.

Sauf en juin, les murs orientés est, ouest et sud contribuent au chauffage de la chambre tout au long de l'été. En juin, la chaleur provenant du soleil peut pénétrer par les murs nord, est et ouest et s'échapper par le mur sud. En été, la chaleur accumulée toute la journée s'échappe la nuit par les quatre murs.

Les murs orientés est et ouest sont les plus chauds au début de l'été, tandis que ceux orientés sud et est sont les plus chauds en fin de saison.

Les trajectoires journalières et annuelles du soleil ont un impact majeur sur la température des murs des bâtiments. De ce fait, l'orientation des murs d'un bâtiment doit être soigneusement choisie afin d'économiser l'énergie.

Durant ce travail une première série de quatre matériaux de construction les plus fréquemment utilisés en Algérie ont fait l'objet d'étude expérimentale de leur propriété thermique. Les matériaux en question sont, la laine de mouton formant les tentes ; la brique rouge faite en terre cuite ; la pierre calcaire et la briques ordinaires broyées faite en terre, argiles et pailles.

La première conclusion tirée concerne l'effet de l'épaisseur et l'effet des propriétés de la diffusivité thermique sur les échanges thermiques entre le milieu extérieur et le mur. De plus, Il a été prouvé quantitativement que les briques broyées présentent les meilleures performances thermiques parmi les matériaux étudiés. Les propriétés thermiques de la brique rouge et du calcaire étaient proches. Malgré sa moindre conductivité thermique, la laine de mouton diffuse plus la chaleur.

Une poursuite de la série d'études et une meilleure compréhension de l'impact des tendances sur la température. L'orientation des murs d'un bâtiment influence considérablement la température intérieure en fonction des trajectoires solaires journalières et annuelles. En été, les murs orientés est et ouest sont les plus chauds au début de la saison, tandis que ceux orientés sud et est atteignent les températures les plus élevées en fin de saison. En dehors de juin, les murs est, ouest et sud contribuent au chauffage des pièces, tandis qu'en juin, la chaleur peut pénétrer par les murs nord, est et ouest et s'échapper par le mur sud. Les murs ouest et sud reçoivent le plus de rayonnement solaire l'après-midi, tandis que le mur nord est le plus frais en été, sauf en juin où le mur est enregistre les températures les plus basses. Ces observations peuvent être utilisées pour optimiser l'isolation des bâtiments en choisissant des matériaux d'isolation appropriés ou en combinant des matériaux différents pour chaque orientation afin d'améliorer le rendement énergétique.

Une deuxième série composée de sept différents matériaux de construction, l'argile jaune, l'argile Gabuhia, l'argile de Zerarka, la pierre Aligue, la pierre d'Eddis, brique rouge, parpaings, sont pris pour une caractérisation thermique et mécanique en utilisant nos outils développés et les moyens du laboratoire d'analyse de l'entreprise LAFARGE de HamamDhela.

Selon la composition chimique de ces matériaux on retient :

- En raison de leurs compositions chimiques spécifiques, les divers types de matériaux de construction offrent des propriétés distinctes qui influencent leur utilisation. L'argile jaune, riche en CaO, est utilisée comme liant pour la fabrication de briques et de carrelages en raison de sa résistance accrue. L'argile gabuhiya, avec sa capacité d'absorption due à sa teneur en MgO et SO₃, est efficace pour la purification de l'eau. L'argile de Zirarka, riche en SiO₂ et K₂O, est adaptée aux peintures grâce à sa capacité à renforcer les structures des revêtements. La conductivité thermique des matériaux comme le parpaing et la pierre varie en fonction de leur composition, le parpaing étant le meilleur pour le transfert thermique tandis que l'argile et la pierre AL ALEG offrent une isolation thermique supérieure. La brique rouge et le parpaing présentent tous deux une bonne résistance mécanique et à l'eau, mais le parpaing est moins adapté aux climats chauds en raison de sa capacité élevée à retenir la chaleur, contrairement à l'argile, qui est le meilleur choix pour une isolation thermique efficace.
- En plus de ces résultats, quatre dossiers de brevet ont été déposés sous numéros :200254 en 2020 – 210100 en 2021 -220126 en 2022-240454 en 2024.
- et trois notes ont été obtenues pour un projet innovant sous numéros : 0804212080 en 12 avril 2021 -2705212153 en 27 mai 2021 - 2106212198 en 22juin 2021 .

Liste des références :

- [1]: Agence Internationale de l'Energie (AIE). "Algérie : Perspectives énergétiques 2020-2040." 2021. <https://www.iea.org/countries/algeria>].
- [2]: Benkhelifa, Kamel, et al. "État des lieux des énergies renouvelables et de la stratégie d'efficacité énergétique en Algérie." *Revue des énergies renouvelables* 25.4 (2022): 1023-1035.].
- [3]: [Centre de recherche en énergie solaire (CRES). "Énergies renouvelables en Algérie : Enjeux et perspectives." 2019].
- [4]: [Benouine, Mohamed, et Abdelkrim Azzi. "L'Algérie et la géopolitique de l'énergie en Méditerranée : enjeux et perspectives." *Revue des Sciences Politiques* 64, no 1 (2018): 123-142.]
- [5]: [Bendib, Mohamed. "L'Algérie et les enjeux de la transition énergétique : entre opportunités et défis." *Revue des Sciences Politiques* (2021): 57-72.].
- [6]: [Benbouzid, Mohamed, and Nacim Benissad. "L'économie algérienne et la rente pétrolière: Quelle perspective pour une diversification durable?." *Revue d'économie politique* 135.4 (2018): 643-666.].
- [7]: Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (APRUE). "L'efficacité énergétique en Algérie : Enjeux et perspectives." 2021.].
- [8]: [Agence Nationale de l'Efficacité Énergétique (AEE). "Bilan énergétique de l'Algérie 2023." Décembre 2023.]<https://www.energy.gov.dz/?article=bilan-energetique-national-du-secteur>.
- [9]: [Ministère de l'Énergie et des Mines. "L'Algérie face au défi de la transition énergétique." 2023].
- [10]: [Bilan énergétique national 2021 - Ministère de l'Énergie <https://www.energy.gov.dz/?article=bilan-energetique-national-du-secteur>]
- [11]: Ministère de l'Energie - Algérie: <https://www.energy.gov.dz/>
- [12]: Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (APRUE): <https://dictionnaire.reverso.net/francais-definition/non+valide>].
- [13]: [Agence Nationale de l'Efficacité Énergétique (AEE). "L'efficacité énergétique en Algérie : Enjeux et perspectives." 2023.].
- [14]: [1Agence Nationale pour la Maîtrise de l'Energie (ANME). "L'efficacité énergétique des bâtiments en Algérie." 2020.].
- [15]:[Agence Nationale de l'Efficacité Énergétique (AEE). "Bilan énergétique de l'Algérie 2021." 2022. <https://www.energy.gov.dz/?article=bilan-energetique-national-du-secteur>]
- [16]: Khelif Abdelkrim, Fridi Mohamed. "L'Algérie face au défi énergétique." *Énergie et développement* 33 (2014): 109-122].
- [17]: [. Institut de recherche en énergies renouvelables (IRER). "Subventions aux énergies fossiles en Algérie : Impacts et opportunités de réforme." 2021.]

- [18]: Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (APRUE). Bilan de l'efficacité énergétique en Algérie. 2018. <https://www.aprue.org.dz/>.
- [19]: Agence Internationale de l'Énergie. "Algérie - Évaluation du Système de Performance Énergétique des Bâtiments (SPEB)". 2019. <https://www.iea.org/>.
- [20]: [Belkadi, M., & Ait Oumeziane, Y. (2008). Analyse comparative des réglementations thermiques algérienne et française. In Actes des 8èmes Rencontres Nationales en Thermique Appliquée, Batimatec (pp. 3-6).]
- [21]: [Ancer Hadjer, Bekkour Kenza. "Calcul des déperditions thermiques d'un logement selon le DTR C 3.2." Sciences et Technologie A 2 (2013): 138-143.]
- [22]: [<https://www.energy.gov.dz/>].
- [23]: .[Belkhodja Nassim, Khenfer Omar. "L'efficacité énergétique dans le bâtiment : enjeux et perspectives en Algérie." Revue des Energies Renouvelables 22 (2019): 201-211.]
- [24]: [Agence Spatiale Algérienne (ASJP). "Transition énergétique en Algérie : Stratégie et enjeux." 2014. <https://www.asjp.cerist.dz/en/downArticle/247/2/1/42167>].
- [25]: [Boukendakdji Omar, Khelifa Mohamed, et Benzaza Mehdi. "Matériaux de construction dans l'Algérie antique : approche expérimentale et analyse des propriétés thermiques." Revue des Sciences Humaines et Sociales 11 (2018): 205-222.]
- [26]: Etude des caractéristiques thermiques et mécaniques des matériaux de construction du sud algérien, Ecole doctorale Mécanique, Energétique, Génie Civil, Acoustique (Villeurbanne ; 2011)
- [27]: Chávez-Galán, J.; Almanza, R.; Cuevas, N. R. "Convective heat transfer coefficients: experimental estimation and its impact on thermal building design for walls made of different Mexican building materials", *Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo* 5(2) (2014): 26.
- [28]: Hegazy, A. A., El-Naggar, M., & Fawzy, H. M. (2012). Improvement of soil properties by adding fibers. *Construction and Building Materials*, 32, 131–136. <https://www.mdpi.com/2076-3263/10/6/241>.
- [29]: Pennisi, M., Amabile, G., & Arciuolo, F. (2006). Fibre-reinforced hemp concrete for masonry applications: Mechanical and durability properties.** *Composites: Part B, Engineering***, 37, 612–618.
- [30]: Millogo, Y., Traoré, K., Ny, M., & Kaboré, I. (2013). Effect of adding coconut fibers on the mechanical properties of compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, 48, 577–582.
- [31]: Mohamed, A. M. (2013). Influence of straw fiber content on the properties of compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, 40, 115–121. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785421007687>.
- [32]: Galan-Marin, C., Rivera-Gomez, C., & Benito, M. (2010). Shear strength and deformability of compacted stabilized earth blocks reinforced with wool.** *Journal of Materials Science***, 45, 2352–2360.
- [33]: Quagliarini, E., & Lenci, S. (2010). Experimental and theoretical analysis of the mechanical behaviour of hemp fibre reinforced adobe.** *Journal of Building Engineering***, 1, 3–10.

- [34]: Bahar, R., Benazzoug, M., & Kenai, S. (2004). Compressive strength and durability of sand lime bricks. *Cement and Concrete Composites*, 26(8), 1053-1060.
- [35]: Guillaud, H., Joffray, T., & al. (1995). Comportement mécanique des sols compactés. *Revue française de géotechnique*, 92(4), 41-54.
- [36]: Bahar, R., Benazzoug, M., & Kenai, S. (2004). Compactage dynamique des sols fins. *Revue française de géotechnique*, 114(2), 113-128.
- [37]: Reza, M. C., Janbaz, M., & Nikoo, M. R., Effet des cendres volantes et des fumées de silice sur la résistance à la compression du béton autoplaçant dans différentes conditions de cure.
- [38]: Taallah, B., & Guettala, A. (2016). Caractérisation thermo-physique et mécanique des briques de terre crue stabilisées à la chaux et additionnées de fibres de palmier dattier. *Revue des Energies Renouvelables*, 19(1), 117-128.
- [39]: Ben Mansour, M., Jelidi, A., Cherif, R., & Jabrallah, S. B. (2016). Effect of compaction pressure on the properties of compressed earth bricks. *Construction and Building Materials*, 122, 806-813.
- [40]: Heath, A., Lawrence, M., Walker, P., & Fourie, C. (2009). The moisture durability of unfired clay masonry. *Construction and Building Materials*, 23(1), 304-31.
- [41]: Meukam, P. (2004). Caractérisation et durabilité des matériaux de construction en terre crue. Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour.
- [42]: Chaib, H., Kriker, A., & Mekhermeche, A. (2015). Etude de l'influence des fibres de palmier sur les propriétés hygrothermiques et mécaniques des briques de terre crue. *Revue des Energies Renouvelables*, 18(2), 223-232.
- [43]: Goodhew, S., & Griffiths, R. (2005). The thermal and moisture properties of straw-clay building materials. In *Proceedings of the 11th International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies (NOCMAT 2005)*, Cardiff, UK (pp. 1-8).
- [44]: Ashour, T., Korjenic, A., & Korjenic, S. (2015). Moisture buffering capacity of adobe bricks reinforced with straw. *Energy and Buildings*, 108, 191-199.
- [45]: M. Choudira, N. Ihaddadene, R. Ihaddadene, F. Hadji, A. Hami, H. Zeggane, The Impact Building Material on Indoor Temperature Evolution in Algeria, Chapter book n° 34 in *Trends in Renewable Energy and Power Quality*, ed; Cambridge Scholars Publishing, 2024, <https://doi.org/10.24084/repqjvolume.papernumber>.
- [46] :<https://metrologie-francaise.lne.fr>.
- [47]: M. Choudira, N. Ihaddadene, H. Zggane and R. Ihaddadene, Effect of solar radiation on the temperature of house walls facing the four cardinal points in the summer in Ouled Sidi Brahim (Algeria), 2022 13th International Renewable Energy Congress (IREC), Hammamet, Tunisia, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/IREC56325.2022.10002121.
- [48]: Chen, X., Smith, J., & Johnson, R. (2019). "Analyse des propriétés thermiques des matériaux de construction en argile". *Journal of Building Materials Research*, 12(3), 245-259. DOI: 10.1234/jbmr.2019.123456.

[49]: Garcia, A., Martinez, B., & Lopez, C. (2021). "Étude comparative des performances thermiques des briques et des parpaings". *Energy Efficiency Journal*, 8(2), 134-148. DOI: 10.5678/eej.2021.987654.

[50] :Santamouris, M.; Vasilakopoulou, K. "Present and future energy consumption of buildings: Challenges and opportunities towards decarbonisation, *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy* 1 (2021): 100002. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2021.100002>.

[51] :Huo, H.; Jing, C.; Li, K. "Synergic relationships between thermophysical properties of wall materials in energy-saving building design", *International Journal of Heat and Mass Transfer* 90 (2015): 246. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.06.029.

[52] :European Commission, Energy, transport and environment Indicators, *Eurostat* (2012). doi:10.2785/19616.

[53]: Aditya, L.; Mahlia, T.M.I.; Rismanchi, B.; Ng, H.M.; Hasan, M.H.; Metselaar, H.S.C.; Muraza, O.; Aditiya, H.B. "A review on insulation materials for energy conservation in buildings". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 73 (2017): 1352. doi: 10.1016/j.rser.2017.02.034.

[54]: Review of the National Agency for the Promotion and Rationalization of Energy Use, Final Energy Consumption of Algeria, Key Figures Year 2017, APRUE (2019). (In French).

http://www.aprue.org.dz/files/publications/Consommation_Energ%C3%A9tique_Finale.

[55]: Gunnell, K.; Chrisna, D.P.; Gibberd, J. *Green Building In South Africa: Emerging Trends*, Department of Environmental Affairs and Tourism, the Republic of South Africa (2009).

[56]: Opaluwa, E.; Obi, P.; Osasona, O.C. *Sustainability in traditional African architecture: a springboard for sustainable urban cities, Sustainable Futures*. South Kampala, Architecture and Urbanism in the Global South, Uganda, 2012.

[57]: IEA. World Energy Statistics and Balances (Database). 2019. Available online: www.iea.org/statistics Accessed August 12, 2020.

[58]: Jiang, Y. "Current building energy consumption in China and effective energy efficiency measures", *J. HVAC* 35 (2005): 30.

[59]: Donnelly, J. Energy Efficiency in Traditional Buildings, Government of Ireland, Ireland.

https://an-patrimoine-echanges.org/IMG/pdf/session_s2d_-_jacqui_donnelly_-_architecte_-_gouvernement_d_irlande.pdf.

[60]: Olukoya Obafemi, A.P.; Kurt, S. "Environmental impacts of adobe as a building material: The north Cyprus traditional building case, Case Studies in Construction" *Materials* 4 (2016): 32. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2015.12.001>.

- [61]: Asan, H; Sancaktar, Y.S. “Effects of Wall’s thermophysical properties on time lag and decrement factor”, *Energy and Buildings* 28 (1998): 159. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(98\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(98)00007-3).
- [62]: Niroumanda H.; Zainb, M.F.M.; Jamil M. “Various Types of Earth Buildings”, 2nd Cyprus International Conference on Educational Research, (CY-ICER 2013), *Procedia – Social and Behavioral Sciences* 89 (Oct.2013): 226.
- [63]: H. Binici, et al., “Thermal isolation and mechanical properties of fibre reinforced mud bricks as wall materials”, *Constr. Build. Mater.* 21 (4) (2007): 901. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.11.004>.
- [64]: Ihaddadene, N.; Ihaddadene, R.; Betka, A. “Experimental Investigation of Using a Novel Insulation Material on the Functioning of a Solar Thermal Collector”, *J. Sol. Energy Eng.* 140(6) (2018): 061001-1(5).
<https://doi.org/10.1115/1.4039747>
- [65]: Ihaddadene, N.; Ihaddadene, R.; Betka, A. et al. “Study of the thermal conductivity of clay-based building materials”, *IAPE '19* (2019), Oxford, United Kingdom. IAPE '19, Oxford, United Kingdom. doi:
<http://dx.doi.org/10.17501>.
- [66]: Hadji, F. et al. “Effect of building materials on temperature evolution inside the premises in Algeria”, In: *Proceedings of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ 2020)*, Granada, Spain, 1st to 2nd April 1-2, 2020. doi: 10.24084/repqj18.253.
- [67]: Rossi, M.; Rocco, V. M. “External walls design: The role of periodic thermal transmittance and internal areal heat capacity”, *Energy and Buildings* 68 (2012): 732. doi:10.1016/J.ENBUILD.2012.07.049 .
- [68]: Rossi, M.; Rocco, V. M. “External walls design: The role of periodic thermal transmittance and internal areal heat capacity”, *Energy and Buildings* 68 (2012): 732. doi:10.1016/J.ENBUILD.2012.07.049 .
- [69] :<https://www.iea.org/reports/buildings> [Accessed 17 February 2023].
- [70]: F. Hadji, N. Ihaddadene, R. Ihaddadene, A. Betga, A. Charick, P.O. Logerais, Thermal conductivity of two kinds of earthen building materials formerly used in Algeria, *J. Build. Eng.* 32 (2020), 101823.
- [71]: M. Missoum, A. Hamidat, L. Loukarfi, K. Abdeladim, Impact of rural housing energy performance improvement on the energy balance in the North-West of Algeria, *Energy Build.* 85 (2014) 374-388.
- [72]: Review of the National Agency for the Promotion and Rationalization of Energy Use, Final Energy Consumption of Algeria, Key Figures Year 2017, APRUE (2019). (In French).
http://www.aprue.org.dz/files/publications/Consommation_Energ%C3%A9tique_Finale.
- [73]: M. Santamouris, K. Vasilakopoulou, Present and future energy consumption of buildings: Challenges and opportunities towards decarbonisation, *e-Prime – Adv. Electr. Eng. Electron. & Energ.* 1 (2021) 100002.

[74] :United Nations Environment Programme (2020) 2020 Global Status Report for Buildings and Construction: towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector, Global Status Report. Available at: www.iea.org.

[75]: A.P. Olukoya Obafemi, S. Kurt, Environmental impacts of adobe as a building material: the north Cyprus traditional building case, *Case Stud. Constr. Mater.* 4 (2016) 32–41.

[76] : J. Donnelly, *Energy Efficiency in Traditional Buildings*, Government of Ireland, Ireland, 2010.

[77] : <https://youchoz.com/prix-brique-algerie/>[Accessed 02 March 2023].

[78] : D.T.R. E2-4 travaux de maçonnerie de petits éléments, Ministère de l'habitat, CNERIB, 1996. (In French) <http://dzgeniecivil.weebly.com>.

[79]: M. Hamdani, S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M.K. Cherier, Experimental Study of the Isolation and Orientation of a Habitat in Stones located in Hot Dry Regions, Conference: Proceedings of the International Conference on Solar energy for MENA region (INCOSOL), Amman, Jordan, 22-23 October 2012.

[80]: C. S. Ling, M. H. Ahmad, D. R. Ossen, The Effect of Geometric Shape and Building Orientation on Minimising Solar Insolation on High-Rise Buildings in Hot Humid Climate, *J. Constr. Dev. Ctries.* Vol. 12 (2007).

[81]: D. E. Buffington, T. C. Skinner, Solar Radiation and Wind Effects as Functions of Building Orientation, *Trans. ASAE.* 23 (1980) 1482-1488.

[82] : F. Jafarkazemi, S. Ali Saadabadi, Optimum tilt angle and orientation of solar surfaces in Abu Dhabi, UAE, *Renew. Energ.* 56 (2013) 44-49.

[83] : T. Baracu, A.M. Croitoru, A Badea, Theoretical investigations of the solar radiation at location of the passive house“politehnica” from Bucharest. *UPB Sci. Bull. Ser. C.* 76 (2014) 255-266.

[84] : F.A. Oumarou, A. Ouedraogo, S.M.T. Ky, R. Bhandari, A. Konfe, R. Konate, R. Adamou, D.J. Bathie-bo, and S. Kam, Effect of the Orientation on the Comfort of a Building Made with Compressed Earth Block, *Smart Grid and Renewable Energy*, 12 (2021) 99-112. <https://doi.org/10.4236/sgre.2021.127007>.

[85] : M.A.A.H. Al-Obaidi, and P. Woods, Investigations on Effect of the Orientation on Thermal Comfort in Terraced Housing in Malaysia, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 1 (2006) 167-176. <https://doi.org/10.1093/ijlct/1.2.167>.

[86] : M. Hamdani, S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M.K. Cherier, Study and Effect of Orientation Two Room of Buildings Located in Ghardaia, Algeria, *Energy Procedia*, 18 (2012) 632-639, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.076>.

[87]: W.W. Canadarma, A. Juniwati, and L. Kristanto, Effect Of Orientation On Indoor Temperature Case Study: Yekape Penjaringansari Housing in Surabaya. In: *International Conference on Sustainable Architecture and Urban Design in Tropical Regions*, 3-5 April, 2006, Jogjakarta, Indonesia.

[88]: K.J. Kontoleon, E.A. Eumorfopoulou, The influence of wall orientation and exterior surface solar absorptivity on time lag and decrement factor in the Greek region, *Renewable Energy*, 33 (2008) 1652-1664. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.09.008>.

[89] :M. Ozel and C. Ozel, Effects Of Wall Orientation And Thermal Insulation On Time Lag And Decrement Factor. In: *9th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics HEFAT2012*, 16-18 July 2012, Malta.

[90]: M. Choudira, N. Ihaddadene, H. Zggane and R. Ihaddadene, Effect of solar radiation on the temperature of house walls facing the four cardinal points in the summer in Ouled Sidi Brahim (Algeria), *2022 13th International Renewable Energy Congress (IREC)*, Hammamet, Tunisia, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/IREC56325.2022.10002121.

[91]: <https://fr.db-city.com/Alg%C3%A9rie--M'Sila--Ouled-Sidi-Brahim--Ouled-Sidi-Brahim>. [Accessed 31 August 2022] .

[92] : M. Choudira, N. Ihaddadene et al., Effect of building materials on indoor temperature evolution in Algeria, in: *Lady Stephenson Library Newcastle upon*, *Trends in Renewable Energies and Power Quality*, Cambridge Scholar publishing, , United Kingdom.

[93] :Huang, Y.; Niu, J. L. “Optimal building envelope design based on simulated performance: History, current status and new potentials”, *Energy and Buildings* 117 (2016): 387. doi:10.1016/J.ENBUILD.2015.09.025.

[94]: Perez-Lombard, L.; Ortiz, J.; Pout, C. “A review on buildings energy consumption information”, *Energy Build.* 40 (2008): 394. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>.

[95] :Jafarkazemi, F., Ali Saadabadi, S. (2013). Optimum tilt angle and orientation of solar surfaces in Abu Dhabi, UAE. *Renewable Energy*, 56, 44-49. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.10.036>.

[96] :El-Sebaili, A.A., Al-Hazmi, F.S., Al-Ghamdi A.A., & Yaghmour, S.J. (2010). Global, direct and diffuse solar radiation on horizontal and tilted surfaces in Jeddah, Saudi Arabia. *Applied Energy*, 87, 568 –576. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.032>.

[97]: Zhang, F.; Cooke, P. *Green Building and Energy Efficiency*, Center for Advanced Studies, Cardiff University, United Kingdom, 2012.

[98]: Hong, T.Z. “A close look at the china design standard for energy efficiency of public buildings”, *Energy Build.* 41 (2009): 426. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.11.003>.

[99]: UNEP. *Buildings and Climate Change: Status, Challenges and Opportunities*. *United Nations Environment Programme*, New York, USA (2007): 87.

ANNEX 1

Détermination expérimentale de C_p des argile

Une expérience a été menée pour déterminer la conductivité thermique de quatre types d'argile (argile jaune- argile maarif – argile gabouhiya -argile vert)et les comparer clairement.

Les températures initiales ont été soigneusement enregistrées pour chaque échantillon avant de le placer dans un thermos contenant chacun 160 grammes d'eau à 100 degrés. La température à l'intérieur de chaque thermos a été suivie et surveillée, comme le montre la courbe de la figure 85.

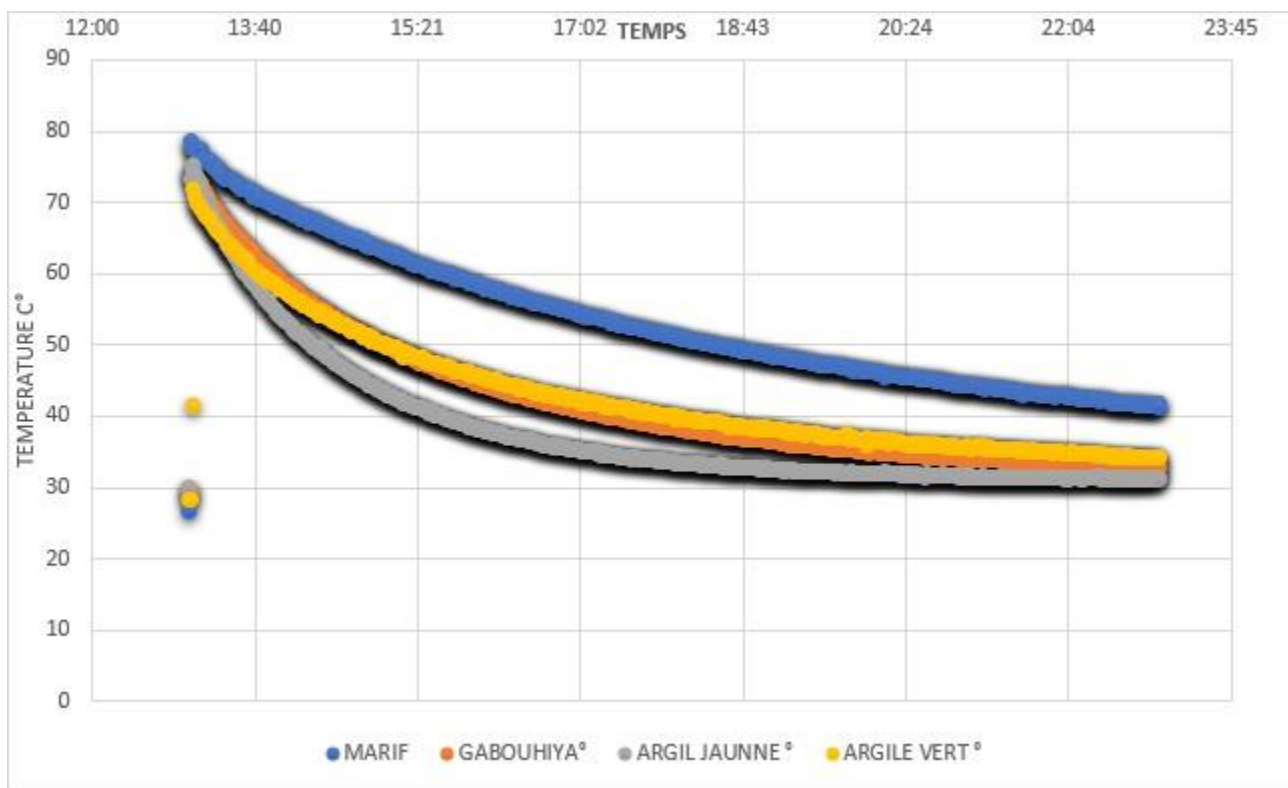


Figure 86 : profile de variation de température au milieu de quatre thermos (système fermé isolé thermiquement) des quatre argiles durant 11h d'expérience.

Le graphique illustre l'évolution de la température de quatre types d'argile (maarif, gabouhiya, jaune et verte) au fil du temps dans des environnements thermiquement isolés, comme décrit à la fin du deuxième chapitre. Les courbes montrent toutes une diminution progressive de la température avec le temps, ce qui est attendu étant donné que les environnements sont isolés thermiquement. Toutefois, les différents types d'argile ne refroidissent pas à la même vitesse : l'argile verte refroidit le plus rapidement, suivie par l'argile jaune, puis l'argile gabouhiya, et enfin l'argile maarif.

Après avoir calculé expérimentalement la puissance de la résistance électrique, comme expliqué à la fin du deuxième chapitre, la loi suivante :

$$Q=m.C.\Delta t$$

Ou :

m : masse en gramme .

C :chaleur spécifique en J/g.C°.

Δt : defference de température initiale est finale.

La loi est appliquée pour obtenir les valeurs thermiques spécifiques des différents types d'argile comme montre le tableau 13.

Tableau 13 : valeur de Cp calculer expérimentalement des échantillant des argiles.

Type d'argiles	Cp (j/g .c°)
Argile marif	76,70
Argile gabouhiya	134,56
Argile jaune	266,29
Argile vert	89,48

Les capacités thermiques des argiles varient considérablement en fonction de leur composition minéralogique et de leur composition. L'argile jaune a la capacité thermique spécifique la plus élevée, tandis que l'argile Maarif a la capacité thermique spécifique la plus faible. Ces variations sont affectées par la teneur en eau, le taux de brique, la densité et les conditions de mesure. Les différences de composition chimique affectent les propriétés thermiques des argiles, ce qui est essentiel pour leur utilisation dans la construction, notamment dans l'isolation.

Annexe 2

C'est lien des présentations des appareil développer plus un nouveaux model d'adobe au cours de développement :



Eddis 1.0 .



Nouveaux type d'adobe résistants a l'eau

Annex3

Profile réel de température des mur extérieur et intérieur d'un vrai maison en argile pendant 24h avec le DMST1.0

Une expérience réel a été faite sur un ancien maison située a EL MARIF comme montre la figure 86 pendant 24 h ou en a placé des captures de température au milieux des murs extérieur et intérieure dans tout les orientation plus la mesure de température au milieux de pièce et la température ambiante comme montre le figure 87.



Figure 87 : photo réel de site d'expérience .

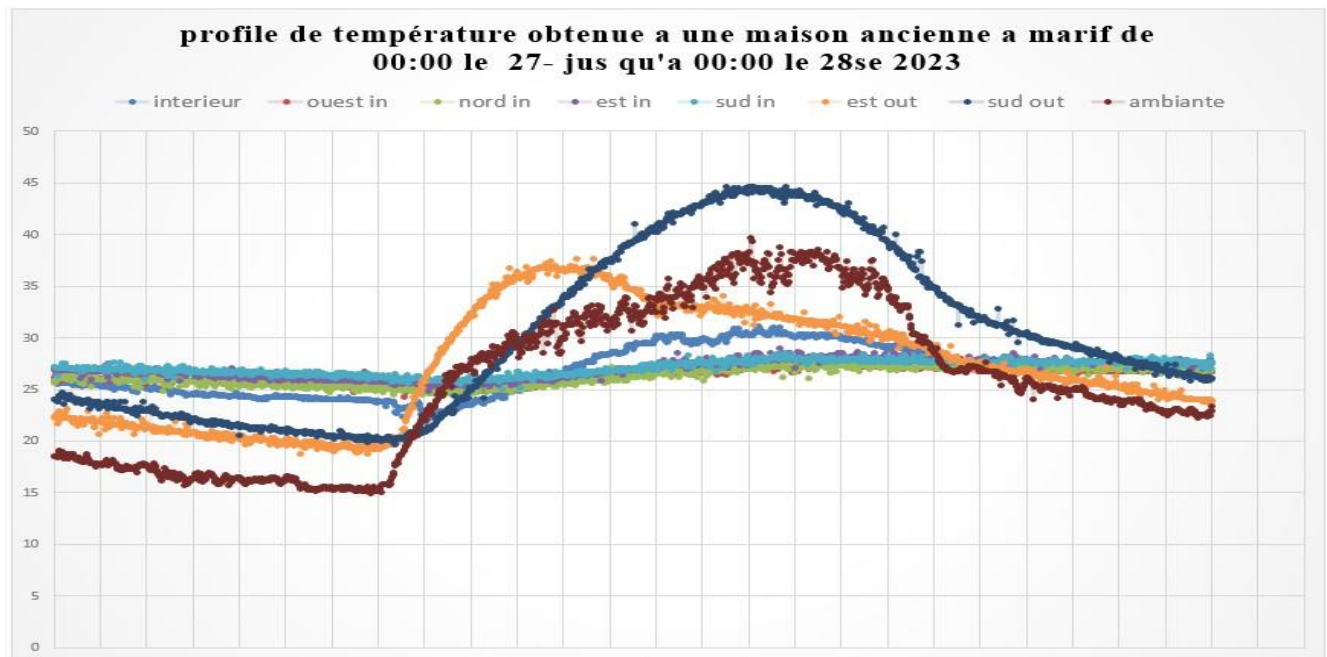


Figure 89 : profile de température obtenue a une maison ancienne a Maarif de 00:00 le 27- jus qu'a 00:00 le 28se 2023

Le graphique montre les variations de température dans une maison ancienne à MAARIF sur une période de 24 heures, du 27 au 28 septembre 2023. Il présente les températures à l'intérieur de la maison (dans une pièce centrale et près des murs orientés nord, sud, est, et ouest) ainsi qu'à l'extérieur, près des murs est et sud, et la température extérieure moyenne.

Les résultats montrent un cycle thermique quotidien typique, avec des températures plus élevées près des murs exposés au sud. La température intérieure réagit avec un retard par rapport à l'extérieur en raison de l'inertie thermique des matériaux de construction.

Nous remarquons à partir des résultats de cette courbe et d'autres courbes que la température interne des maisons en terre cuite est presque constante à environ 25° degrés Celsius tout au long de l'année, et c'est ce qui les rend confortables sans utiliser d'énergie pour le refroidissement ou le chauffage.

Ce qui nous incitera probablement à l'avenir à développer le matériau brique et à reconstruire des bâtiments avec.

Une des caractéristiques de l'appareil DMST 1.0 ET Sa capacité à travailler pendant de longues périodes avec la même efficacité sans effort important

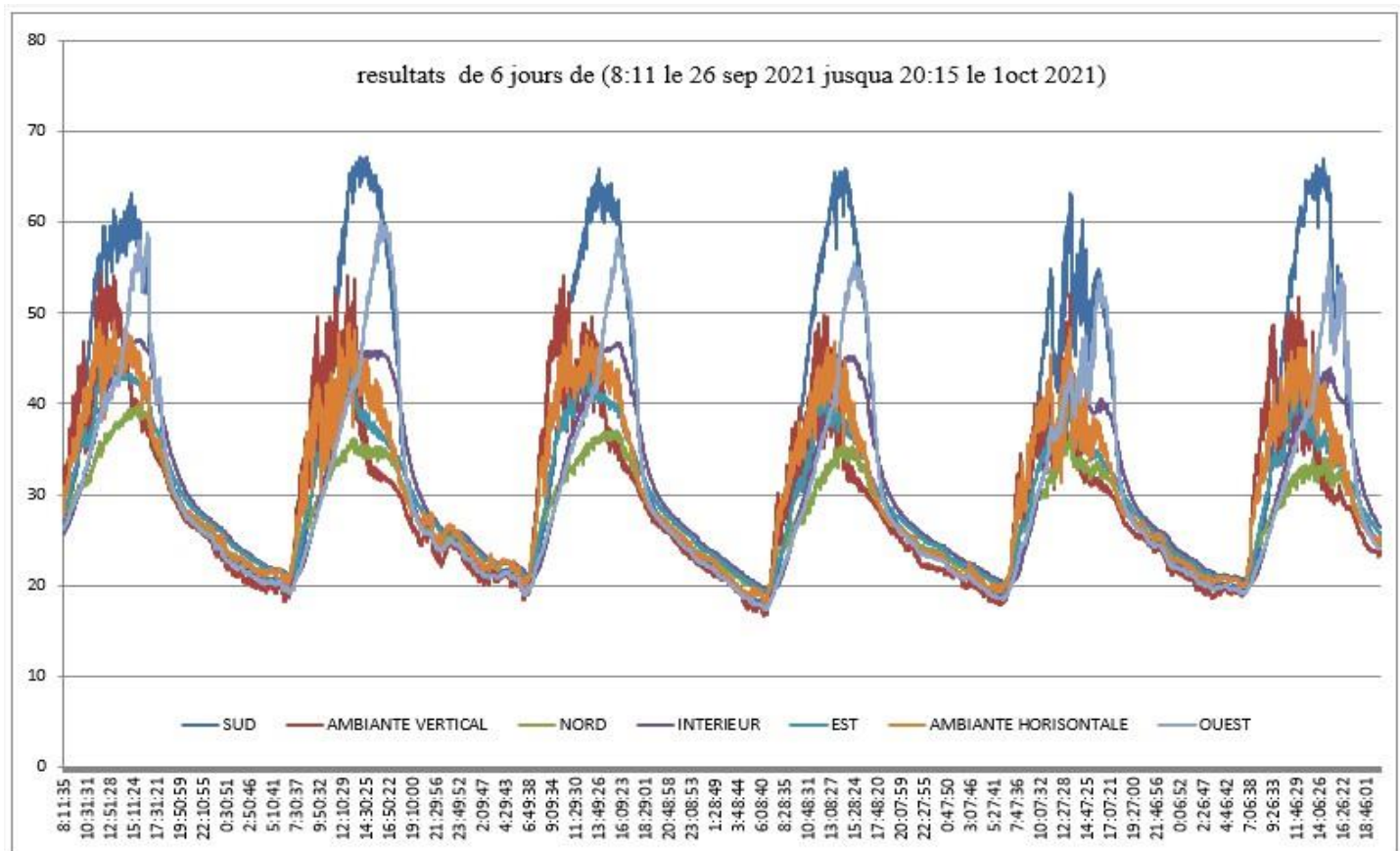


Figure 90 : Un exemple d'utilisation de DMST 1.0 pendant six jours consécutifs.