



Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd
Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique



Thèse

Préparée au sein du Laboratoire d'Etude
des Systèmes Energétiques Industriels LESEI

Présentée pour l'obtention du diplôme de :
Doctorat troisième cycle (L.M.D)
Option : Énergétique

Sous le Thème :

**Etude du Confort Thermique avec Optimisation de la
Consommation Energétique en Zone Semi-Aride :
Site à Batna**

Présentée par :

BOULEBBINA Cherif

Devant le jury composé de :

M. BOUGRIOU Cherif	Prof.	Université de Batna 2	Président
M. RAHAL Samir	Prof.	Université de Batna 2	Rapporteur
M. MEBARKI Ghazali	Prof.	Université de Batna 2	Co-Rapporteur
M. MADANI Hakim	Prof.	Université de Batna 2	Examineur
M. BENMACHICHE A/Hakim	Prof.	Université de Batna 1	Examineur

20 juin 2022

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés au sien du Laboratoire d'Etude des Systèmes Energétiques Industriels L'ESEI, du département de Génie Mécanique, de la faculté de Technologie, de l'université Batna 2-Mostefa Ben Boulaïd.

Je remercie, avant tout, Dieu le tout-puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donné durant ces années d'études du troisième cycle de Doctorat L.M.D, afin que je puisse arriver à ce stade et de pouvoir achevé ce modeste travail.

J'adresse toute ma gratitude aux Professeurs RAHAL Samir et MEBARKI Ghazali mes directeurs de thèse pour leur grande bienveillance dès le début de ma thèse et jusqu'à présent et pour avoir créé les conditions propices qui m'ont permis de travailler dans un cadre parfaitement adéquat. Je les remercie pour les échanges que nous avons eus et les perspectives que ce travail a apportées. Je les remercie chaleureusement pour cette collaboration aussi enrichissante techniquement que sur le plan humain.

Je souhaite adresser mes très sincères et vifs remerciements à l'ensemble des membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont manifesté à l'égard de cette modeste thèse, en me faisant l'honneur d'évaluer et de juger ce travail. Merci au professeur BOUGRIOU Cherif d'avoir accepté de présider le jury. Je tiens à remercier les professeurs MADANI Hakim et BENMACHICHE Abdelmoumene Hakim d'avoir accepté d'être examinateurs de ces travaux de thèse.

J'aimerais également remercier mes collègues doctorants de la promotion, et aussi les collègues du laboratoire L'ESEI, qui ont permis de rendre cette expérience enrichissante. Je voudrais remercier tous les enseignants et enseignantes que j'ai connus tout au long du cycle de mes études. Je remercie particulièrement mes amis et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à réaliser de ce travail.

Enfin, je tiens à remercier ma famille, mes parents, mon frère et mes sœurs qui m'ont toujours encouragé et soutenue inconditionnellement dans mon parcours universitaire, comme dans la vie.

Merci tout le monde encore du fond du cœur...

B. Cherif

Table des matières

Remerciements	
Nomenclature	I
Liste des figures	II
Liste des tableaux	IV
Introduction générale	2
Chapitre I Confort Thermique et Architecture Bioclimatique	
I.1 Introduction	4
I.2 Concept de confort thermique humain	4
1- Études des chambres climatiques	5
2- Études de terrain	5
I.3 Facteurs affectant le confort thermique	6
I.3.1 Température de l'air	7
I.3.2 Température radiante	8
I.3.3 Humidité	8
I.3.4 Vitesse de l'air	9
I.3.5 L'activité	9
I.3.6 Les vêtements	10
I.4 Approche d'architecture bioclimatique	11
I.4.1 Relation entre le climat, le bâtiment et les occupants	11
I.4.2 Zones de confort et de confort autorisées	13
I.5 Chauffage solaire passif	13
I.5.1 Classification des systèmes solaires passifs	14
a- Système solaire passif direct	15
b- Système solaire passif indirect	15
I.5.2 Critères de conception des bâtiments bioclimatiques	16
I.5.3 Exploitation et gestion des environnements solaires passifs	17
I.6 Conclusion	18
Références bibliographiques	20
Chapitre II Système de chauffage passif à mur Trombe	
II.1 Introduction	22
II.2 Composition et fonctionnement du mur Trombe	23
II.3 Classification des systèmes à mur Trombe	24
II.3.1 Mur Trombe basé sur le chauffage	25
1- Mur Trombe Classique (MTC)	25
2- Mur Trombe composite ou Mur Trombe-Michel (MTM)	26
3- Mur Trombe d'Eau (MTE)	26
4- Mur Trombe en Zigzag (MTZ)	27
5- Trans-Mur Solaire (TMS)	27
6- Mur Trombe Fluidisé (MTF)	28
7- Mur Trombe Photovoltaïque (MTPV)	28
II.3.2 Mur Trombe basé sur le refroidissement	29
1- Mur Trombe d'évaporation en céramique (MTEC)	29
2- Mur Trombe Classique (MTC)	30
3- Mur Trombe photovoltaïque (MTPV)	30
4- Mur trombe avec cheminée solaire (MTCS)	31
II.4 Facteurs de conception des systèmes à mur Trombe	32
II.4.1 Paramètres de conception du mur Trombe	32
a- Propriétés du vitrage	32

b- Surface du mur Trombe	32
c- Propriétés du mur massif	33
d- Dispositifs d'ombrage	33
e- Epaisseur du canal	34
II.4.2 Paramètres de construction	35
a- Matériaux de construction	35
b- Effets de fenêtre	35
II.4.3 Paramètres du site géographique	35
a- Radiation solaire et orientation	35
b- Vitesse et direction du vent	36
II.5 Avantages et inconvénients des systèmes à mur Trombe	36
II.6 Conclusion	37
Références bibliographiques	38
Chapitre III Matériaux biosourcés appliqués à l'isolation thermique	
III.1 Introduction	41
III.2 L'isolation thermique	41
III.3 Stratégies de l'isolation thermique	42
a- Isolation intérieure	42
b- Isolation extérieure	42
c- Isolation répartie	43
III.4 Critères d'évaluation des isolants thermiques	43
1- Conductivité thermique	44
2- Résistance thermique	44
3- Capacité thermique spécifique	44
4- Masse volumique	44
5- Diffusivité thermique	44
6- Coefficient de transmission thermique	44
7- Perméabilité à la vapeur d'eau	44
III.5 Classification des matériaux d'isolation thermique	44
III.6 Matériaux biosourcés d'isolation thermique	46
1- Le roseau	46
2- Le bagasse	46
3- L'épi de maïs	47
4- Le riz	47
5- Le liège	47
6- La paille	48
7- Le chanvre	48
8- Le palmier-dattier	48
III.7 Conclusion	50
Références bibliographiques	51
Chapitre IV Étude et réalisation d'un prototype de maison solaire passive	
Partie I: Évaluation des propriétés thermo-physique d'un matériau isolant biosourcé	
IV.I.1 Introduction	52
IV.I.2 Procédure expérimentale	52
IV.I.2.1 Banc d'essai	53
IV.I.2.2 Instruments de mesures	54
a- Enregistreur de données 'Testo 176 T4'	54
b- Logiciel de traitement 'Testo Comfort Software'	55
c- Thermomètre infrarouge 'Testo 830 T1'	55
IV.I.3 Résultats des essais	56

Partie II: Efficacité Energétique d'un mur Trombe dans la région semi-aride de Batna	
IV.II.1 Introduction	59
IV.II.2 Conception du prototype de la maison solaire passive	59
IV.II.3 Principe de fonctionnement du mur Trombe	62
IV.II.3.1 Echanges thermiques dans le mur Trombe	63
a- Surface extérieure du vitrage	63
b- Surface intérieure du vitrage	64
c- Surface extérieure du mur massif	64
d- Convection dans le canal d'air	65
e- Surface intérieure du mur massif	66
f- Efficacité thermique de la maison solaire passive	66
g- coefficient de ventilation global	67
IV.II.3.2 Système d'aération passive amélioré	68
V. Conclusion	68
Références Bibliographiques	69
Chapitre V Résultats et discussions	
V.1 Introduction	70
V.2 Chauffage solaire passive	70
V.2.1 Détermination de l'orientation optimale	70
V.2.2 Détermination de l'efficacité thermique de la maison solaire	73
V.2.3 Résultats de la simulation numérique	76
V.3 Refroidissement solaire passif	79
V.4 Conclusion	85
Conclusion générale et perspectives	87
Annexe	89

Nomenclature

Alphabet latin

Symbole	Désignation
G	Radiation solaire globale (W/m ²)
A	Surface (m ²)
H	Hauteur (m)
T	Température (°C)
V	Vitesse du fluide (m/s)
m	Débit massique d'air (kg/s)
<i>a</i>	Diffusivité thermique (m ² /s)
C _p	Chaleur spécifique (J/kg°C)
g	Accélération de pesanteur (m ² /s)
t	Temps (s)
e	Épaisseur (m)
Q	Puissance calorifique (W)
R	Résistance thermique (m ² °C/W)
K	Coefficient de ventilation
h _c	Coefficient de convection (W/m ² K)
h _r	Coefficient de radiation (W/m ² K)
Ra	Nombre de Rayleigh
Gr	Nombre de Grashof
Nu	Nombre de Nusselt
Pr	Nombre de Prandtl
X	Variable indépendante

Lettres grecques

Symbole	Désignation
ρ	Masse volumique (kg/m ³)
μ	Viscosité dynamique (kg/ms)
ν	Viscosité cinématique (m ² /s)
β	Coefficient de dilatation thermique (°C ⁻¹)
λ	Conductivité thermique (W/m ² °C)
α	Absorptivité solaire
ε	Émissivité
τ	Transmissivité
σ	Constante de Stefan Boltzmann (W/m ² K ⁴)
Φ	Densité du flux de chaleur (W/m ²)
η	Efficacité thermique (%)

Indices

Symbole	Désignation
c	Canal
w	Mur
g	Vitrage
f	Fluide
in	Intérieur

Symbole	Désignation
ex	Extérieur
r	Radiation
exp	Expérimental
sim	Simulation
amb	Ambiance
sky	Ciel
cond	Conduction
conv	Convection
omb	Ombre

Abréviations

Symbole	Désignation
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
PMV	Vote Moyen Prédit (Predicted Mean Vote)
PPD	Pourcentage prédit d'insatisfaits (Predicted Percentage of Dissatisfied)
HR	Humidité Relative (Relative Humidity)
PCM	Matériaux à Changement de Phase (Phase Change Materials)
MTC	Mur Trombe Classique
MTM	Mur Trombe-Michel
MTE	Mur Trombe d'Eau
MTZ	Mur Trombe en Zigzag
TMS	Trans-Mur Solaire
MTF	Mur Trombe Fluidisée
MTPV	Mur Trombe Photovoltaïque
MTEC	Mur Trombe d'Évaporation en Céramique
MTCS	Mur Trombe combiné avec une cheminée solaire
LCC	Coût du Cycle de Vie (Life Cycle Cost)
EPS	Polystyrène expansé
XPS	Polystyrène extrudé
VIP	Panneaux sous Vide (Vacuum Insulating panels)
DPW	Bois de Palmier Dattier (Date Palm wood)
MDF	Fibres à Densité Moyenne (Medium Density Fibers)

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 Aspects affectant le confort thermique dans les approches 'PMV' et 'PPD'.	6
Figure I.2 Les principaux facteurs affectant le confort thermique.	6
Figure I.3 Diagramme humidité relative/température basé sur la zone de confort selon ASHRAE .	7
Figure I.4 Indice de chaleur.	7
Figure I.5 Diagramme RH/T montrant la zone de confort selon ISO 7730.	9
Figure I.6 Exemples de taux métaboliques pour différentes activités.	10
Figure I.7 Niveau d'isolation des vêtements selon l'unité Clo.	10
Figure I.8 La stratégie de chauffage.	12
Figure I.9 Stratégie de refroidissement.	12
Figure I.10 Stratégie d'éclairage naturel.	13
Figure I.11 a- Galerie vitrée, b- Serre attenante, c- Mur Trombe.	14
Figure I.12 Représentation des ouvertures de toit pour un chauffage solaire passif.	14
Figure I.13 Système à gain solaire passive direct.	15
Figure I.14 Système passive à gain solaire indirect : mur massif capteur-stockeur.	16
Figure I.15 Système passif à gain solaire indirect : mur à structure ventilée.	16
Figure I.16 Domaines d'impact des utilisateurs.	18

Chapitre II

Figure II.1 Structure et composition du mur Trombe.	23
Figure II.2 Illustration des quatre configurations de fonctionnement des murs Trombe.	24
Figure II.3 Classification des murs Trombe.	25
Figure II.4 Mur de Trombe classique pour le chauffage hivernal.	25
Figure II.5 Mur Trombe composite ou Mur Trombe-Michel.	26
Figure II.6 Croquis du Mur Trombe d'Eau.	27
Figure II.7 Mur Trombe en zigzag.	27
Figure II.8 Coupe transversale du système Trans-Mur Solaire.	28
Figure II.9 Coupe transversale du système Mur Trombe Fluidisé.	28
Figure II.10 Image d'un mur Trombe Photovoltaïque.	29
Figure II.11 Mur Trombe Photovoltaïque avec ventilateur pour le chauffage hivernal.	29
Figure II.12 Mur Trombe d'évaporation en céramique.	30
Figure II.13 Mur Trombe avec cheminée solaire : a- mode de ventilation naturelle ; b- mode d'isolation thermique.	30
Figure II.14 Mur Trombe photovoltaïque pour le refroidissement.	31
Figure II.15 Mur trombe avec cheminée solaire.	31
Figure II.16 Forme de double vitrage.	32
Figure II.17 Vue extérieure du mur de stockage.	33
Figure II.18 Techniques d'ombrages : a- par la végétation feuillue, b- par le couvert, c- par le balcon, d- pare-soleil extérieur et rideaux intérieur, e- lamelles extérieures.	34
Figure II.19 Stores vénitiens à deux angles différents.	34
Figure II.20 Identification de l'orientation optimale d'hiver et d'été, selon la région et le site.	36

Chapitre III

Figure III.1 Pertes thermiques par différentes parties d'un habitat mal isolé.	41
Figure III.2 Exemple d'isolation intérieure (pose de panneaux par collage).	42
Figure III.3 Exemple d'isolation extérieure d'une paroi (isolation par panneaux enduits).	43

Figure III.4 Exemple d'isolation répartie.	43
Figure III.5 Classification des matériaux isolants.	45
Figure III.6 Photo illustrant le panneau de roseaux.	46
Figure III.7 Photo de canne à sucre (à gauche) et bagasse de canne à sucre (à droite).	46
Figure III.8 Photo d'Épi de maïs : brut (gauche), sol (milieu) et panneau (droite).	47
Figure III.9 Paille de riz (à gauche), panneau de balles de riz testé (à droite).	47
Figure III.10 Spécimen de liège testé (à gauche), configuration du sandwich examiné (à droite).	47
Figure III.11 Echantillon d'un matériau d'isolation thermique à base de paille.	48
Figure III.12 Fibres de chanvre hachées.	48
Figure III.13 Parties d'un palmier dattier a- pétioles, b-c échantillon en fibres.	49
Figure III.14 Panneaux sandwich DPW-MDF : a- latté 25 mm, b- latté 60 mm.	49

Chapitre IV

Figure IV.1 Etapes de préparation de l'échantillon du bois de palmier-dattier.	53
Figure IV.2 Le banc d'essai.	53
Figure IV.3 Emplacement des instruments de mesure sur le banc d'essai.	54
Figure IV.4 Enregistreur de données 'Testo 176 T4'.	54
Figure IV.5 Page d'accueil du logiciel 'Testo Comfort Software'.	55
Figure IV.6 Thermomètre infrarouge 'Testo 830 T1'.	56
Figure IV.7 Variations des températures en fonction du temps dans les surfaces interne de : a- Polystyrène, b- Laine de verre, c- Bois de Palmier-Dattier.	57
Figure IV.8 Variations de la température à travers les parois multicouches.	58
Figure IV.9 Site de l'expérimentation du prototype de la maison solaire passive.	59
Figure IV.10 Structure fondamentale de Prototype de la maison passive.	60
Figure IV.11 Composition des murs multicouche du prototype de la maison solaire.	60
Figure IV.12 Matériaux à inertie thermique utilisés pour la construction du mur de la façade : a: Pierres taillées, b: Adobe.	61
Figure IV.13 Dispositif expérimentale du prototype de la maison solaire passive.	62
Figure IV.14 Mur Trombe.	62
Figure IV.15 Principe de fonctionnement du mur Trombe : (a) mode chauffage, (b) mode ventilation.	63
Figure IV.16 Analogie électrique des échanges thermiques dans le système à mur Trombe.	63
Figure IV.17 Schéma du système passif : a- refroidissement classique, b- refroidissement amélioré.	68

Chapitre V

Figure V.1 Les différentes orientations étudiées dans le site de la faculté de Technologie.	70
Figure V.2 Evolutions des températures, de l'humidité relative, de la vitesse du vent et du rayonnement solaire pour diverses orientations et pour une façade en Adobe.	71
Figure V.3 Evolution des différentes températures, rayonnement solaire, humidité relative et vitesse du vent au diverses orientations avec la façade en pierre.	72
Figure V.4 Débit d'air dans le canal entre le vitrage et le mur Trombe pour l'orientation optimale.	73
Figure V.5 Evolution des coefficients de transfert de chaleur convectifs dans le canal d'air.	74
Figure V.6 Flux de chaleur absorbé par le mur : a- façade en Adobe, b- façade en Pierre.	75
Figure V.7 Efficacité thermique solaire de la maison passive.	75
Figure V.8 Gradient de température entre le 'canal d'air' et l'intérieur de la maison passive.	76
Figure V.9 Schéma des conditions aux limites du système : a- chauffage classique, b- refroidissement classique et c- refroidissement amélioré.	77
Figure V.10 Champs de température dans la maison solaire passive [°C] : a- 11h30, b- 14h00.	77
Figure V.11 Champs et vecteurs de vitesses dans la maison passive : a- 11h30, b- 14h00.	78
Figure V.12 Evolution journalière des températures et de la radiation solaire.	80

Figure V.13 Evolution journalière de la vitesse du vent et du coefficient convectif.	80
Figure V.14 Champs de températures à 14h00 : a- système classique, b- système amélioré.	81
Figure V.15 Champs de vitesses à 14h00 : a- système classique, b- système amélioré.	81
Figure V.16 Variation de la température le long d'une ligne verticale dans le canal d'air.	82
Figure V.17 Variation de la vitesse le long d'une ligne verticale dans le canal d'air.	82
Figure V.18 Coefficients de ventilation du système de refroidissement passifs.	84
Figure V.19 Efficacité de refroidissement des systèmes passifs classique et amélioré.	84

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 Les champs de sensation de la température.	8
Tableau I.2 Les sensations du corps humain vers différentes vitesses de l'air.	9

Chapitre IV

Tableau IV.1 Dimensions des matériaux isolants étudiés.	53
Tableau IV.2 Propriétés thermophysiques des matériaux utilisés.	54
Tableau IV.3 Caractéristiques techniques de l'enregistreur 'Testo 176 T4'.	55
Tableau IV.4 Caractéristiques techniques de 'Testo 830 T1'.	56
Tableau IV.5 Paramètres géométriques du prototype de la maison solaire passive.	60
Tableau IV.6 Propriétés thermophysiques de l'air.	67
Tableau IV.7 Propriétés thermophysiques des composants du mur Trombe.	67

Chapitre V

Tableau V.1 Températures moyennes internes et du canal d'air pour différentes orientations.	72
Tableau V.2 Erreur relative entre les valeurs de la simulation numérique et les données expérimentales.	79
Tableau V.3 Température et vitesse moyennes dans le canal d'air pour les deux systèmes.	83
Tableau V.4 Comparaison des différents paramètres entre les deux systèmes passifs.	83

Introduction générale

Introduction générale

L'Algérie joue un rôle clé dans les marchés mondiaux de l'énergie en tant que premier producteur et exportateur de gaz naturel en Afrique. De ce fait, l'Algérie se base presque exclusivement sur les énergies fossiles, en particulier le gaz naturel [1]. Cependant, l'Algérie dispose d'un énorme potentiel d'énergie renouvelable, principalement l'énergie solaire, que le gouvernement tente d'exploiter en lançant un ambitieux programme d'énergies renouvelables et d'efficacité énergétique à l'horizon de 2030 [2].

Dans le secteur du bâtiment, l'application des énergies renouvelables permet de compléter les systèmes énergétiques conventionnels. Pratiquement, il est possible pour une combinaison de concepts solaires passifs de réduire les coûts énergétiques. La stratégie passive de conception des logements à basse consommation d'énergie, afin d'atteindre un meilleur confort thermique, vise à maximiser l'utilisation d'énergie gratuite. Ceci dit, un bâtiment durable tend à préserver la santé des occupants et à optimiser la qualité des ambiances et du confort thermique, visuel et acoustique. Vis-à-vis de l'extérieur, un tel bâtiment est conçu pour maîtriser les impacts sur l'environnement [3].

L'objectif principal de ce travail est l'étude du confort thermique dans le bâtiment avec optimisation de la consommation énergétique en zone semi-aride. Il s'agit d'une réalisation puis expérimentation d'un prototype d'une maison solaire passive sous les conditions climatiques de la ville de Batna. Le prototype a été réalisé et testé à la faculté de technologie de l'université de Batna 2. Le système à mur Trombe a été utilisé pour étudier le chauffage et le refroidissement passifs. Des matériaux de construction locaux ont été choisis pour la construction du prototype (l'Adobe et la pierre des montagnes des Aurès). Pour l'isolation thermique, un nouveau matériau biosourcé issu des troncs de Palmier-Dattier a été adopté. Ce travail expérimental a été suivi d'une simulation numérique pour validation.

La thèse est structurée en cinq chapitres précédés d'une introduction générale et suivie d'une conclusion générale et perspective. Le premier chapitre présente des notions fondamentales sur le confort thermique des habitats et les principaux facteurs affectant ce confort. Il traite également les approches qui déterminent les zones de confort et l'architecture bioclimatique. Le second chapitre est consacré à une étude détaillée sur les caractéristiques des systèmes à mur Trombe. Il met l'accent sur les techniques du chauffage et du refroidissement solaire passifs, leurs avantages et inconvénients ainsi que leur amélioration de l'efficacité énergétique des habitats. Le troisième chapitre, présente une synthèse bibliographique sur les

différents types de matériaux naturels biosourcés les plus connues. Les classifications des matériaux d'isolation thermique et les principaux critères d'évaluation de ces isolants ont été abordés. Le quatrième chapitre est divisé en deux parties : la première partie est dédiée à l'élaboration d'un banc d'essai pour tester le comportement thermique, et les capacités isolantes du nouveau matériau biosourcé. La deuxième partie est consacrée aux différentes étapes de construction du prototype de la maison solaire passive intégrant le mur Trombe. La modélisation numérique des différents échanges thermiques dans les différentes parties du prototype est bien détaillée dans ce chapitre. Enfin, le cinquième et dernier chapitre est réservé à la présentation des résultats des tests effectués sur le prototype de la maison solaire passive. L'évaluation de l'efficacité et confort thermiques ainsi que la confrontation des résultats expérimentale et ceux de la simulation numérique a été traitée dans ce chapitre.

Références Bibliographiques

- [1] CDER, Algerian Renewable Energy Resource Atlas, 1st edition, 2019.
- [2] APRUE, Programme de développement de l'efficacité énergétique à l'horizon 2030, 2015.
- [3] RCREEE, Country Profile-Renewable Energy-Algeria, 2020.

Chapitre I

Confort Thermique et

Architecture Bioclimatique

Il est nécessaire d'accorder une plus grande importance au confort thermique en tant qu'objectif architectural fondamental et d'atteindre cet objectif sans l'aide d'appareils consommateurs d'énergie et porteurs d'empreintes écologiques importantes. Les connaissances sur l'architecture bioclimatique devraient imprégner toutes les sociétés, en tant que principaux utilisateurs des bâtiments, qui doivent fournir un confort approprié conduisant ainsi à la minimisation de l'utilisation des appareils de refroidissement et de chauffage. De plus, l'architecture bioclimatique doit jouer un rôle de plus en plus important dans le développement durable.

I.1 Introduction

Le confort thermique est un concept important pour les systèmes de chauffage et de climatisation. Il a été défini par Hensen comme 'l'état dans lequel il n'y a pas d'impulsions motrices pour corriger l'environnement par le comportement' [1]. La société américaine des ingénieurs de chauffages, de refroidissement et de climatisation de l'air 'ASHRAE' l'a définie comme 'l'état de l'esprit dans lequel la satisfaction s'exprime à l'égard de l'environnement thermique' [2]. Avec la connaissance des conditions de confort, les systèmes de contrôle du climat peuvent être conçus pour être plus adaptés aux besoins de l'utilisateur tout en étant plus efficaces et économique en énergie [3].

Les normes internationales ISO-7730 (2005) considèrent que puisqu'il existe des différences individuelles, il n'est pas facile de spécifier le confort thermique, mais il est possible de modifier l'environnement pour être accepté par un certain pourcentage des occupants. Ce pourcentage a été estimé de 80 à 90% des occupants [4].

Le confort thermique et ses effets sur l'être humain sont mieux compris grâce aux indices thermiques. La simple considération de la température de l'air n'est pas un indicateur adéquat. Les indices de confort thermique représentent l'effet intégré sur la sensation thermique, y compris toutes les variables pertinentes qui l'influencent [5]. L'étalonnage de ces indices vise à déterminer des intervalles représentatifs des conditions de confort thermique et à prédire la sensation thermique selon une échelle d'évaluation.

Il existe de nombreuses raisons pour lesquelles la société devrait se préoccuper et considérer le confort thermique. Il existe également un consensus international pour réduire les émissions de carbone. Bien qu'il puisse être difficile dans certaines régions climatiques d'obtenir un confort thermique sans l'utilisation de combustibles fossiles, il est possible d'obtenir un confort thermique pendant la majeure partie de l'année dans certains endroits par l'utilisation de stratégies de confort [6].

L'objectif principal de ce chapitre est l'examinations des principaux facteurs affectant le confort thermique ainsi que l'effet de l'architecture du bâtiment sur ce confort. On traite également les approches qui déterminent les zones de confort et l'architecture bioclimatique.

I.2 Concept de confort thermique humain

La recherche sur le confort thermique intègre plusieurs sciences telles que la physiologie, la physique du bâtiment, le génie mécanique et la psychologie. Il y a trois raisons de comprendre l'importance du confort thermique [7] :

- Fournir une condition satisfaisante aux personnes,
- Contrôler la consommation d'énergie,
- Suggérer et établir des normes.

Dans ce contexte, plusieurs objectifs ont été fixés pour développer les connaissances dans le domaine du confort thermique [8] :

- Contrôle de l'environnement intérieur par les personnes,
- Amélioration de la qualité de l'air intérieur,
- Réaliser des économies d'énergie,
- Réduire les atteintes à l'environnement en réduisant l'émission de CO₂,
- Améliorer les conditions du travail des occupants du bâtiment,

Deux approches générales sont à considérer pour déterminer le confort thermique [8] :

1- Études des chambres climatiques : le but de ces études est de déterminer des modèles de confort thermique en régime permanent. La recherche est menée dans une chambre d'essais environnementaux qui peut faire varier différents paramètres climatiques. Les variables personnelles (isolation des vêtements et taux métabolique) sont déterminées par la tâche et sont normalement supposées fixes. La raison la plus importante d'utiliser une telle situation stationnaire est la capacité à produire les conditions environnementales souhaitées (température de l'air, température radiante, vitesse de l'air, humidité) tout en contrôlant les variables indésirables, qui pourraient influencer les résultats.

2- Études de terrain : L'objectif de ces études est d'étudier le confort thermique dans le monde réel. La recherche est menée au fur et à mesure que les sujets effectuent normalement leur travail. L'étude de terrain est influencée par d'autres facteurs indirects, tels que des facteurs culturels et psychologiques. Le premier objectif est de découvrir quelle combinaison de variables environnementales décrit le mieux les réponses subjectives des sujets. L'hypothèse sous-jacente de l'enquête sur le terrain est que les gens sont capables de contrôler leur environnement de telle manière qu'ils essaient d'atteindre le confort.

Il existe deux approches principales pour estimer le confort thermique humain, le vote moyen prédit (PMV) et le pourcentage d'insatisfaits (PPD) [9,10]. Ces approches prennent en compte certains aspects environnementaux tels que la température de l'ambiance, l'humidité, la vitesse de l'air et la température moyenne de rayonnement (Figures I.1) ainsi que des facteurs humains tels que le taux métabolique [11].

- Le 'PMV' est un indice qui prédit la valeur moyenne des votes d'un grand groupe de personnes sur l'échelle de sensation thermique (ISO 7730).

- Le 'PPD' prédit la valeur moyenne du thermique d'une grande population. Il a été établi pour déterminer le pourcentage de personnes insatisfaites thermiquement (ISO-7730).

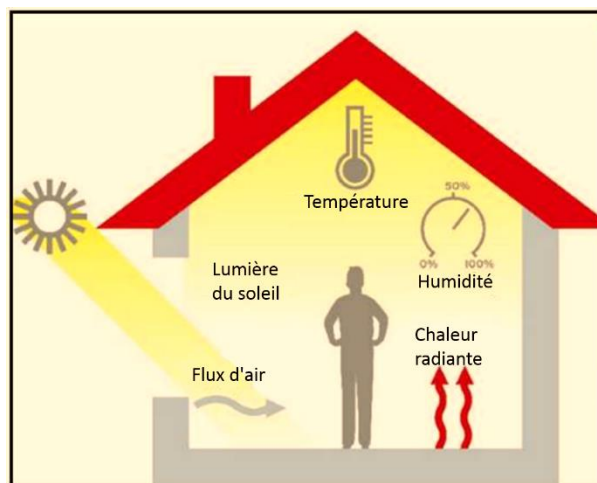


Figure I.1 Aspects affectant le confort thermique dans les approches 'PMV' et 'PPD'.

I.3 Facteurs affectant le confort thermique

Indépendamment des éléments individuels qui ont une influence relative sur le confort thermique, plusieurs facteurs ont un impact majeur sur la satisfaction ou l'insatisfaction des occupants. Les facteurs qui ont le plus d'influence sur le confort thermique humain sont les facteurs environnementaux qui couvrent de nombreux aspects dont il faut tenir compte (Figures I.2).

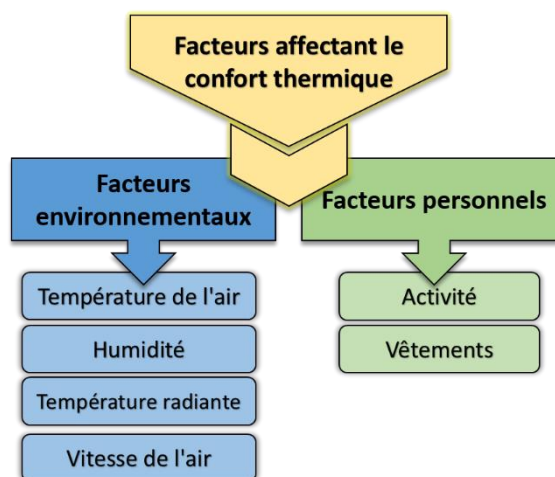


Figure I.2 Les principaux facteurs affectant le confort thermique.

ASHRAE' dans sa publication sur les conditions environnementales thermiques pour l'occupation humaine a défini une zone de confort pour les saisons d'hiver et d'été [12]. Cette définition de la zone de confort est quelque peu complexe mais peut être transformée par une

certaine approximation en une zone qui ne dépend que de l'humidité relative et de la température (Figure I.3).

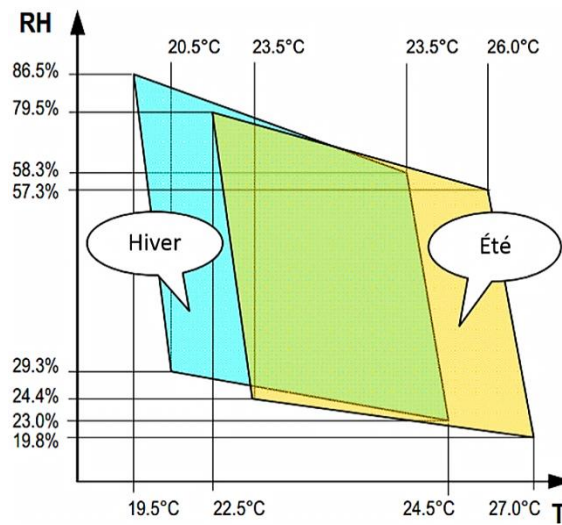


Figure I.3 Diagramme humidité relative/température basé sur la zone de confort selon ASHRAE [12].

I.3.1 Température de l'air : C'est la température entourant le corps humain. La température de l'air est l'un des aspects les plus importants dans la gestion du confort thermique [12, 13]. Dans des conditions d'humidité et de température élevées, le bien-être est contrôlé par le concept de l'indice de chaleur qui indique comment le corps humain ressent la température. La figure I.4 illustre l'indice de chaleur en fonction de la température et de l'humidité relative. La signification des valeurs est définie dans le tableau I.1.

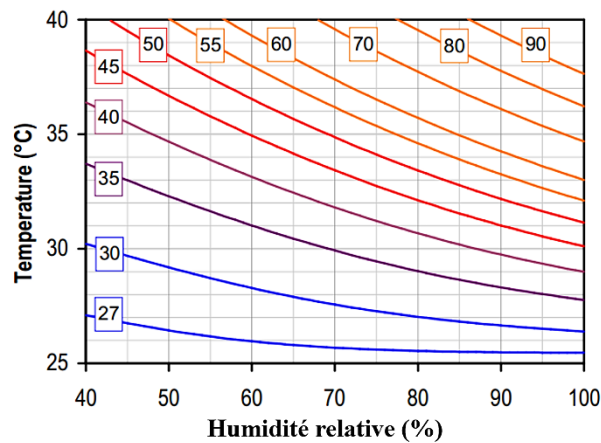


Figure I.4 Indice de chaleur [12].

Tableau I.1 Les champs de sensation de la température.

Température (°C)	Sensation
< 30	Pas d'inconfort
30 – 40	Un certain inconfort
40 – 45	Grand inconfort
> 45	Dangereux
> 54	Coup de chaleur imminent

En ce qui concerne la température intérieure optimale pour le confort thermique humain, Fanger a recommandé une valeur de 25,6 °C avec 80 % d'humidité relative et une vitesse de l'air de 0,4 m/s [14].

I.3.2 Température radiante : C'est la chaleur qui rayonne d'un objet chauffé existant dans l'environnement. Dans certains cas, cet aspect pourrait avoir une plus grande influence que la température de l'air elle-même. Le soleil est l'objet rayonné le plus important qui doit être pris en compte. Cependant, il existe plusieurs exemples comme les cuisinières, les séchoirs, les surfaces chaudes et les fours. Dans le cas des endroits chauds, pour obtenir un inconfort thermique, le rayonnement généré par le soleil ou même par toute autre source de rayonnement doit être contrôlé en fonction des conditions climatiques de la région [15].

I.3.3 Humidité : Selon l'ISO-7730 (2005), elle est exprimée en pression de vapeur d'eau dans l'air qui influence la perte de chaleur par évaporation d'une personne. L'humidité relative est le pourcentage entre la quantité actuelle d'eau évaporée et la quantité réelle d'eau que l'air peut contenir à une température donnée [16]. L'humidité élevée dans les régions chaudes est un problème majeur car elle empêchera la peau de transpirer afin d'être refroidi. Son impact est très lié à la température actuelle de l'air dans l'environnement ainsi qu'à la vitesse de l'air qui permet à la peau de perdre de la chaleur. L'ASHRAE a souligné qu'il n'y a pas d'humidité inférieure établie pour le confort thermique [17]. Cependant, L'ISO 7730 indique une plage d'humidité approuvée (Figure I.5). À une température modérée avec une activité modérée, une humidité élevée ou même modérée peut entraîner une gêne pour les occupants. De plus, la même norme a ajouté la sensation thermique, l'humidité, la sécheresse cutanée et l'irritation des yeux à la liste des paramètres affectant la transpiration.

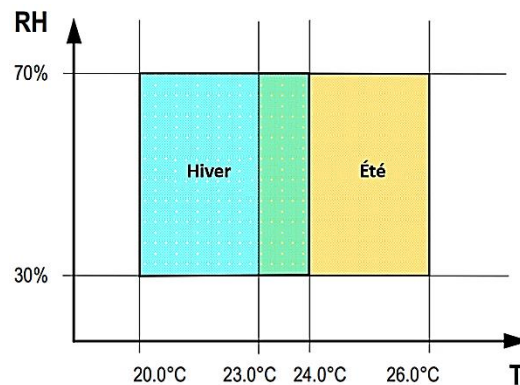


Figure I.5 Diagramme RH/T montrant la zone de confort selon ISO 7730 [16].

I.3.4 Vitesse de l'air : C'est la vitesse de circulation de l'air à travers l'être humain qui influence l'échange de chaleur par convection entre une personne et l'environnement ISO-7730 (2005). Elle peut entraîner le refroidissement ou le chauffage de l'espace en fonction des conditions intérieures données telles que la température et l'humidité relative. Ces deux derniers facteurs ainsi que la vitesse de l'air ont le plus d'effet sur le confort thermique humain à l'intérieur [18]. En ce qui concerne la limite de la vitesse de l'air intérieur, la valeur la plus élevée suggérée par l'ASHRAE peut atteindre 0,2 m/s. Par contre, la norme ISO 7730 a pris en compte le fait qu'il n'y a pas de vitesse d'air minimale fixe à l'intérieur, car elle dépendra fortement des autres variables, de sorte que la vitesse de l'air pourrait parfois très faible ou nulle et que les occupants soient satisfaits. Dans les conditions quotidiennes, les réactions subjectives moyennes à diverses vitesses d'air sont résumées dans le tableau I.2 suivant :

Tableau I.2 Les sensations du corps humain vers différentes vitesses de l'air.

Vitesse de l'air (m/s)	Sensation
< 0,25	Inaperçu
0,25 – 0,50	Agréable
0,50 – 1,00	Conscience du mouvement de l'air
1,00 – 1,5	Bruyant
> 1,50	Affreusement bruyant

I.3.5 L'activité : C'est la chaleur que nous produisons à l'intérieur de notre corps lorsque nous pratiquons une activité physique [19]. Plus nous sommes actifs, plus nous produisons de chaleur. L'activité est l'un des principaux facteurs qui affectent le confort thermique. En effet, Il existe de nombreux types de bâtiments, chacun possède son propre objectif et son niveau d'activité requis, ce qui entraînera des différences majeures de sensations thermiques. L'activité est liée au métabolisme mesuré en 'Met' (1 Met = 58,15 W/m² de surface corporelle). La surface

d'un adulte normal est de $1,7 \text{ m}^2$, avec un niveau d'activité de 1 Met il dégage une chaleur d'environ 100 W. Notre métabolisme est à son plus bas pendant que nous dormons (0,8 Met) et à son plus haut pendant les activités sportives (il peut atteindre 10 Met). La Figure I.6 montre quelques exemples de taux métaboliques pour différentes activités.

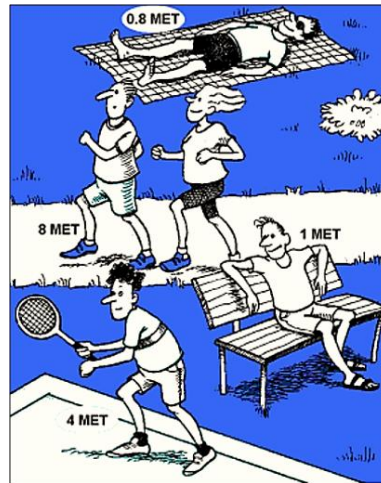


Figure I.6 Exemples de taux métaboliques pour différentes activités [19].

I.3.6 Les vêtements : Ils sont considérés comme isolants protégeant le corps humain de son entourage et assurant une résistance thermique entre le corps et l'environnement [20]. Les vêtements sont donc l'un des principaux facteurs affectant la dissipation thermique du corps humain qui doit être maintenu dans un état thermique acceptable dans le respect des différents climats. L'effet des vêtements est mesuré par une unité baptisée Clo. 1 Clo est la valeur isolante d'un costume avec des sous-vêtements en coton, cela correspond à une couverture isolante sur tout le corps d'une résistance de $0,155 \text{ m}^2\text{K/W}$. Par exemple, les shorts avec des chemises à manches courtes ont environ 0,25 Clo, un costume d'hiver épais avec un pardessus est autour de 2 Clo et les vêtements arctiques les plus lourdes possèdent 4,5 Clo. La Figure I.7 illustre quelques valeurs en 'Clo' de différents vêtements.

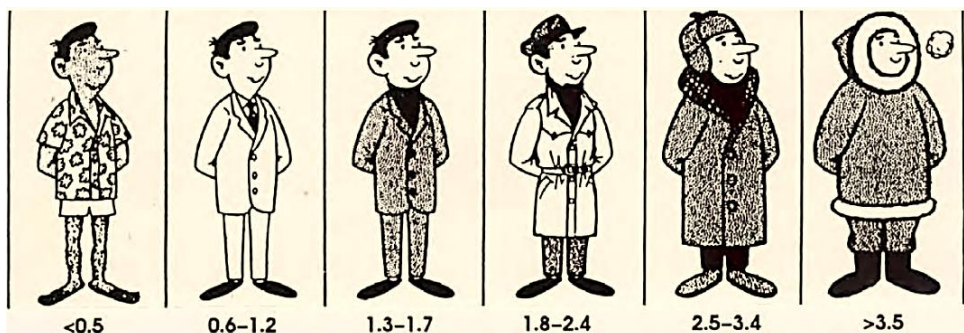


Figure I.7 Niveau d'isolation des vêtements selon l'unité Clo [20].

I.4 Approche d'architecture bioclimatique

La construction de bâtiments à l'aide d'une approche d'architecture bioclimatiques utilise des principes de conception spécifiques réduisant les besoins en énergie pour atteindre le confort thermique intérieur. L'aspect de l'environnement naturel impliqué dans la prise en compte de l'énergie ambiante et la conception des bâtiments peut être regroupé en catégories de mouvement de chaleur, de lumière, d'air et d'humidité. Dans les bâtiments, les installations de contrôle environnemental doivent être considérées par rapport aux conditions extérieures. La forme de base peut être régie par des considérations d'éclairage, de circulation d'air et de chauffage. Ainsi, les différents éléments du bâtiment directement exposés au soleil sont les murs, les portes, les fenêtres, les toits, etc. Les murs de façade sont l'un des éléments les plus importants pour le gain direct du bâtiment. Dans toute conception, les paramètres qui modifient considérablement la contribution bioclimatique à l'intérieur du bâtiment sont [21] :

- Type de surface et orientation de la façade.
- Zone surfacique des murs face au soleil.
- Rapport surface façade pour contrôler la quantité d'admission du rayonnement solaire incident à l'intérieur.
- Prévision de dispositifs d'ombrage fixes ou variables.

I.4.1 Relation entre le climat, le bâtiment et les occupants

Dans l'architecture sensible au climat, des stratégies sont adoptées pour répondre aux besoins des occupants, en tenant compte le rayonnement solaire local, la température, le vent et d'autres conditions climatiques. Différentes stratégies sont nécessaires pour les différentes saisons. Ces stratégies peuvent elles-mêmes être subdivisées en un certain nombre de concepts, qui représentent des actions [22].

La stratégie de chauffage comprend quatre concepts (Figure I.8) :

- Collection de la chaleur du soleil à travers l'enveloppe du bâtiment.
- Stockage de chaleur dans la masse des murs et des sols.
- Distribution de la chaleur collectée aux différents espaces nécessitant un chauffage.
- Conservation de la chaleur à l'intérieur du bâtiment.

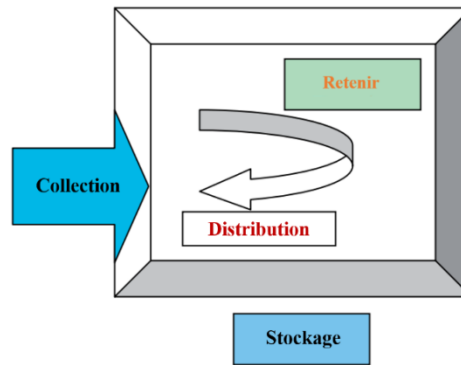


Figure I.8 La stratégie de chauffage.

La stratégie de refroidissement comprend cinq concepts (Figure I.9) :

- Contrôle solaire : protection du bâtiment contre le rayonnement solaire direct.
- Ventilation : expulsion et remplacement de l'air chaud indésirable.
- Minimisation des gains internes : réduction de la chaleur des occupants, des équipements et de l'éclairage artificiel.
- Protection contre la chaleur indésirable par infiltration ou conduction à travers l'enveloppe (climats chauds).
- Refroidissement naturel : améliorer la ventilation naturelle en agissant sur l'air extérieur (climats chauds).

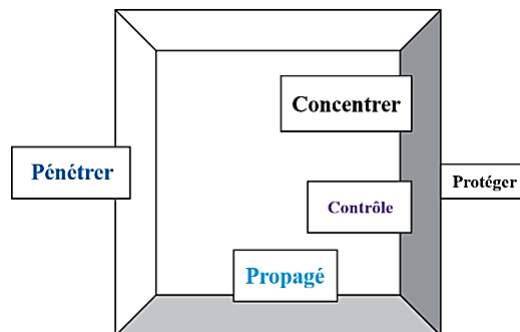


Figure I.9 Stratégie de refroidissement.

La stratégie d'éclairage naturel comprend quatre concepts (Figure I.10) :

- Pénétration : collecte de lumière naturelle à l'intérieur du bâtiment ;
- Distribution : diffusion homogène de la lumière dans les espaces ou concentration ;
- Protéger : réduire par des dispositifs d'ombrage externes la pénétration des rayons du soleil dans le bâtiment ;
- Contrôle : contrôle la pénétration de la lumière par des rideaux mobiles pour éviter l'inconfort.

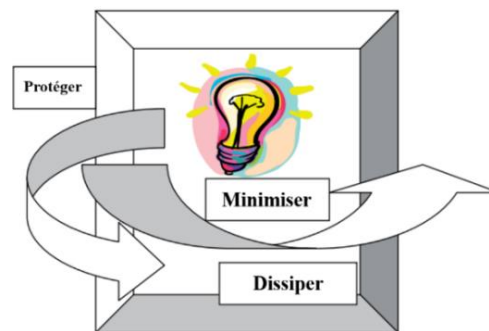


Figure I.10 Stratégie d'éclairage naturel.

I.4.2 Zones de confort et de confort autorisées

La zone de confort présente les conditions idéales pour le corps humain, elle est confortable pour 70% de la population [23]. Elle représente la zone dans laquelle le corps humain, avec des vêtements légers et peu d'activité, ne nécessite pas de dépenses énergétiques pour rester à l'aise. Cette zone est limitée par des valeurs de température comprises entre 21°C et 26°C et des valeurs d'humidité relative comprises entre 20 % et 70 %. Aucune stratégie n'est à mettre en œuvre dans cette zone.

La zone de confort autorisée est une zone de confort plus large dans laquelle une personne peut s'adapter avec une dépense minimum acceptable. Cette zone est confortable pour 80 % de la population [23]. Les conditions de températures et d'humidité sont également acceptables pour certains corps humains en fonction du sexe, du métabolisme interne, de la taille et des performances d'activité. Cette zone est limitée par des valeurs de température comprises entre 20 °C et 27 °C et des valeurs d'humidité relative entre 20% et 80%.

I.5 Chauffage solaire passif

Le chauffage solaire passif est basé sur le principe de l'utilisation d'une partie de l'énergie solaire pour le chauffage grâce à l'orientation et la conception de la maison. Cette énergie est appelée passive, car elle ne nécessite pas la mise en place d'installation de traitement de l'énergie pour chauffer un logement [24]. Dans ce type de chauffage le bâtiment, configuré afin de bénéficier au mieux des rayons du soleil, se réchauffe, via les vitres, les planchers, les murs, et apporte un confort agréable [25]. Un bâtiment passif est une construction où les déperditions de chaleur ont été réduites au minimum grâce à une meilleure isolation, des vitrages performants et une ventilation efficace. La conception du bâtiment favorise l'accumulation du rayonnement solaire et distribue ensuite cette énergie à d'autres dépendances ou la restitue au bâtiment au fil du temps [26].

Le stockage d'énergie dans les murs, les plafonds et les planchers des bâtiments peut être amélioré en encapsulant des matériaux à changement de phase (PCM) [27]. Ceci permet de capter directement l'énergie solaire et augmenter le confort humain en diminuant la fréquence des changements de température de l'air interne et en maintenant une température plus proche de la température désirée pendant une période de temps plus longue [28].

Le mur stockeur ou mur à inertie thermique ou encore mur Trombe est une technique largement utilisée dans le chauffage passif des maisons. Il s'agit d'un mur massif recouvert d'un vitrage extérieur avec un canal d'air entre les couches (Figure I.11). Ce mur absorbe et stocke l'énergie solaire à travers le vitrage. Une partie de cette énergie est transférée à travers le mur dans la zone intérieure de la maison par conduction. Pendant ce temps, l'air compris entre le canal d'air est le mur s'échauffe et s'écoule à l'intérieur de la maison par convection.

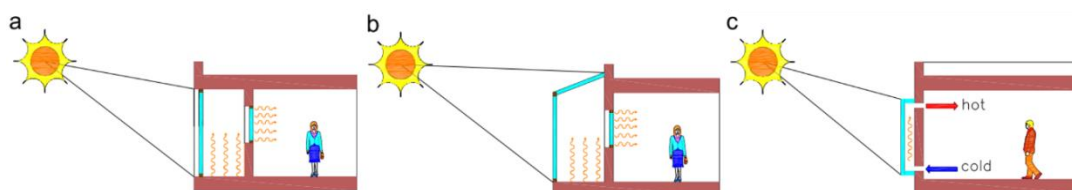


Figure I.11 a- Galerie vitrée, b- Serre attenante, c- Mur Trombe.

Les ouvertures de toit sont d'autres éléments qui permettent l'entrée du rayonnement solaire pour faciliter l'accumulation de l'énergie thermique (Figure I.12). Dans ces systèmes, les espaces de vie sont favorisés par la chaleur apportée par le rayonnement solaire, qui s'accumule dans le patio. Pendant les mois les plus chauds, ces ouvertures doivent être couvertes pour éviter un rayonnement excessif [29].

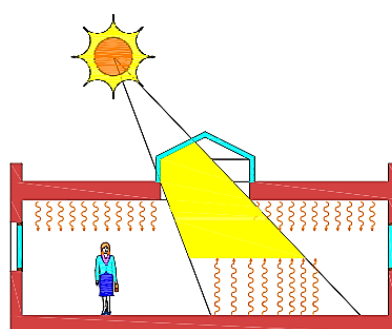


Figure I.12 Représentation des ouvertures de toit pour un chauffage solaire passif.

I.5.1 Classification des systèmes solaires passifs

Les conditions de confort thermique à l'intérieur des pièces chauffées dépendent de l'évolution des conditions climatiques, de l'architecture du bâtiment, des matériaux utilisés et des installations thermiques. Les systèmes individuels sont liés aux composants d'un bâtiment

qui agissent comme des récepteurs d'énergie solaire. Ces systèmes comprennent également d'autres éléments d'un bâtiment qui jouent le rôle de stockage et distribution de l'énergie collectée. Dans ce contexte, les systèmes solaires passifs sont divisés en systèmes avec gains directs et indirects.

a- Système solaire passif direct : Un système à gain solaire passif direct utilise l'énergie solaire qui entre directement dans les pièces. Ce type de système est la solution la moins chère et la plus simple. En termes pratiques, toute pièce dotée d'une fenêtre est un simple système solaire passif qui utilise l'énergie solaire de manière directe mais incontrôlée. Le rayonnement solaire passant à travers le vitrage est absorbé par les surfaces des murs internes et des équipements présents dans la chambre [30]. Ce qui fait augmenter l'énergie interne de ces derniers. Cette énergie sera convertie en chaleur et augmente, par conséquent, la température de l'air dans la chambre (Figure I.13). La chaleur emmagasinée dans les murs affecte le confort thermique à l'intérieur de la chambre. L'inconvénient majeur d'un système solaire passif à gain direct est la forte variation de la température intérieure, souvent plus grande que ce qui est normalement toléré par les humains.

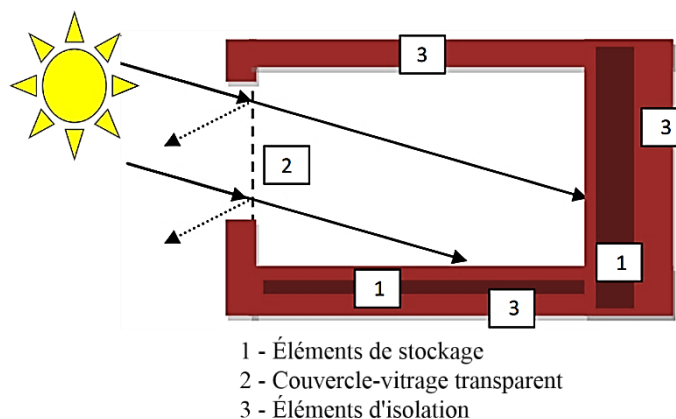


Figure I.13 Système à gain solaire passive direct.

b- Système solaire passif indirect : Un système à gain solaire passif indirect comprend un mur massif capteur-stockeur sous forme d'une structure pleine. Ce système peut être sous forme de structure à mur Trombe (Figure I.14) ou structure ventilée (Figure I.15). Cette dernière solution peut être soit équipée d'ouvertures de circulation au-dessus du sol et sous le plafond, soit d'un système de conduits d'air internes. De l'extérieur, un tel mur est protégé par un vitrage et peint en noir pour augmenter l'absorption du rayonnement solaire [31].

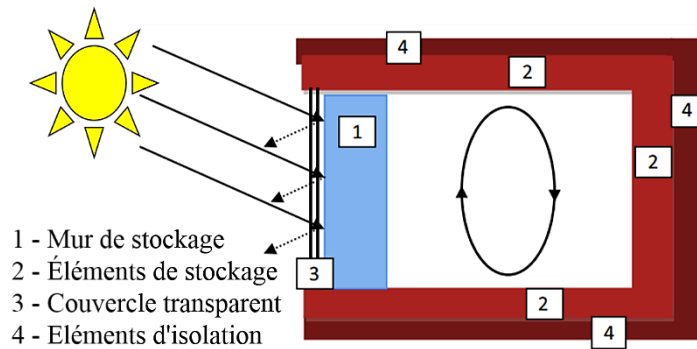


Figure I.14 Système passive à gain solaire indirect : mur massif capteur-stockeur.

L'énergie solaire collectée, après avoir traversé un couvercle transparent, est absorbé par la surface du mur, où se produit une conversion thermique. La chaleur générée est transférée dans les pièces grâce à la conduction à travers le mur puis par transfert de chaleur convectif et radiatif vers l'intérieur. Le transfert de chaleur dans les sections inférieure et supérieure de la paroi peut être intensifié par des ouvertures à travers lesquelles l'air circule.

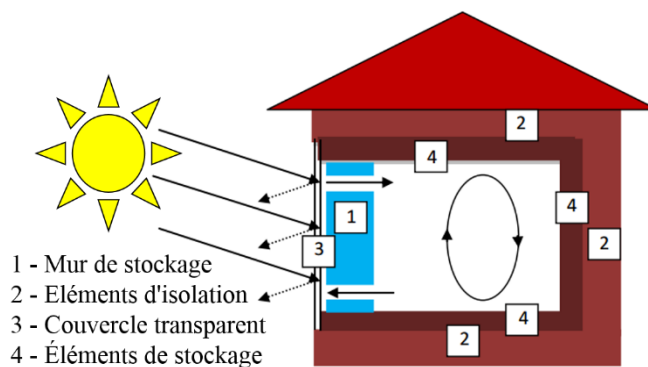


Figure I.15 Système passif à gain solaire indirect : mur à structure ventilée.

Une variation réduite de température intérieure est le principal avantage d'un système à gain solaire indirect. La conduction de chaleur à travers un mur de stockage est un processus relativement lent, de sorte que les gains quotidiens du rayonnement solaire sont transférés dans la pièce pendant la nuit.

I.5.2 Critères de conception des bâtiments bioclimatiques

Il est évident que le succès de l'utilisation du rayonnement solaire dépend de la taille et de l'orientation des façades ainsi que des matériaux de construction de la maison. Le gain de chaleur est également fonction de la surface de l'enveloppe du bâtiment exposé à la lumière du soleil et à son tour, cette zone dépend du rapport hauteur/largeur du bâtiment. En effet, il s'agit de tirer parti du rayonnement solaire par une architecture adaptée, permettant de limiter les

besoins d'éclairage et de chauffage, tout en contribuant à la production du confort d'été. Les règles de conception conduisant à une architecture bioclimatique sont simples :

- Grandes surfaces vitrées au sud et petites ouvertures au nord,
- Absence d'ombrage sur les surfaces vitrées et occultations automatiques pour éviter les surchauffes d'été,
- Isolation extérieure pour bénéficier de l'inertie thermique des murs et planchers et assurer le stockage thermique pour la nuit (chaleur en hiver, fraîcheur en été).

Il convient également de faciliter les opérations de contrôle des dispositifs de protection des vitrages et de gestion de la ventilation naturelle, notamment en été. Une étape importante est franchie en Europe, sur la base du label « Habitat passif » élaboré en Allemagne : le niveau d'isolation de l'enveloppe doit permettre d'équilibrer les déperditions thermiques au travers de l'enveloppe par les apports gratuits (solaire et internes). Cela conduit à des demandes de chauffage de l'ordre de 15 kWh/m²/an, en énergie utile. En complément, les autres postes de consommations énergétiques (eau chaude sanitaire, éclairage, ventilation, équipements électro ménagers) sont limités à 27 kWh/m²/an, en énergie finale.

I.5.3 Exploitation et gestion des environnements solaires passifs

Les mesures à prendre lors de l'exploitation et de la conception solaire passive peuvent être subdivisé en trois types d'environnement de base :

1. Les mesures de conception qui peuvent améliorer les conditions environnementales dans les 'zones extérieures', grâce à la mise à disposition de puits de lumière, de brise-vent et de zones protégées micro climatiquement.
2. Les mesures de conception concernant la fourniture de 'zones intermédiaires' fermées telles que des espaces solaires, des vérandas, des rues vitrées et des cours couvertes.
3. Les mesures de conception solaire passive relatives aux 'zones internes' d'un bâtiment.

Ces mesures visent à réduire la dépendance énergétique dans les zones d'un bâtiment occupées tout au long de l'année et peuvent se traduire par une amélioration de la qualité de l'environnement dans son ensemble. Les occupants peuvent avoir un impact sur la performance énergétique grâce à leurs actions dans chacun ou dans l'ensemble des cinq domaines illustrés dans la Figure I.16. Ceci en tenant compte des variations (saisonniers, journalières et horaires) de la disponibilité de l'énergie solaire, de sa régulation et de sa distribution. D'autres fonctions de gestion des installations peuvent également avoir des implications énergétiques majeures, en particulier la maintenance, le nettoyage, le remplacement, la rénovation et l'adaptation.

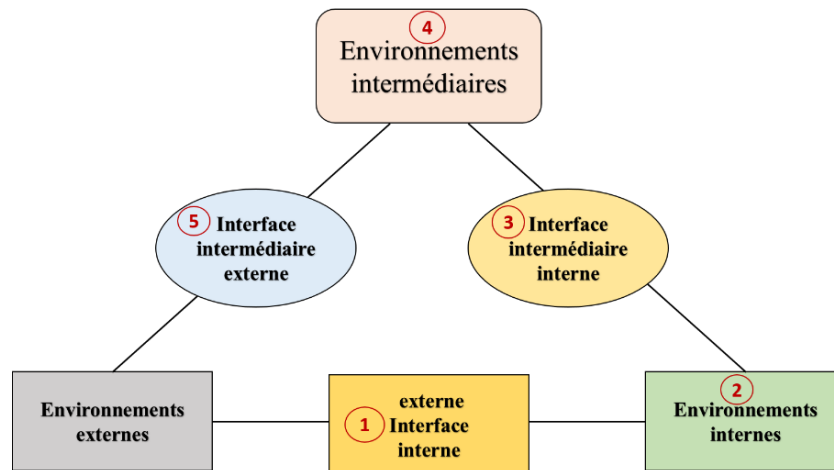


Figure I.16 Domaines d'impact des utilisateurs.

Les avantages des environnements solaires passifs comprennent :

- La réduction de la consommation d'énergie non renouvelable et des émissions de CO₂.
- L'économie sur le coût de l'énergie.
- Les commodités et les avantages sociaux pour les occupants.
- Les avantages de l'environnement naturel pour les utilisateurs individuels.
- Le confort humain, le bien-être et les performances améliorés.

Les risques potentiels associés aux environnements solaires passifs comprennent :

- L'augmentation de la consommation d'énergie en raison d'une utilisation inappropriée.
- La surchauffe saisonnière.
- Les fluctuations de température inacceptables.
- La mauvaise qualité de l'air et la condensation.
- La variation d'éclairage et l'éblouissement inacceptables.
- La fatigue thermique et fracture des matériaux.

I.6 Conclusion

L'architecture bioclimatique est une stratégie passive qui doit être adaptée à l'habitation, à son site et à son environnement. Les stratégies et techniques d'une approche bioclimatique répondent aux mêmes enjeux que toute conception écologique d'un bâtiment : l'efficacité énergétique, le confort thermique et la santé des occupants, l'utilisation de matériaux locaux et biosourcés, la réduction de la consommation des ressources non renouvelables, la gestion des déchets, la diminution des émissions de gaz à effet de serre, etc... Cependant, cette architecture propose généralement des solutions simples sans avoir recours à des technologies performantes. L'objectif de la conception bioclimatique est de prendre en considération les avantages et les

contraintes environnementales du bâti pour que le logement soit le plus économique possible, en matière d'éclairage, de chauffage et de climatisation.

L'architecture passive peut arriver à une consommation d'énergie nette presque nulle, c'est-à-dire un habitat dont la consommation énergétique est entièrement compensée par les apports solaires ou même par les calories émises par les habitants.

Références bibliographiques

- [1] Hensen JLM. On the thermal interaction of building structure and heating and ventilating system. PhD thesis, Technische Universiteit Eindhoven, 1991.
- [2] ANSI/ASHRAE Standard 55. Thermal Environment Conditions for Human Occupancy, 2004.
- [3] Lin Z, Deng S. A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics—developing a thermal comfort model for sleeping environments. *Building and Environment*, 2008, 43:70–80.
- [4] Ricardo R, Natalia V, Roberto L. A review human thermal comfort in the built environment. *Energy and Buildings*, 2015, 105:178-205.
- [5] Frota AB, Schiffer SR, Manual de Conforto Térmico. 2nd edition Studio Nobel, São Paulo, 1995.
- [6] Memon RA, Chirarattananon S, Vangtook P. Thermal comfort assessment and application of radiant cooling: A case study. *Building and environment*, 2008, 43:1185-1196.
- [7] Nicol J F. Thermal comfort – a handbook for field studies toward an adaptive model. University of East London, 1993.
- [8] Raw GJ, Oseland NA. Why another thermal comfort conference? In: *Thermal comfort: past, present and future*. The Building Research Establishment: Garston, 1994, 1–10.
- [9] Backer R, Paciuk M. Thermal comfort in residential buildings-failure to predict by standard model. *Building and Environment*, 2009, 44:948-960.
- [10] Homod R, Sahari K, Almurib H, Nagi F. RLF and TS fuzzy model identification of indoor thermal comfort based on OMV/PPD. *Building and Environment*, 2012, 49:141-153.
- [11] Jang MS, Kol CD, Moon IS. Review of thermal comfort design based on PMV/PPD in cabins of Korean maritime patrol vessels. *Building and Environment*, 2007, 42:55-61.
- [12] Metje N, Sterling M, Baker C. Pedestrian comfort using clothing values and body temperatures. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96:412-435.
- [13] Hoof J V, Hensen JLM. Quantifying the relevance of adaptive thermal comfort models in moderate thermal climate zones. *Building and Environment*, 2007, 42:156-170.
- [14] Wang Z, Zhang L, He Y. Thermal comfort for naturally ventilated residential buildings in Harbin. *Energy and Buildings*, 2010, 42:2406-2415.
- [15] Atmaca I, Kaynkli O, Yigit A. Effects of radiant temperature on thermal comfort. *Building and Environment*, 2007, 42:3210-3220.
- [16] Liu Y, Haiyan Y, Joseph L. Thermal comfort and building energy consumption implications-a review. *Applied Energy*, 2014, 115:164-173.
- [17] ASHRAE-55. Thermal environment conditions for human occupancy. ASHRAE, 2004.
- [18] Hall R. *Materials for Energy Efficiency and Thermal Comfort in Buildings*. CRC, UK, 2010.
- [19] Mustapa MS, Zaki SA, Rijal HB, Hagishima A, Ali MSM. Thermal comfort and occupant adaptive behaviour in Japanese university buildings with free running and cooling mode offices during summer. *Building and Environment*, 2016, 105:332-342.
- [20] Oliveira A, Gaspar A, Quintela D. Dynamic clothing insulation. Measurements with a thermal manikin operating under the thermal comfort regulation mode. *Applied Ergonomics*, 2011, 1-10.
- [21] Morillón-Gálvez D, Saldaña-Flores R, Tejeda-Martínez A. Human bioclimatic atlas for Mexico. *Solar Energy*, 2004, 76(6):781–92.

- [22] Rupp RF, Ghisi E. What is the most adequate method to assess thermal comfort in hybrid commercial buildings located in hot-humid summer climate? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 29(0):449–62.
- [23] Villermay D. Renaissance of bioclimatic architecture. *Revue de l'infirmière. Informations*, 1980, (4):16.
- [24] Chan H-Y, Riffat SB, Zhu J. Review of passive solar heating and cooling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(2):781–9.
- [25] Butti K, Perlin J. *A golden thread: 2500 years of solar architecture and technology*. New York: Cheshire Books, 1980.
- [26] Badescu V, Staicovici M D. Renewable energy for passive house heating: model of the active solar heating system. *Energy and Buildings*, 2006, 38(2):129–41.
- [27] González F, Román C A, García EH, Frutos CB. Phase change materials (pcms) for energy storage in architecture, use with the magic box prototype. *Materiales de Construcción*, 2008, 58(291):119–26.
- [28] Khudhair A M, Farid M M. A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials. *Energy conversion and management*, 2004, 45(2):263–75.
- [29] Mazria E. *The Passive Solar Energy Book*. Emmaus, PA: Rodale Press, 1979.
- [30] ASHRAE. *Energy efficient design of new building except new low-rise residential buildings. BSRIASHRAE proposed standards 90-2P-1993, alternative GA*. USA: American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, 1993.
- [31] Bahadori M. A passive cooling/heating system for hot arid regions. In: *Proceedings of the American Solar Energy Society Conference*, Cambridge. Massachusetts, 1988, p. 364–7.

Chapitre II

Systeme de chauffage passif à mur Trombe

Le système de chauffage à mur Trombe peut être utilisé pour chauffer un habitat le jour et la nuit également si la chaleur est disponible en excès. L'excès de chaleur peut également être utilisé pour chauffer de l'eau pour des applications domestiques. En été, la chaleur excédentaire peut ventiler passivement l'habitat et être extraite du bâtiment. Par conséquent, cela aide à réduire la charge de refroidissement pendant la saison estivale. Ce chapitre présente une analyse de la faisabilité des systèmes à mur Trombe, et leurs nombreux avantages. Les différents modèles du mur Trombe ainsi que les effets des divers paramètres influençant les processus de transfert de chaleur sont également exposés.

II.1 Introduction

Le système de chauffage solaire passif à mur Trombe permet la réduction de la demande annuelle de chauffage et de refroidissement des bâtiments afin de respecter la norme de la maison passive [1]. Selon l'Institut de 'Maison Passive', pour qu'un bâtiment soit considéré comme passif, la demande en énergie pour le chauffage des espaces ne doit pas dépasser 15 KWh par mètre carré et par an [2]. Parmi les systèmes solaires passifs développés pour utiliser l'énergie solaire, on peut citer les cheminées solaires [3], les toits solaires [4], etc... Le système à mur Trombe se distingue par son rendement de chauffage élevé [5].

Parallèlement à la croissance démographique mondiale, la consommation d'énergie et les problèmes environnementaux sont aujourd'hui une préoccupation croissante. Selon le conseil mondial de l'énergie, la demande d'énergie primaire doublera d'ici 2050 [6]. Le secteur du bâtiment représente la majorité de la consommation d'énergie dans le monde et la majeure partie de l'énergie est utilisée pour les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation [7]. Pour cela, l'intégration des systèmes solaires passifs dans le bâtiment est une stratégie de développement durable et de plus en plus encouragée par les réglementations internationales. Les techniques solaires passives peuvent réduire la demande annuelle de chauffage jusqu'à 25 % [8].

Le mur Trombe, connu sous le nom de mur de stockage ou mur de chauffage solaire est largement utilisé dans les maisons passives en raison de plusieurs avantages tels que sa simple configuration, sa haute efficacité, son faible coût de fonctionnement, etc. [9,10]. En plus d'être respectueux de l'environnement, l'utilisation de ces systèmes reçoit une attention considérable en raison de leur capacité à faire face aux crises environnementale et énergétique [11,12]. En effet, le mur Trombe dans un bâtiment peut réduire la consommation d'énergie d'un bâtiment jusqu'à 30 % [13].

À l'heure de la transition énergétique, la maison solaire passive est certainement le futur standard de la construction. Au cœur de cette dernière, le mur Trombe pourrait jouer un rôle majeur grâce à sa capacité à capter la chaleur du soleil et à la restituer de manière uniforme à l'intérieur de la maison [14]. Il est donc important de connaître le fonctionnement du mur Trombe et de savoir s'il peut être adapté aux différents types de constructions.

Ce chapitre passe en revue le contenu le plus pertinent des études sur les systèmes à mur Trombe et différents indicateurs d'évaluation ont été résumés sur les murs Trombe sous trois angles : énergétique, environnemental et économique menés durant une décennie et demie.

II.2 Composition et fonctionnement du mur Trombe

Le concept de mur Trombe a été breveté par E.S. Morse au 19^{ème} siècle et développé et popularisé en 1957 par *Félix Trombe* et *Jacques Michel*. En 1967, à Odeillo, en France, ils ont construit la première maison en utilisant un mur de Trombe [15]. Il est particulièrement adapté aux constructions bioclimatiques dont le but est de limiter les besoins en chauffage et d'utiliser de manière optimale les ressources énergétiques provenant du climat. Le mur Trombe se compose d'une partie en béton devant laquelle on dispose un vitrage en laissant une lame d'air. Il possède des ouvertures en haut et en bas pour faire circuler l'air. Les rayons solaires traversent la vitre afin d'être absorbés par le mur, peint dans une couleur sombre pour une meilleure absorption.

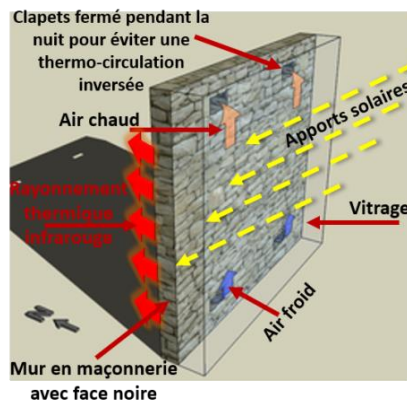


Figure II.1 Structure et composition du mur Trombe.

Sous l'effet du rayonnement solaire, le mur se réchauffe et émet un rayonnement infrarouge ne pouvant traverser le vitrage. La chaleur est, donc, piégée entre le mur et la vitre (effet de serre). On utilise le mur différemment selon les saisons et la période de la journée :

- *La nuit* : l'ouverture supérieure est fermée afin d'éviter que de l'air intérieur chaud vienne se refroidir dans la lame d'air pour retourner ensuite dans le domicile.
- *Durant les mois d'hiver* : l'air froid rentre dans le mur par les ouvertures du bas, grâce à un mouvement de convection. Il se réchauffe, monte puis retourne dans la maison via les ouvertures supérieures.
- *Pendant les périodes chaudes* : pour que le logement ne soit pas en surchauffe, l'air chaud est évacué la nuit en ouvrant le clapet supérieur tout en fermant celui inférieur.

Les systèmes passifs à mur Trombe mettent en jeu un phénomène de convection naturelle qui peut être regroupé en quatre catégories. L'écoulement de l'air se fait entre deux ouvertures basses et hautes qui peuvent se faire vers l'intérieur (c'est-à-dire vers le bâtiment) ou vers l'extérieur définissant ainsi quatre cas. In-In, In-Out, Out-In, et Out-Out représentés

sur la Figure II.2. In correspond à une connexion avec le bâtiment, et Out avec l'extérieur. Nous présentons ici ces configurations de manière simple dans le cas d'un apport solaire dans la lame d'air [16].

- ❖ **In-In** : l'air chauffé dans la lame d'air, entraîne un mouvement de convection, depuis le bas vers le haut. L'air neuf qui provient du bâtiment, entre en partie basse de la cavité, il est chauffé par convection avec les parois de la cavité, et en ressort vers le bâtiment. L'énergie récupérée par le passage, permet le chauffage passif du bâtiment. Il n'y a pas de renouvellement d'air pour le bâtiment.
- ❖ **Out-In** : De la même manière, l'air chauffé dans la cavité entraîne un écoulement ascendant. L'air neuf, provient de l'extérieur, et est chauffé dans la lame d'air. Il est alors aspiré vers l'intérieur du bâtiment. Il y a donc renouvellement d'air du bâtiment, avec de l'air qui est préchauffé par son passage dans la lame d'air.

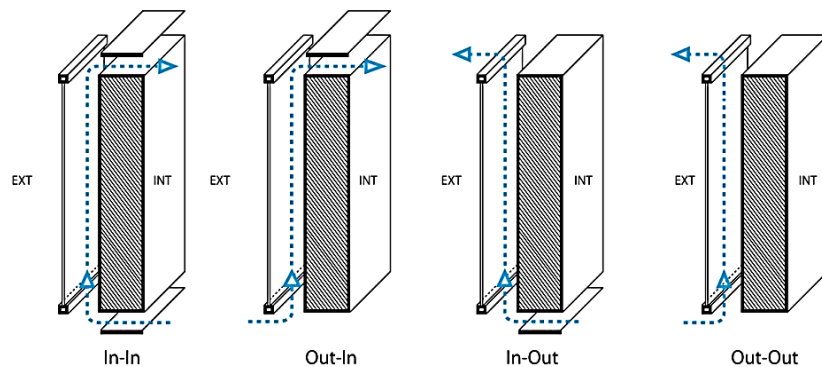


Figure II.2 Illustration des quatre configurations de fonctionnement des murs Trombe [16].

- ❖ **In-Out** : Dans ce cas, l'air chauffé dans la lame d'air entraîne un écoulement de l'intérieur vers l'extérieur. L'air du bâtiment, entre en partie basse et est évacué vers l'extérieur en partie haute. Complété par une autre entrée d'air pour le bâtiment, ce système permet le renouvellement d'air passif du bâtiment, c'est-à-dire de la ventilation naturelle.
- ❖ **Out-Out** : L'air extérieur entre en partie basse, s'échauffe dans la lame d'air et ressort vers l'extérieur. Le passage de l'air permet l'évacuation d'une partie de l'énergie solaire incidente, et limite ainsi les apports de chaleur vers le bâtiment.

II.3 Classification des systèmes à mur Trombe

Au fil du temps, des modifications ont été apportées au mur Trombe afin d'améliorer son efficacité. Sur la base des principales fonctions d'utilisation, les murs Trombe sont classés en deux types : chauffage et refroidissement. Sept configurations basées sur le chauffage et quatre configurations sur le refroidissement ont été élaborées (Figure II.3).

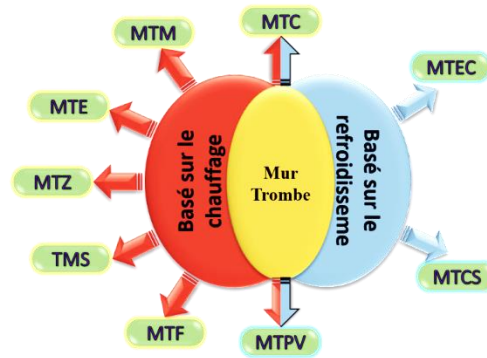


Figure II.3 Classification des murs Trombe.

II.3.1 Mur Trombe basé sur le chauffage

1- Mur Trombe Classique (MTC) : C'est une configuration simple, conçue pour accumuler la chaleur solaire et fournir le chauffage à l'espace intérieur [17-18]. La surface extérieure du mur est vitrée et colorée en noir pour augmenter le taux d'absorption du rayonnement solaire. Le mur Trombe classique capte le rayonnement solaire en exploitant l'effet de serre créé dans une cavité vitrée, la chaleur est ensuite absorbée et stockée à l'aide de l'inertie thermique du mur massif. Une partie de cette chaleur est transférée à l'intérieur du bâtiment à travers le mur par conduction, tandis qu'une autre partie est transférée par convection libre à travers l'ouverture en haut du mur. La Figure II.4 montre le mode de fonctionnement d'un mur Trombe classique pour le chauffage hivernal.

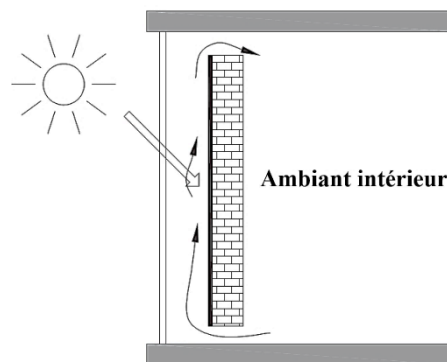


Figure II.4 Mur de Trombe classique pour le chauffage hivernal [19].

Cette configuration simple du mur Trombe souffre des inconvénients suivants [19] :

1. Faible résistance thermique pendant la nuit ou pendant les périodes nuageuses prolongées.
Une partie de la chaleur est transférée de l'intérieur vers l'extérieur, ce qui entraîne une perte de chaleur excessive du bâtiment.
2. Phénomène thermique inverses lorsque le mur de stockage est plus froid que l'air dans le canal.

3. Faible aspect esthétique pour les façades résidentielles.

2- Mur Trombe composite ou Mur Trombe-Michel (MTM) : Cette configuration est utilisée pour augmenter la résistance thermique du mur Trombe classique [20,21]. Il se compose d'un revêtement extérieur transparent, une couche d'air fermée, une paroi de stockage, une couche d'air ventilé et enfin une couche d'isolation thermique (Figure II.5). La première couche, transparente, répartit la majorité des apports solaires gagnés. Le mur de stockage absorbe une partie de l'énergie solaire et se réchauffe par effet de serre. La chaleur est transférée vers l'intérieure par convection en utilisant le phénomène de thermo-circulation de l'air entre la paroi massive et la paroi isolante. De plus, une petite partie de l'énergie est transmise par conduction du mur massif vers l'intérieure.

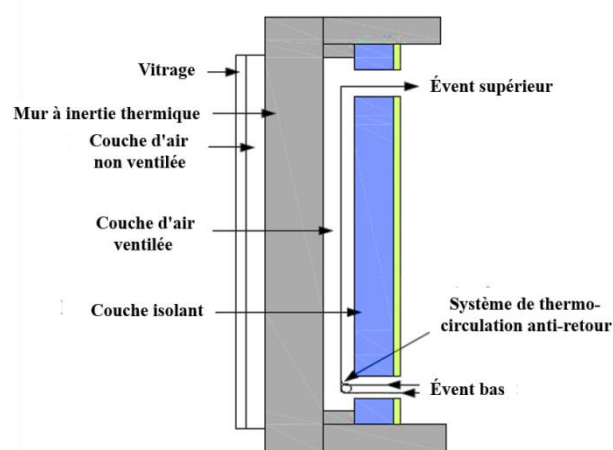


Figure II.5 Mur Trombe composite ou Mur Trombe-Michel [20].

En raison de la plus grande résistance thermique de cette conception (l'existence de la couche d'isolation et des couches d'air), seulement une faible quantité de chaleur peut être transférée de l'intérieur vers l'extérieur. En outre, les utilisateurs peuvent contrôler la vitesse de chauffage à tout moment en ajustant la circulation de l'air.

3- Mur Trombe d'Eau (MTE) : Une autre approche permettant de réduire les pertes de chaleur du mur Trombe classique consiste à utiliser de l'eau pour le stockage de la chaleur au lieu des matériaux de construction (Figure II.6) [22,23]. La chaleur spécifique de l'eau étant supérieure à celle des matériaux de construction, la température de surface de l'eau ne monte pas aussi haut que celle de la maçonnerie. Par conséquent, moins de chaleur est réfléchié par le vitrage. Cependant, contenir l'eau est beaucoup plus difficile que de contenir des matériaux solides, ce qui limite la propagation de chaleur.

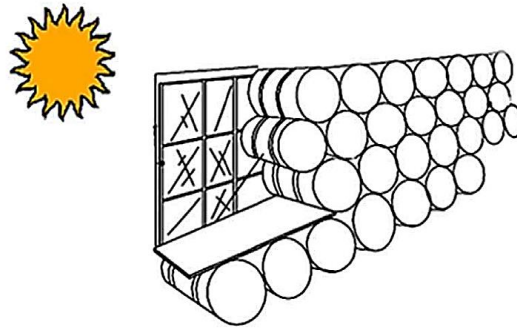


Figure II.6 Croquis du Mur Trombe d'Eau [23].

4- Mur Trombe en Zigzag (MTZ) : Il est conçu pour réduire le gain de chaleur excessif et également l'éblouissement des journées ensoleillées [24]. Comme le montre la Figure II.7, le mur se compose de trois sections : Une section orientée vers le sud-est, alors que les deux autres sections sont inclinées vers l'intérieur formant une paroi en forme de (V). La section qui fait face au sud-est à une fenêtre qui fournit de la chaleur et de la lumière dans le froid du matin lorsqu'un chauffage immédiat est requis. En face de la face en (V) se trouve un mur Trombe classique qui stocke la chaleur pour la restituer dans les heures froides de la nuit.

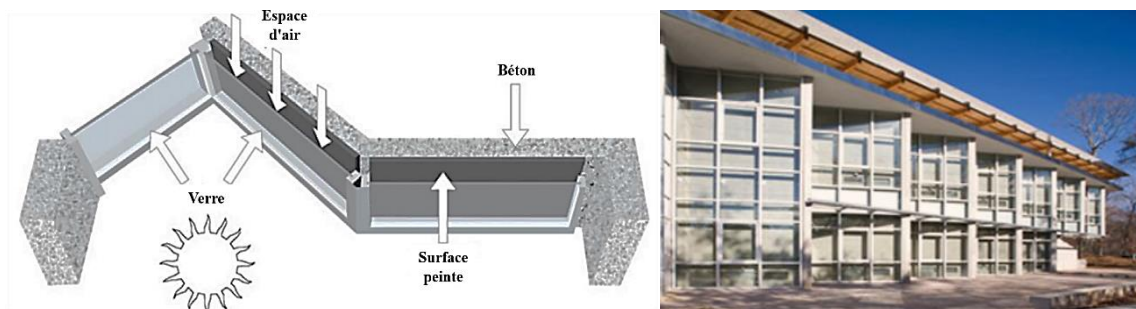


Figure II.7 Mur Trombe en zigzag [24].

5- Trans-Mur Solaire (TMS) : Il s'agit d'un mur modulaire transparent qui assure à la fois le chauffage et l'éclairage de l'habitation (Figure II.8). Ces murs sont constitués d'eau enfermée entre deux vitres parallèles supportées par un cadre métallique [25]. Une plaque absorbante semi-transparente est positionnée entre les vitres parallèles. Le rayonnement solaire incident est partiellement absorbé par l'eau et la plaque de verre semi-transparente, le reste du rayonnement transmis provoque à la fois le chauffage et l'éclairage qui sont requis par l'espace intérieur. Ce type de mur utilise les systèmes de gain direct et indirect et convient aux endroits où la température quotidienne est élevée [26]. Son inconvénient majeur est l'existence d'un transfert de chaleur convectif dans le trans-mur.

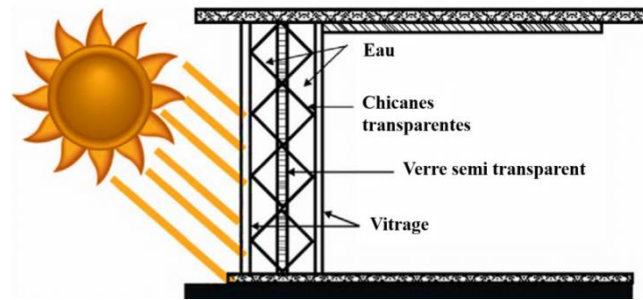


Figure II.8 Coupe transversale du système Trans-Mur Solaire [26].

6- Mur Trombe Fluidisé (MTF) : Dans cette configuration, l'espace entre le mur Trombe et le couvercle en verre est rempli de particules fluidisées absorbantes à faible densité [27]. L'énergie solaire gagnée par ces particules hautement absorbantes est transférée à l'intérieur par l'air qui circule à l'aide d'un ventilateur (Figure II.9). Deux filtres en haut et en bas du canal d'air empêchent les particules fluidisées de pénétrer dans l'espace intérieur [28]. Les murs Trombe fluidisés sont beaucoup plus efficaces que les parois de Trombe classiques car l'air (fluide caloporteur) est en contact direct avec les particules fluidisées.

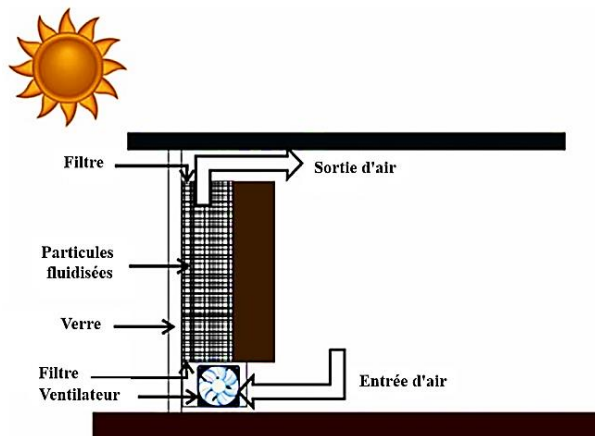


Figure II.9 Coupe transversale du système Mur Trombe Fluidisé [28].

7- Mur Trombe Photovoltaïque (MTPV) : Ce type de mur est fabriqué en incorporant des cellules solaires avec un mur Trombe classique (Figure II.10 et II.11). Le mur Trombe Photovoltaïque fournit non seulement le chauffage des locaux, mais génère également de l'électricité grâce à la couverture PV sur le vitrage [29-31].



Figure II.10 Image d'un mur Trombe Photovoltaïque [30].

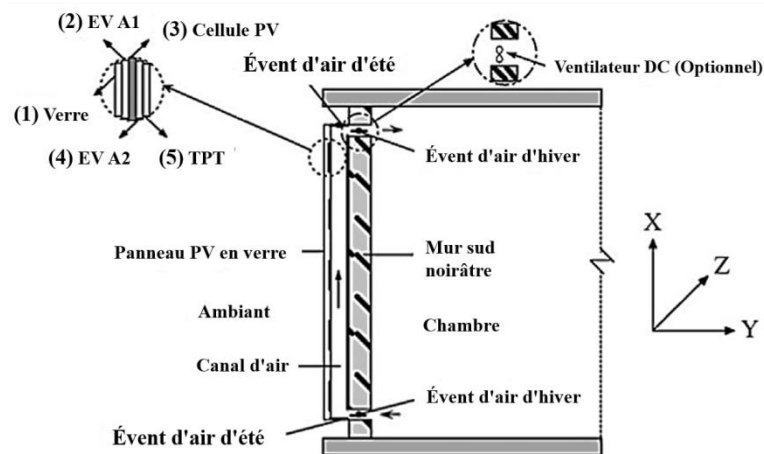


Figure II.11 Mur Trombe Photovoltaïque avec ventilateur pour le chauffage hivernal [31].

II.3.2 Mur Trombe basé sur le refroidissement :

Les Mur Trombe basé sur le refroidissement passif des bâtiments permettent [32] :

- 1- La réduction de l'apport de chaleur solaire et convective : orientation, ombrage par le bâtiment voisin, par la végétation, les surfaces réfléchissantes et abri contre les vents chauds.
- 2- La réduction de la transmission de chaleur : isolation thermique et cavités d'air.
- 3- L'augmentation des pertes de chaleur par rayonnement : surface agrandie et éléments mobiles.
- 4- L'augmentation des pertes de chaleur par convection : gestion du vent extérieur, ventilation naturelle intérieure et ventilation forcée intérieure.
- 5- Augmentation des pertes de chaleur par évaporation : refroidissement par air extérieur et intérieur, refroidissement de la surface du bâtiment.

1- Mur Trombe d'évaporation en céramique (MTEC) : Ce mur utilise des stores externes réfléchissant pour l'isolation thermique et pour éviter un gain solaire direct (Figure II.12). En particulier, l'élément céramique poreux rempli d'eau propre est utilisé dans la paroi intérieure. L'entrée d'air extérieur se fait par des fentes dans la partie inférieure de l'espace et la sortie se fait par la partie supérieure de celui-ci, vers l'intérieur de la maison. En été chaud, l'espace sert

de chambre de refroidissement pour baisser la température de l'air extérieur en raison du phénomène de refroidissement par évaporation directe [33].

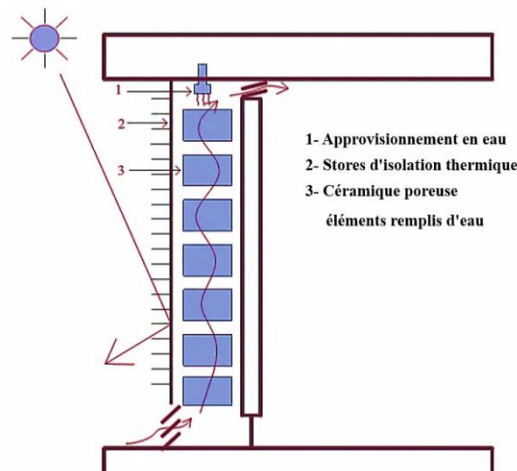


Figure II.12 Mur Trombe d'évaporation en céramique [33].

2- Mur Trombe Classique (MTC) : Ce mur est développé sur la base de la cheminée solaire. Pour un climat modéré, lorsque la température extérieure est inférieure à la température intérieure, il fonctionne en mode 'ventilation naturelle' (Figure II.13-a). Cependant, pour un climat chaud, lorsque la température extérieure est plus élevée que l'intérieur, il fonctionne en mode 'isolation' thermique pour réduire le gain de chaleur (Figure II.13-b). Néanmoins, ce type de mur n'est pas architecturalement attrayant et présente un risque de surchauffe en été en raison du manque du contrôle de l'approvisionnement énergétique par la paroi de stockage.

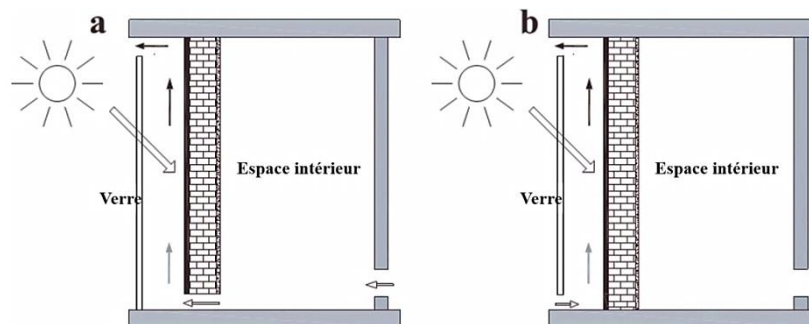


Figure II.13 Mur Trombe avec cheminée solaire : a- mode de ventilation naturelle ; b- mode d'isolation thermique [18].

3- Mur Trombe photovoltaïque (MTPV) : Dans ce type de mur Trombe un panneau photovoltaïque est intégré à la paroi externe exposée au soleil (Figure II.14). Le gain et la perte de chaleur à travers ce mur en hiver ont été réduits respectivement de 69 % et 32 % par rapport à un mur normal. Au total, une réduction de la consommation d'énergie thermique annuelle de 52,1 kWh a été obtenue en remplaçant chaque mètre carré d'un mur normal orienté au sud par

un mur photovoltaïque, ce qui équivaut à une économie de 18,6 kWh d'énergie électrique pour le système de climatisation dans un bâtiment [34].

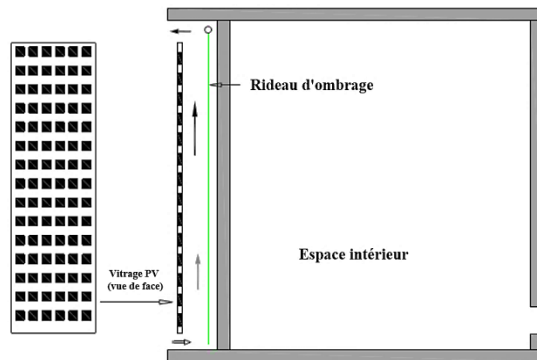


Figure II.14 Mur Trombe photovoltaïque pour le refroidissement [34].

4- Mur trombe avec cheminée solaire (MTCS) : C'est une combinaison du mur Trombe et de la cheminée solaire, utilisé dans les zones chaudes et sèches (Figure II.15). Cette conception innovante élimine les défauts majeurs des deux systèmes : l'inutilité du mur Trombe pendant la moitié de l'année et l'incapacité de la cheminée solaire à créer un flux d'air en fin de journée. De plus, contrairement aux murs classiques de Trombe où l'absorbeur reçoit le rayonnement solaire d'une direction, la nouvelle conception du canal de mur Trombe permet à l'absorbeur de recevoir le rayonnement solaire de trois directions (Est, Sud et Ouest). De plus, pour réduire la température de l'air et augmenter l'humidité à l'intérieur de la maison, deux ports d'entrée d'air frais équipés d'un système de pulvérisation d'eau ont été utilisés. Selon les résultats expérimentaux, l'utilisation d'un système de pulvérisation d'eau améliore l'efficacité thermique du système d'environ 30 % [35].

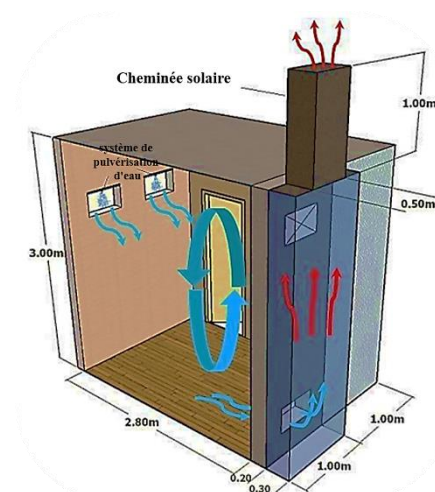


Figure II.15 Mur trombe avec cheminée solaire [35].

II.4 Facteurs de conception des systèmes à mur Trombe

Le mur Trombe est considéré comme une technologie architecturale durable utilisant l'énergie solaire pour le chauffage, le refroidissement et la ventilation dans diverses régions climatiques. Pour atteindre une efficacité élevée, certains facteurs d'influence doivent être pris en compte lors de la conception des systèmes à mur Trombe dans le bâtiment, à savoir : paramètres de conception (propriétés du vitrage extérieur, surface du mur Trombe, profondeur du canal, propriétés des murs massifs, dispositifs d'ombrage), paramètres du bâtiment (matériaux de construction, effets des fenêtres) et paramètres du site (rayonnement solaire et orientation, vitesse et direction du vent).

II.4.1 Paramètres de conception du mur Trombe

a- Propriétés du vitrage : Les propriétés du vitrage, telles que la matière de fabrication, l'épaisseur et le nombre de couches de vitrage ont une influence non seulement sur la quantité de rayonnement solaire réfléchi, absorbé ou transmis, mais également sur la perte de chaleur entre l'espace du canal et l'environnement extérieur. Par conséquent, la prise en compte de l'influence des différentes propriétés du vitrage est importante dans la phase de conception du mur Trombe. Pendant la saison de refroidissement, le nombre favorable de couches de vitrage pour un mur Trombe dépend des conditions climatiques de la région. Le verre simple améliore les performances de la paroi de Trombe pendant la journée en raison d'une plus grande transmissivité du rayonnement solaire [36]. Cependant, l'installation du double vitrage (Figure II.16) permet de réduire davantage les besoins en énergie de chauffage en hiver car le double vitrage.

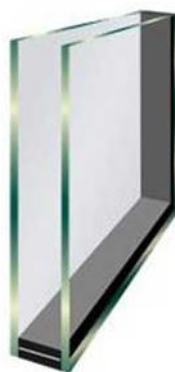


Figure II.16 Forme de double vitrage.

b- Surface du mur Trombe : L'augmentation de la surface du mur Trombe implique une diminution de la demande d'énergie de chauffage. Cependant cette augmentation est limitée par le rapport de la surface du mur Trombe par rapport à la surface totale du mur sud. Le rapport

optimal de la surface du mur Trombe est de 37 %, ce qui correspond à 32,1 % des économies d'énergie auxiliaire de chauffage [37,38].

c- Propriétés du mur massif : Le mur massif est le composant le plus important du système à mur Trombe. Les paramètres du mur massif incluent l'épaisseur, les matériaux et le niveau d'isolation. En ce qui concerne l'épaisseur de la paroi, en saison de chauffage, si le mur Trombe est ventilé, les gains de chaleur augmentent avec l'augmentation de l'épaisseur de la paroi massive. Par contre, dans le cas où le mur Trombe n'est pas ventilé, les gains de chaleur diminuent lorsque l'épaisseur augmente. Plus le mur est épais, plus il faut du temps à la chaleur pour atteindre l'intérieur. Alors qu'une épaisseur de paroi insuffisante provoque une large plage de fluctuations de la température [39,40]. L'épaisseur optimale est de 30-40 cm pour un mur massif en béton [41], de 35 cm pour un mur en briques d'argile [42] et de 37 cm pour la brique ordinaire [43].



Figure II.17 Vue extérieure du mur de stockage [44].

L'augmentation du poids et du volume du mur Trombe peut augmenter sa capacité de stockage de la chaleur. Cependant, cela augmente la charge du bâtiment, ce qui pose problème de structure. Pour résoudre ce problème, l'une des possibilités est d'utiliser le matériau à changement de phase (PCM) comme support de stockage thermique. Les PCM peuvent stocker plus d'énergie dans un volume relativement petit et sont également plus légers que les matériaux de construction conventionnels. De plus, l'énergie stockée dans le PCM peut être transférée dans la pièce plus rapidement que dans un mur en béton [44].

d- Dispositifs d'ombrage : L'utilisation des dispositifs d'ombrage pendant les différentes saisons de l'année doit être ajustée. Pendant la saison froide, Les dispositifs d'ombrage doivent être enlevés pendant la journée pour permettre au maximum de rayonnement solaire d'atteindre le mur massif. Alors qu'en été chaud, l'opération est inversée. Les dispositifs d'ombrage utilisés sont les rideaux d'ombrage, les volets roulants, les stores vénitiens et les balcons (Figure II.18).

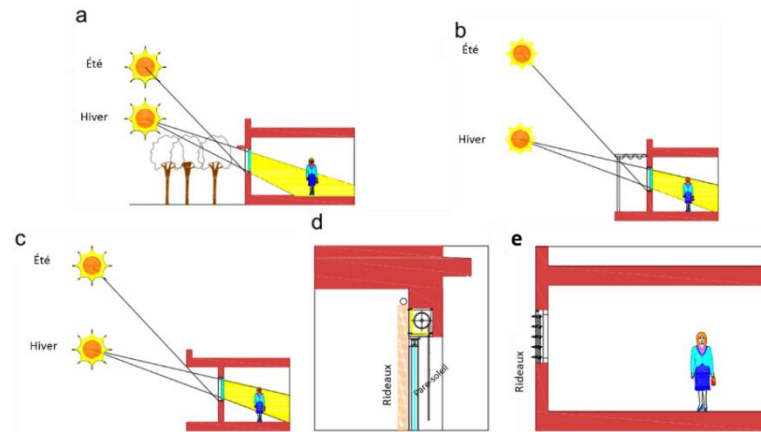


Figure II.18 Techniques d'ombrages : a- par la végétation feuillue, b- par le couvert, c- par le balcon, d- pare-soleil extérieur et rideaux intérieur, e- lamelles extérieures.

Récemment, l'effet d'ombrage d'un mur Trombe à structure de store 'vénitien' a été étudiée (Figure II.19). Les deux côtés du store vénitien sont recouverts d'un revêtement sélectif. En été chaud, le côté recouvert d'un revêtement à haute réflectivité est retourné vers l'extérieur pour éviter les problèmes de surchauffe. Tandis qu'en hiver, l'autre côté recouvert d'un revêtement à haute capacité d'absorption est orienté vers l'extérieur, ce qui entraîne l'absorption d'une grande quantité de rayonnement solaire frappant les stores [45]. L'irradiation solaire absorbée peut être contrôlée en ajustant l'angle des lamelles du store vénitien.

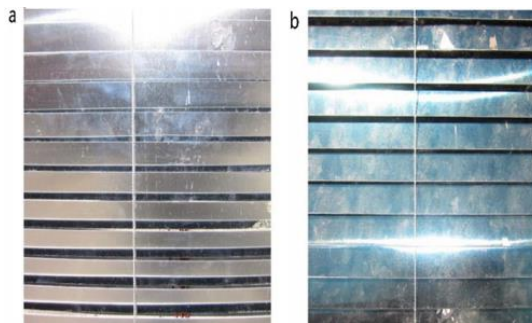


Figure II.19 Stores vénitiens à deux angles différents [45].

e- Epaisseur du canal : Lors de l'augmentation de l'épaisseur du canal, les pertes de charge par frottement diminuent, la résistance à l'écoulement diminue et le débit massique augmente. Lorsque l'épaisseur augmente jusqu'à une certaine valeur, l'état du flux d'air passera du flux spatial limité à un flux spatial illimité, simultanément, la température moyenne de l'air dans le canal diminue pendant ce processus. Ensuite, un reflux se produira autour de la sortie du mur Trombe. De plus, une épaisseur excessive de canal se traduira par une épaisseur insuffisante du mur massif. Enfin, le rapport optimal entre l'épaisseur du canal et la hauteur est d'environ 1/10 dans la plupart des cas [45], l'épaisseur du canal affecte non seulement la charge de

refroidissement en été et la charge de chauffage en hiver, mais contribue également à la température des modules photovoltaïques.

II.4.2 Paramètres de construction

a- Matériaux de construction : L'un des paramètres qui influencent le comportement thermique d'un bâtiment avec un mur Trombe est le type de matériaux de construction utilisés dans l'enveloppe du bâtiment. Une option courante pour l'enveloppe du bâtiment consiste à utiliser des matériaux avec une inertie thermique et un niveau d'isolation élevés. L'utilisation d'un mur Trombe dans un bâtiment isolé peut diminuer considérablement les besoins en chauffage, la performance énergétique globale augmentant avec l'augmentation du niveau d'isolation. La somme des besoins saisonniers en énergie de chauffage et de refroidissement est d'environ 38 kWh/m² pour l'enveloppe conventionnelle et 29 kWh/m² pour l'enveloppe bien-isolée [46].

b- Effets de fenêtre : Le thermosiphon induit le flux d'air intérieur de haut en bas, cependant, lors de la conception d'une fenêtre, le rayonnement solaire peut frapper directement le sol intérieur ou les murs adjacents. Ensuite, ces parois sont chauffées et un flux d'air de bas en haut se produit. Par conséquent, le débit d'air dans la maison est modifié. La façade sud du bâtiment avec ou sans fenêtre affecte le rendement thermique d'un mur Trombe-PV, les rendements journaliers moyens sont respectivement de 21,4 % et 15,7 % pour un bâtiment sans et avec fenêtre. Cela signifie qu'avec la fenêtre, l'efficacité thermique est relativement réduite de 27 % [46].

II.4.3 Paramètres du site géographique

a- Radiation solaire et orientation : Le niveau de radiation solaire a été identifié comme l'un des facteurs les plus importants pour générer un mouvement d'air dans le canal du mur Trombe. L'effet de différents niveaux de rayonnement solaire sur le mur Trombe indique que le débit d'air pour un flux de chaleur de 700 W/m² est légèrement supérieur à celui des flux de chaleur de 600 W/m² et 500 W/m². En général, l'efficacité du mur Trombe augmente avec l'augmentation du niveau du rayonnement solaire [47]. L'efficacité du mur Trombe n'est pas seulement liée au niveau de rayonnement solaire, mais elle est également affectée par l'orientation. Dans l'hémisphère Nord, le soleil se lève et se couche du Sud-Est à l'Ouest en hiver, et du Nord-Est à l'Ouest en été (Figure II.20). Ce léger angle dépend de la période de l'année et de la distance du mur récepteur par rapport à l'équateur. Dans l'hémisphère Sud, toutes ces directions sont inversées. Par conséquent, dans l'hémisphère Sud, l'orientation la plus

favorable pour les murs Trombe est plein Sud, Sud-Est et Sud-Ouest. Alors qu'elle est plein Nord, Nord-Est et Nord-Ouest dans l'hémisphère Nord [48].

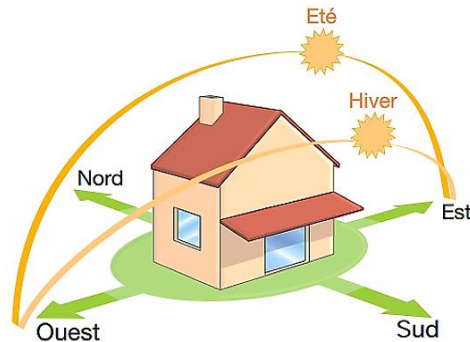


Figure II.20 Identification de l'orientation optimale d'hiver et d'été, selon la région et le site.

b- Vitesse et direction du vent : En plus du rayonnement solaire, le vent est une clé naturelle du comportement thermique et du flux d'air du mur Trombe. En général, le coefficient de perte de chaleur du vitrage sont associés à la vitesse et à la direction du vent, ce qui affecte principalement l'efficacité thermique et le taux de ventilation du mur Trombe. Pour la même quantité du rayonnement solaire, l'efficacité thermique du système mur Trombe augmente avec l'augmentation de la vitesse du vent lorsqu'elle varie de 0 à 5 m/s, tandis que la valeur d'efficacité est très proche lorsque la vitesse du vent est supérieure à 5 m/s [49]. Il est recommandé d'utiliser l'influence de la vitesse de l'air ambiant sur les performances d'un mur Trombe avec cheminée solaire à une vitesse d'air ambiant nulle [50].

II.5 Avantages et inconvénients des systèmes à mur Trombe

Le mur Trombe produit de grandes variations de température dans les matériaux d'un bâtiment. Cependant, il provoque des variations de température insignifiantes dans les espaces chauffés. Des études indiquent qu'en plus d'être respectueux de l'environnement, le mur Trombe améliore le confort thermique et participe à l'économie de l'énergie même dans les zones arides et désertiques. Les principaux points forts du mur Trombe sont les suivants :

- **Il est économique :** un mur Trombe peut réduire la consommation d'énergie d'un bâtiment de 30 % [14], et permet de diminuer l'humidité des espaces intérieurs dans les régions humides.
- **Il est écologique :** la source d'énergie est renouvelable et propre (le soleil) et la production du chauffage ne génère aucun rejet nocif (pas de gaz toxiques, pas de fumées).
- **Il est pratique :** l'ensemble du système peut être automatisé afin de faciliter son usage.
- **Fonctionnement simple :** le fonctionnement est simple et ne demande pas l'implantation de capteurs thermiques par exemple. En outre, les risques de panne sont limités.

Le mur Trombe présente également des inconvénients parmi lesquels :

- **La faible résistance thermique**, pendant la nuit ou pendant des périodes nuageuses prolongées, le flux de chaleur est transféré de l'intérieur vers l'extérieur d'un bâtiment.
- **Phénomène de transfert thermique inverse (thermosiphon)**, Ce phénomène se produit lorsque le mur à inertie thermique possède une température inférieure à la température ambiante, en particulier pendant la nuit en saison froide lorsque la circulation inverse de l'air à travers les ouvertures refroidit encore plus la maison.
- **Contraintes en matière d'exposition et de climat** : un mur Trombe nécessite une exposition au sud et un ensoleillement régulier. Le transfert de chaleur se déroule toujours de manière incertaine. La quantité de chaleur gagnée est imprévisible en raison des changements de l'intensité solaire.
- **Manque d'esthétisme** : ce mur, souvent sombre afin d'améliorer l'absorption de la chaleur, peut être particulièrement difficile à intégrer avec le reste du style de l'habitation.
- **Nettoyage de la vitre délicat** : en plus du vitrage extérieur, il faut également nettoyer la partie intérieure, ce qui nécessite de démonter la vitre. En effet, la circulation de l'air amène inévitablement des poussières entre le mur et le vitrage.

II.6 Conclusion

Le système de chauffage à mur Trombe est une technique très répandue dans la conception des maisons solaires passives. Cette technique a prouvé, expérimentalement, son efficacité pour le confort thermique des habitats. Il faut, donc, encourager le secteur du bâtiment à intégrer des systèmes solaires passifs par la présentation d'exemples fiables et efficaces énergétiquement. Il est, toutefois, nécessaire le développement d'une méthodologie d'évaluation des systèmes solaires passifs à mur Trombe afin de déterminer son fonctionnement optimal, sa rentabilité et son aspect esthétique architecturale.

Dans ce contexte, le mur Trombe est considéré comme une technologie architecturale durable utilisant l'énergie solaire pour le chauffage, le refroidissement et la ventilation dans diverses régions climatiques. Pour atteindre une efficacité élevée, certains facteurs d'influence doivent être pris en compte lors de la conception des systèmes à mur Trombe dans le bâtiment tels que les paramètres de conception, les paramètres du bâtiment et les paramètres du site géographique.

Références bibliographiques

- [1] Hu Z, He W, Ji J, Zhang S. A review on the application of Trombe wall system in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 70:976–87.
- [2] Passive House requirements. Retrieved 10 30, 2015, from Passive House Institute.
- [3] Asnaghi A. Solar chimney power plant performance in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(5), 3383.
- [4] Fiaschi D. Design and exergy analysis of solar roofs: a viable solution with esthetic appeal to collect solar heat. *Renewable Energy*, 2012, 46: 60-71.
- [5] Onbasioglu H, Egrican AN. Experimental approach to the thermal response of passive systems. *Energy Conversion and Management*, 2002, 43(15), 2053-2065.
- [6] Abbassi F, Dimassi N, Dehmani L. Energetic study of a Trombe wall system under different Tunisian building configurations. *Energy and buildings*, 2014, 80:302–8.
- [7] Chan HY, Riffat SB, Zhu J. Review of passive solar heating and cooling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14:781–9.
- [8] Liu Y W, Feng W. Integrating passive cooling and solar techniques into the existing building in South China. *Advanced Materials Research*, 2012, 3717–20.
- [9] Zhai XQ, Song ZP, Wang RZ. A review for the applications of solar chimneys in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15:3757–67.
- [10] Fiaschi D, Bertolli A. Design and exergy analysis of solar roofs: a viable solution with esthetic appeal to collect solar heat. *Renewable Energy*, 2012, 46:60–71.
- [11] Briga-Sá A, Martins A, Boaventura-Cunha J, Lanzinha JC, Paiva A. Energy performance of Trombe walls: adaptation of ISO 13790:2008(E) to the Portuguese reality. *Energy and Buildings*, 2014, 74:111–9.
- [12] Hami K, Draoui B, Hami O. The thermal performances of a solar wall. *Energy*, 2012, 39:11–6.
- [13] Hordeski MF. Dictionary of energy efficiency technologies. West Virginia, United States: Fairmont Press, 2004.
- [14] Fang X, Yang T. Regression methodology for sensitivity analysis of solar heating walls. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28:2289–94.
- [15] Saadatian O, Sopian K, Lim CH, Asim N, Sulaiman MY. Trombe walls: a review of opportunities and challenges in research and development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16:6340–51.
- [16] Denis B. Caractérisation et valorisation de protections solaires pour la conception de bâtiments : analyse expérimentale et propositions de modélisations, Thèse, 2014.
- [17] Shen J, Lassue S, Zalewski L, Huang D. Numerical study of classical and composite solar walls by TRNSYS. *Journal of Thermal Science*, 2007, 16:46–55.
- [18] Shen J, Lassue S, Zalewski L, Huang D. Numerical study on thermal behavior of classical or composite Trombe solar walls. *Energy and Buildings*, 2007, 39:962–74.
- [19] Smolec W, Thomas A. Some aspects of Trombe wall heat transfer models. *Energy Conversion and Management*, 1991, 32:269–77.
- [20] Zalewski L, Lassue S, Duthoit B, Butez M. Study of Solar Walls - Validating a Simulation Model. *Building and Environment*, 2002.

- [21] Ji J, Yi H, He W, Pei G. PV-trombe wall design for buildings in composite climates. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2007, 129:431.
- [22] Adams S, Becker M, Krauss D, Gilman CM. Not a dry subject: optimizing water Trombe wall. Society ASE, editor SOLAR conference Colorado ASES2010, 2010.
- [23] Wang W, Tian Z, Ding Y. Investigation on the influencing factors of energy consumption and thermal comfort for a passive solar house with water thermal storage wall. *Energy and Buildings*, 2013, 64:218–23.
- [24] Simmons HL. *Olin's construction: principles, materials, and methods*. New Jersey, United States: John Wiley & Sons, 2011.
- [25] Garg H. *Solar energy: fundamentals and applications*. New York, United States: McGraw-Hill Education, 2000.
- [26] Al-Karaghoul A, Kazmerski L. Optimization and life-cycle cost of health clinic PV system for a rural area in southern Iraq using HOMER software. *Solar Energy*, 2010, 84:710–4.
- [27] Tunç M, Uysal M. Passive solar heating of buildings using a fluidized bed plus Trombe wall system. *Applied energy*, 1991, 38:199–213.
- [28] Sadineni SB, Madala S, Boehm RF. Passive building energy savings: a review of building envelope components. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15:3617–31.
- [29] Sun W, Ji J, Luo C, He W. Performance of PV-Trombe wall in winter correlated with south façade design. *Applied energy*, 2011, 88:224–31.
- [30] Jie J, Hua Y, Gang P, Jianping L. Study of PV-Trombe wall installed in a fenestrated room with heat storage. *Applied Thermal Engineering*, 2007, 27:1507–15.
- [31] Jie J, Hua Y, Gang P, Bin J, Wei H. Study of PV-Trombe wall assisted with DC. *Building and Environment*, 42. fan; 2007. p. 3529–39.
- [32] Sodha M, Bansal N, Kumar K, Mali A. *Solar passive building*. United Kingdom: Persanon Press; 1986.
- [33] Melero S, Morgado I, Neila FJ, Acha C. Passive evaporative cooling by porous ceramic elements integrated in a trombe wall. *Architecture & sustainable development (vol 2): 27th international conference on passive and low energy Architecture*. Presses univ. de Louvain, 2011, p. 267.
- [34] Peng J, Lu L, Yang H, Han J. Investigation on the annual thermal performance of a photovoltaic wall mounted on a multi layer façade. *Applied energy*, 2013, 112:646–56.
- [35] Rabani M, Kalantar V, Dehghan AA, Faghih AK. Empirical investigation of the cooling performance of a new designed Trombe wall in combination with solar chimney and water spraying system. *Energy and Buildings*, 2015, 102:45–57.
- [36] Kundakci Koyunbaba B, Yilmaz Z. The comparison of Trombe wall systems with single glass, double glass and PV panels. *Renewable Energy*, 2012, 45:111–8.
- [37] Jaber S, Ajib S. Optimum design of Trombe wall system in mediterranean region. *Solar Energy*, 2011, 85:1891–8.
- [38] Richman R, Pressnail K. A more sustainable curtain wall system: analytical modeling of the solar dynamic buffer zone (SDBZ) curtain wall. *Building and Environment*, 2009, 44:1–10.
- [39] Nelson VC. *Introduction to renewable energy*. Florida, United States: CRC Press, 2011.
- [40] Bin C, Cuiying C, Wenxiu Y. A calculation model of passive solar house with Trombe wall. *Renewable Energy Proceedings*. 2006.

- [41] Agrawal B, Tiwari GN. Building integrated photovoltaic thermal systems: for sustainable developments. London, United Kingdom: Royal Society of Chemistry, 2011.
- [42] Stazi F, Mastrucci A, Munafò P. Life cycle assessment approach for the optimization of sustainable building envelopes: an application on solar wall systems. *Building and Environment*, 2012, 58:278–88.
- [43] Fang X, Li Y. Numerical simulation and sensitivity analysis of lattice passive solar heating walls. *Solar Energy*, 2000, 69:55–66.
- [44] Zalewski L, Joulin A, Lassue S, Dutil Y, Rousse D. Experimental study of smallscale solar wall integrating phase change material. *Solar Energy*, 2012, 86:208–19.
- [45] Liping W, Angui L. A numerical study of Trombe wall for enhancing stack ventilation in Buildings. The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland, 6-8 September 2006.
- [46] Stazi F, Mastrucci A, di Perna C. The behaviour of solar walls in residential buildings with different insulation levels: an experimental and numerical study. *Energy and Buildings*, 2012, 47:217–29.
- [47] Burek SAM, Habeb A. Air flow and thermal efficiency characteristics in solar chimneys and Trombe walls. *Energy and Buildings*, 2007, 39:128–35.
- [48] Krüger E, Suzuki E, Matoski A. Evaluation of a Trombe wall system in a subtropical location. *Energy and Buildings*, 2013, 66:364–72.
- [49] Dragičević S, Lambić M. Influence of constructive and operating parameters on a modified Trombe wall efficiency. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2011, 11:825–38.
- [50] Tan AYK, Wong NH. Influences of ambient air speed and internal heat load on the performance of solar chimney in the tropics. *Solar Energy*, 2014, 102:116–25.

Chapitre III

Matériaux biosourcés appliqués à l'isolation thermique

La caractéristique la plus distinctive des matériaux de construction naturels biosourcés est associée à leurs propriétés hygrothermiques. Cela peut conduire à une amélioration du climat de l'air intérieur et de la consommation d'énergie. En particulier, les matériaux isolants d'origine naturelle sont des alternatives efficaces aux matériaux isolants minéraux, qui sont de plus en plus associés à des risques pour la santé des constructeurs et des utilisateurs de bâtiments. Les matériaux de construction biosourcés sont principalement associés à une durabilité améliorée et ils sont équivalents aux matériaux isolants d'origine fossile ou minérale en termes d'isolation thermique et de performances acoustiques.

III.1 Introduction

L'isolation thermique permet à la fois de réduire nos consommations d'énergie de chauffage et/ou de climatisation et d'accroître notre confort. Mais ce n'est pas tout, l'isolation est également bénéfique pour l'environnement car, en réduisant les consommations, elle permet de préserver les ressources énergétiques et de limiter les émissions de gaz à effet de serre. Ainsi, l'isolation thermique est intéressante en termes de protection de l'environnement, de confort et d'économies financières.

Dans ce chapitre, nous traitons l'isolation thermique des habitats ainsi que les stratégies d'isolation thermique. Nous présentons également les différents matériaux utilisés dans d'isolation thermique et en particulier ceux à base biologique appelés matériaux biosourcés.

III.2 L'isolation thermique

L'isolation thermique désigne l'ensemble des techniques utilisées pour limiter le transfert de chaleur entre un milieu chaud et un milieu froid (limiter les déperditions thermiques). L'isolation thermique est utilisée dans de nombreux domaines incluant le bâtiment (maintien d'une température de confort à l'intérieur des habitations), l'industrie, l'automobile, la chaîne du froid et le textile.

L'isolation est la clé du confort thermique. Selon l'Ademe (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) [1], Une maison mal isolée présente une perte de la chaleur de 30 % par les combles et la toiture (c'est donc la priorité en termes d'isolation), de 25 % par les murs, de 10 % à 15 % par les vitres et fenêtres et de 7 % à 10 % par les sols (Figure III.1). Le projet d'isolation thermique prendra donc en compte les différents éléments du bâtiment.

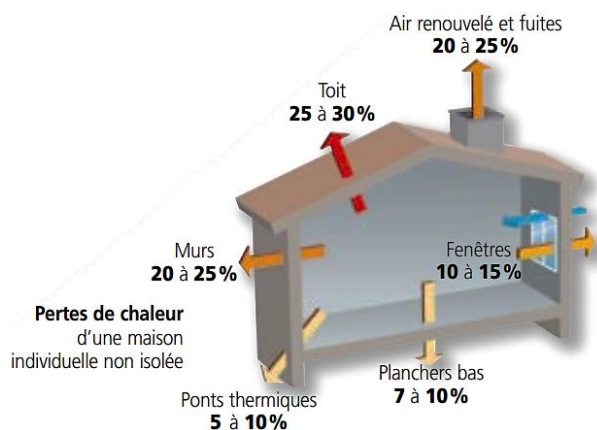


Figure III.1 Pertes thermiques par différentes parties d'un habitat mal isolé [1].

Les fonctions principales de l'isolation thermique dans un bâtiment sont :

1. L'amélioration du confort thermique en hiver comme en été.

2. La minimisation de la consommation énergétique pour le chauffage et/ou la climatisation.
3. Rendre l'habitat plus écologique en diminuant les pollutions liées au rejet des gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

III.3 Stratégies de l'isolation thermique

Il existe trois manières d'isolation thermique des habitats : isolation intérieure, isolation extérieure et isolation répartie.

a- Isolation intérieure : Elle présente l'avantage d'être moins chère à l'investissement que l'isolation extérieure. Cette méthode doit être utilisée en portant une attention toute particulière aux ponts thermiques que l'on peut trouver au niveau des liaisons 'dalles-murs' ou au niveau des liaisons 'fenêtres-murs' (Figure III.2). En rénovation, cette technique présente l'avantage de ne pas modifier l'aspect extérieur de la maison, mais entraîne une réduction de la surface habitable, et des contraintes techniques peuvent survenir (gênes possibles pour l'ouverture des fenêtres, passage de canalisations existantes, prises électrique). Une attention particulière devra donc être portée aux caractéristiques initiales de la paroi ainsi qu'au matériau d'isolation, afin d'obtenir une paroi finale isolante mais qui évite tout désagrément par la suite (dégradation de la maçonnerie, apparition de moisissure, condensation).

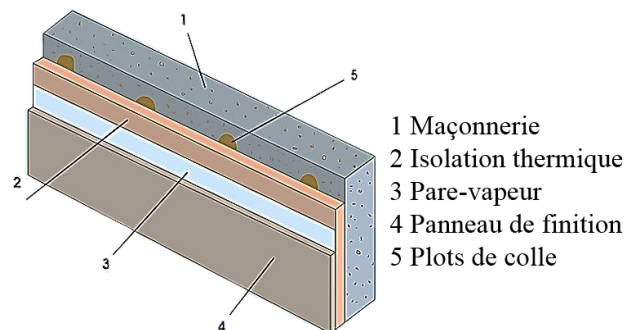


Figure III.2 Exemple d'isolation intérieure (pose de panneaux par collage).

b- Isolation extérieure : C'est la méthode la plus efficace pour réduire les déperditions thermiques par les murs et garantir un confort satisfaisant, hiver comme été. Ce type d'intervention demande beaucoup de professionnalisme, étant donné le nombre de solutions possibles et les techniques requises (Figure III.3). Cette méthode d'isolation a l'avantage de regrouper les opérations d'isolation, traiter un grand nombre de ponts thermiques, protéger les murs des variations climatiques et de ne pas modifier la surface des pièces.

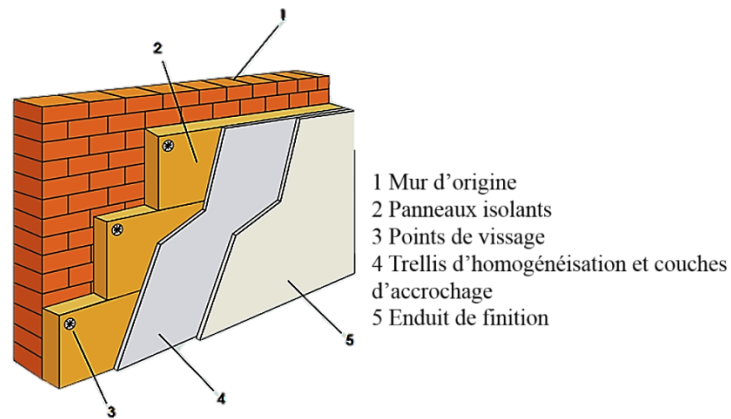


Figure III.3 Exemple d'isolation extérieure d'une paroi (isolation par panneaux enduits).

c- Isolation répartie : elle est caractérisée par l'utilisation de l'isolation en tant que matériau de construction. Son rôle majeur est la stabilité de la construction, le remplissage et l'isolation en même temps (Figure III.4). La meilleure solution est de construire intelligemment, en adoptant des matériaux à la fois porteurs et isolants. Différents types de matériaux sont proposés :

- Les blocs mono-murs (brique en terre cuite ou bloc en pierre ponce ou en billes d'argile expansée), le béton cellulaire (appelé aussi thermo-pierre), composé de ressources naturelles (sable blanc, chaux, ciment, gypse, poudre d'aluminium).
- Les blocs bi-matières, formés de silico-calcaire et de béton cellulaire.
- Le coffrage isolant, c'est-à-dire des blocs de coffrage perdu en polystyrène qu'on empile et dans lesquels le béton est coulé ;
- L'ossature en bois.



Figure III.4 Exemple d'isolation répartie.

III.4 Critères d'évaluation des isolants thermiques

Les isolants disponibles sur le marché sont de sources très diverses (minérales, végétales, synthétiques...) et se présentent sous des formes très variées (panneaux rigides, vrac, rouleaux...). Plusieurs critères sont utilisés pour distinguer les matériaux isolants thermiques :

- 1- Conductivité thermique :** le pouvoir isolant d'un matériau s'évalue à partir de sa conductivité thermique. Plus la conductivité est faible, plus grand est le pouvoir isolant du matériau.
- 2- Résistance thermique :** un autre indicateur est la résistance thermique. Elle exprime la capacité d'un matériau isolant à résister au froid et à la chaleur. Plus cette résistance est élevée, plus le produit est isolant.
- 3- Capacité thermique spécifique :** la capacité thermique spécifique d'un matériau isolant est la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de 1 kg du matériau de 1 K (ou de 1 °C). Un bon isolant a une capacité thermique spécifique plus élevée, ce qui signifie qu'il faut du temps pour absorber plus de chaleur avant de chauffer réellement (montrant une augmentation de température) et de transférer la chaleur qu'il a absorbée. Une capacité thermique spécifique élevée est une caractéristique des matériaux fournissant une masse thermique ou un tampon thermique.
- 4- Masse volumique :** un matériau isolant à forte masse volumique maximise le poids total. C'est une caractéristique de la thermo diffusivité et masse thermique élevées.
- 5- Diffusivité thermique :** C'est la vitesse de pénétration et atténuation d'une onde thermique dans un matériau isolant. Physiquement, la diffusivité thermique est la capacité d'un matériau à imposer sa température au milieu extérieur. Les isolants ont une faible diffusivité thermique. Par exemple, les métaux transmettent rapidement l'énergie thermique (c'est pourquoi ils sont froids au toucher) alors que le bois est un émetteur lent.
- 6- Coefficient de transmission thermique :** Ce coefficient correspond aux déperditions thermiques d'une paroi. Il représente l'inverse de la résistance thermique totale de la paroi et indique la capacité de la paroi à laisser s'échapper la chaleur vers l'extérieur. Plus le coefficient U d'une paroi est faible, plus cette paroi est isolante.
- 7- Perméabilité à la vapeur d'eau :** la perméabilité à la vapeur d'eau d'un matériau est le rapport de la quantité de vapeur d'eau traversant un matériau par unité d'épaisseur, par unité de temps et par unité de différence de pression de vapeur existant de part et d'autre du matériau.

III.5 Classification des matériaux d'isolation thermique

Divers types de matériaux isolants (matériaux traditionnels) pour les applications de construction ont connu une croissance rapide, mais récemment, de nombreuses initiatives ont été prises pour utiliser des matériaux respectueux de l'environnement, qui ont encore une part négligeable sur le marché. Différents matériaux d'isolation ont été proposés qui sont plus

efficaces et plus respectueux de l'environnement. D'autre part, la tendance actuelle est vers l'application de matériaux dans les composants de construction qui ont une grande capacité de stockage d'énergie thermique.

Les matériaux isolants naturels deviennent attrayants pour les chercheurs en remplacement des matériaux traditionnels. Certains d'entre eux ont des propriétés thermiques comparables et peuvent avoir un meilleur amortissement thermique et d'humidité. Par conséquent, ils peuvent fournir un environnement plus durable et plus sain avec la possibilité d'être recyclés. Tous les matériaux d'isolation thermique pour les applications du bâtiment sont classés en trois groupes tels que les matériaux inorganiques, organiques et les nouvelles technologies [2]. Cette classification est illustrée sur la Figure III.5.

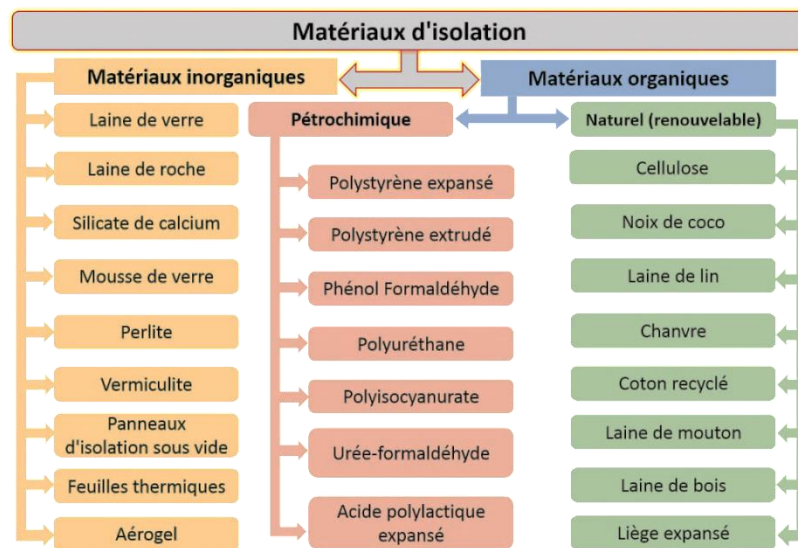


Figure III.5 Classification des matériaux isolants [2].

Les matériaux inorganiques sont considérés comme des matériaux traditionnels tels que la laine de verre, la laine de roche, le silicate de calcium, la mousse de verre, la perlite et la vermiculite. Les matières organiques sont séparées en deux groupes : matériaux pétrochimiques ou matériaux renouvelables. Les matériaux pétrochimiques sont également considérés comme traditionnels et contiennent du Polystyrène expansé (EPS), du Polystyrène extrudé (XPS), du Phénol formaldéhyde, du Polyuréthane, du Polyisocyanurate et de l'urée formaldéhyde. Les matériaux d'isolation renouvelables sont considérés comme plus respectueux de l'environnement comme la noix de coco, la laine de lin, le chanvre, le coton recyclé, la laine de mouton, Laine de bois et le liège expansé. Concernant les nouveaux matériaux, on trouve les feuilles thermosensibles, les aérogels, l'acide poly lactique expansé et les panneaux isolants sous vide [3].

III.6 Matériaux biosourcés d'isolation thermique

Les propriétés d'isolation thermique de certains matériaux verts et de certains sous-produits agricoles et industriels ont été étudiées par plusieurs auteurs afin d'évaluer l'opportunité de les réutiliser ou de les recycler dans le secteur du bâtiment. L'utilisation de ces produits n'est pas répandue et, dans certains cas, limitée à une phase expérimentale et en laboratoire [4]. La durabilité réelle des matériaux isolants considérés est liée à leur disponibilité, ils doivent être utilisés de préférence là où ils sont récoltés, produits ou fabriqués. Un examen de certains matériaux biosourcés est résumé dans ce qui suit :

1- Le roseau : obtenu à partir de Phragmites australes, une plante généralement récoltée en hiver et assemblée avec des fils de fer ou de nylon en panneaux (Figure III.6). Ils sont utilisés dans les toits et les murs, à la fois comme isolant interne ou externe recouvert de plâtre.



Figure III.6 Photo illustrant le panneau de roseaux [5].

La conductivité thermique d'un panneau de roseau est comprise entre 0,045 et 0,056 W/m K, la densité varie de 130 à 190 kg / m³ et la chaleur spécifique atteint une valeur maximale de 1200 J/kg K [5].

2- Le bagasse : C'est l'un des résidus les plus importants de la production de sucre (Figure III.7). Il est utilisé sous forme de panneaux de particules d'isolation thermique, caractérisés par une densité de 100 kg/m³ et une conductivité thermique de 0,046 W/m K [6]. Toutefois la conductivité thermique passe de 0,049 W/mK pour une densité de 250 kg/m³ à 0,055 W/mK pour une densité de 350 kg/m³ [7].



Figure III.7 Photo de canne à sucre (à gauche) et bagasse de canne à sucre (à droite) [6].

3- L'épi de maïs : Les épis de maïs sont les résidus des usines de maïs et de l'industrie de transformation (Figure III.8). La conductivité thermique des panneaux de particules constitués d'épis de maïs broyés et de colle à bois a été estimée de 0,101 W/mK [8].

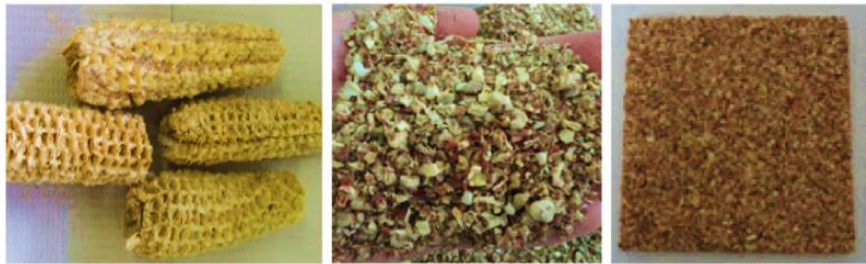


Figure III.8 Photo d'Épi de maïs : brut (gauche), sol (milieu) et panneau (droite) [8].

4- Le riz : D'après l'Organisation pour l'alimentation et l'agriculture FAO, le riz est le troisième aliment le plus produit au monde après la canne à sucre et le maïs. La conductivité thermique de panneaux de particules constitués de balles de riz à 24 °C est comprise entre 0,0464 et 0,0566 W/mK pour une densité de 154 kg/m³ [9] (Figure III.9).



Figure III.9 Paille de riz (à gauche), panneau de balles de riz testé (à droite) [9].

5- Le liège : L'isolation thermique en liège peut être produite comme panneaux de liège entre deux plaques de bois (Figure III.10) avec une conductivité thermique qui peut atteindre 0,041 W/mK [10].



Figure III.10 Spécimen de liège testé (à gauche), configuration du sandwich examiné (à droite) [10].

6- La paille : La paille a été l'un des premiers matériaux à être utilisé dans les habitats verts. La paille possède une conductivité thermique de $0,067 \text{ W/mK}$, une diffusivité de $18,2 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{s}$ et une capacité thermique de 600 J/kgK pour une densité égale à 60 kg/m^3 [11,12] (Figure III.11). Des mesures effectuées dans une maison innovante et durable, ont montré que ce matériau contribue à réduire les jours de chauffage d'environ 52% et à obtenir un gain solaire de 1917 kWh pendant la saison de chauffage [13].

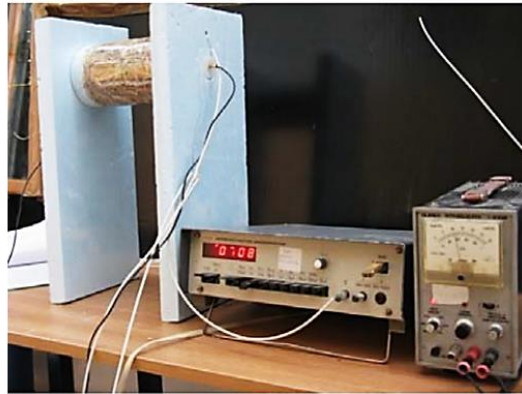


Figure III.11 Echantillon d'un matériau d'isolation thermique à base de paille [12].

7- Le chanvre : Le terme chanvre désigne la fibre tirée de la plante de Cannabis (Figure III.12). Les propriétés thermiques des fibres de chanvre dépendent de leur densité. Avec l'augmentation de la densité, la conductivité thermique et la perméabilité à l'air du matériau diminuent. La valeur de la conductivité thermique la plus basse obtenue est d'environ $0,04 \text{ W/mK}$ pour une densité de 70 kg/m^3 [14].



Figure III.12 Fibres de chanvre hachées [14].

8- Le palmier-dattier : Le palmier dattier est répandu dans les zones arides désertiques et semi-arides. Les résidus, tels que les feuilles, les pétioles et les grappes sont généralement considérés comme des déchets (Figure III.13). L'estimation mondiale annuelle de ces déchets est d'environ 1200000 tonnes de pétioles, 410000 de feuilles et 300000 de régimes [15].

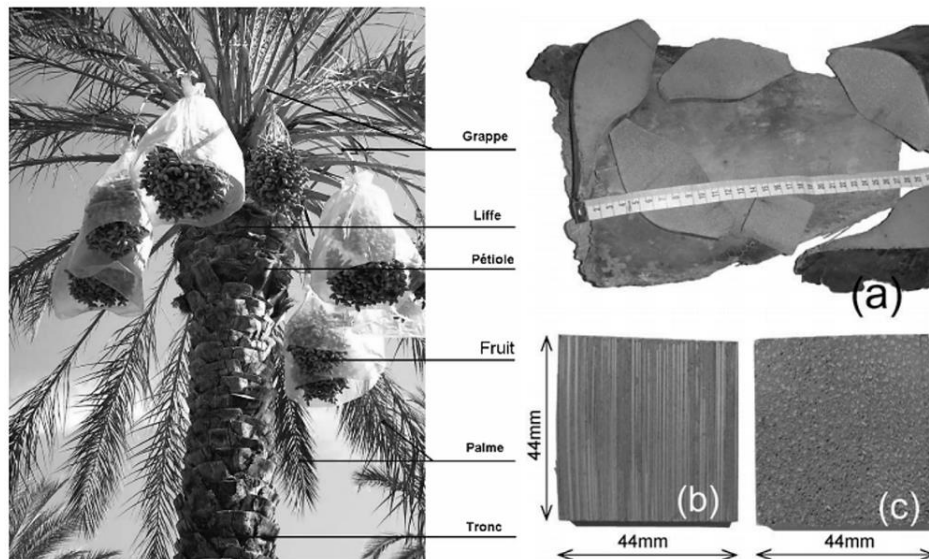


Figure III.13 Parties d'un palmier dattier a- pétioles, b-c échantillon en fibres [16].

Afin de caractériser ces différents déchets du palmier dattier, Plusieurs échantillons ont été testés pour prendre en compte l'effet du type de palmier dattier et la différence entre les pétioles et le matériel à base de grappes. La direction de la fibre a également été testée. Les matériaux les plus performants ont été caractérisés par une conductivité thermique de 0,072 W/m K [16]. Afin d'évaluer de nouveaux procédés de recyclage de ces matériaux, un matériau bio composite innovant à base de gypse et de fibre de palmier dattier a également été étudié. Sa conductivité thermique est comprise entre 0,15 et 0,17 W/mK pour une densité de 753 kg/m³ [17]. Des études expérimentales ont montré que la combinaison de panneaux sandwich bois de palmier dattier-MDF donne une bonne conductivité thermique d'environ 0,14 W/mK (Figure III.14) [18].

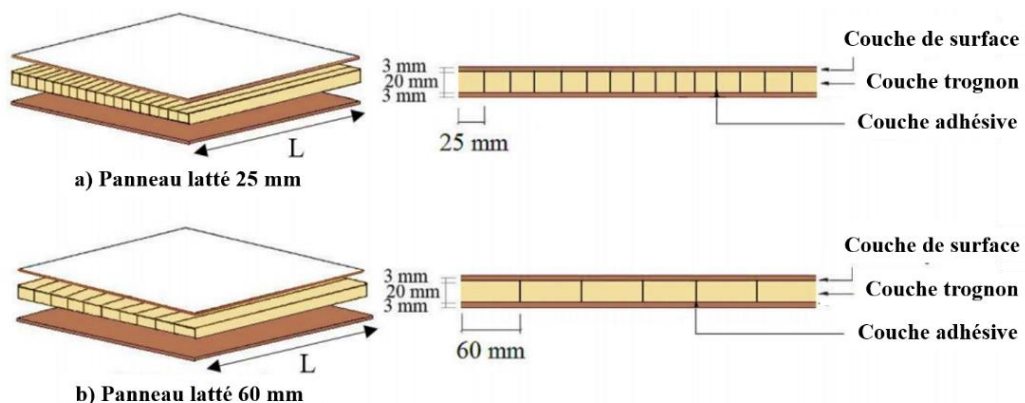


Figure III.14 Panneaux sandwich DPW-MDF : a- latté 25 mm, b- latté 60 mm [18].

III.7 Conclusion

Les matériaux d'isolation thermique biosourcés fabriqués avec des agrégats végétaux ont un grand potentiel sur le marché mondial des matériaux de construction. Avec des conceptions de bâtiments modernes exigeant une durabilité toujours croissante dans la construction et la maintenance, l'efficacité de l'exploitation et la réduction de l'empreinte carbone, les matériaux d'isolation d'origine biologique sont en mesure de répondre à ces exigences.

Les matériaux d'isolation thermique biosourcés se sont avérés à la fois viables et commercialisables dans l'industrie de la construction, malgré leur relative petite enfance en tant que matériaux de construction. Comme on peut s'y attendre avec un tel nouveau matériau biosourcé, des recherches limitées ont été menées sur la meilleure façon de l'utiliser, en particulier sur la façon de tirer parti de ses caractéristiques naturelles à faible teneur en carbone ainsi que de sa capacité thermophysiques, c'est-à-dire capables de freiner les transferts de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur d'un logement et l'inverse.

Les caractéristiques naturelles réduisent l'empreinte carbone d'un bâtiment et améliorent l'isolation, à la fois thermique et acoustique. Ses caractéristiques sont au centre de l'argumentation pour approfondir les recherches sur ses matériaux disponible, renouvelable et sur la meilleure façon de l'exploiter dans le secteur de la construction des bâtiments, et l'amélioration leur confort thermique, et notamment plus de la durabilité.

Références bibliographiques

- [1] Ademe (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie). Guide pratique isoler sa maison. Juin 2017. <http://changeonsdennergie.com/wp-content/uploads/2018/01/guide-pratique-isoler-sa-maison.pdf>.
- [2] Abu-Jdayil B, Mourad AH, Hittini W, Hassan M. Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials: An overview. *Construction and Building Materials*, 2019, 214:709–35.
- [3] Asdrubali F, D'Alessandro F, Schiavoni S. A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 2015, 4:1–17.
- [4] Amziane S, Sonebi M. Overview on bio-based building material made with plant aggregate. *RILEM Technical Letters*, 2016, 1:31–8.
- [5] Manohar K, Experimental investigation of building thermal insulation from agricultural by-products. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 2012, 2(3):227–239.
- [6] Luamkanchanaphan T, Chotikaprakhan S, Jarusombati S. A study of physical, mechanical and thermal properties for thermal insulation from narrow-leaved cattail fibers. *APCBEE Procedia*, 2012, 1:46–52.
- [7] Panyakaew S, Fotios S. New thermal insulation boards made from coconut husk and bagasse. *Energy and buildings*, 2011, 43(7):1732–1739.
- [8] Pinto J, Paiva A, Varum H, Costa A, Cruz D, Pereira S, Fernandes L, Tavares P, Agarwal J. Corn's cob as a potential ecological thermal insulation material. *Energy and Buildings*, 2011, 43:1985–1990.
- [9] Pavia A, Pereira S, Sá A, Cruz D, Varum H, Pinto J. A contribution to the thermal insulation performance characterization of corn cob particleboards. *Energy and Buildings*, 2012, 45:274–279.
- [10] Limama A, Zerizera A, Quenardb D, Salleeb H, Chenakca A. Experimental thermal characterization of bio-based materials (AleppoPine wood, cork and their composites) for building insulation. *Energy and Buildings*, 2016, 116:89–95.
- [11] Goodhew S, Griffiths R. Sustainable earth walls to meet the building regulations. *Energy and Buildings*, 2005, 37:451–459.
- [12] Pruteanu M. Investigations regarding the thermal conductivity of straw. *Buletinul Institutului Politehnic Din IAȘI. Universitatea Tehnică Gheorghe Asachi, din Iași*, 2010, Tomul LVI (LX), Fasc.3.
- [13] Milutien E, Staniškis J K, Kručius A, Augulien V. Increase in buildings sustainability by using renewable materials and energy. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2012, 14:1075–1084.
- [14] Kosiński P, Brzyski P, Szewczyk A, Motacki W. Thermal Properties of Raw Hemp Fiber as a Loose-Fill Insulation Material. *Journal of Natural Fibers*, 2018, 15:717–30.
- [15] Bui H, Sebaibi N, Boutouil M. Determination and review of physical and mechanical properties of raw and treated coconut fibers for their recycling in construction materials. *Fibers*, 2020, 8:1–18.
- [16] Agoudjil B, Benchabane A, Boudenne A, Ibos L, Fois M. Renewable materials to reduce building heat loss: characterization of date palm wood. *Energy and Buildings*, 2011, 43:491–497.
- [17] Chikhi M, Agoudjil B, Boudenne A, Gherabli A. Experimental investigation of new biocomposite with low cost for thermal insulation, *Energy and Buildings*, 2013, 66 :267–273.
- [18] Haseli M, Layeghi M, Zarea Hosseinabadi H .Characterization of Blockboard and Battenboard Sandwich Panels from Date Palm Waste Trunks .*Measurement*, 2018, 124:329–337.

Chapitre IV

Étude et réalisation d'un prototype de maison solaire passive

Partie I : Évaluation des propriétés thermo-physique d'un matériau isolant biosourcé.

L'efficacité thermique est un critère très important devenu au fil du temps indispensable dans le secteur de l'habitation, puisqu'il permet de diminuer la consommation énergétique. Les l'habitation deviennent, ainsi, moins énergivores et moins polluants. Ce critère assure le confort thermique par l'optimisation des performances énergétiques et la réduction des pertes thermiques et par conséquent, l'amélioration de l'isolation thermique du bâtiment. Cette partie du chapitre est consacrée à la proposition d'un nouveau matériau d'isolation thermique biosourcé qui est le bois du tronc du palmier dattier. En Algérie, ce matériau est malheureusement abandonné dans la nature ou brûlé causant ainsi des dégâts considérables à l'environnement. Pour l'étude des caractéristique thermo-physiques de ce matériau, un banc d'essai a été réalisé au département de Génie Mécanique permettant de tester les capacités d'isolation de ce matériau en le comparant à d'autres matériaux isolants largement utilisés dans le secteur de l'habitat.

IV.I.1 Introduction

Le secteur d'habitation en Algérie rencontre une évolution considérable au cours des vingt dernières années. Dans la conception fonctionnelle et architecturale, l'aspect énergétique de ces projets n'est pas toujours considéré comme significatif. Ceci conduit à des bâtiments non confortables et énergivores. L'utilisation de l'isolation thermique est l'une des façons les plus efficaces pour l'économie de l'énergie dans ce secteur. En effet, quelles que soient la nature et l'efficacité des systèmes de chauffage, la meilleure façon de diminuer les besoins énergétiques d'un bâtiment demeure la réduction des pertes thermiques. La qualité de l'isolation à prévoir dépend du climat, de l'exposition des murs et aussi des matériaux employés dans la construction. Toutefois, le choix d'un matériau d'isolation thermique dépend de sa disponibilité et de son coût et bien entendu, de son inoffensivité à l'environnement.

L'introduction du concept de durabilité dans le processus de conception des bâtiments a encouragé les recherches visant à développer des matériaux isolants thermiques et acoustiques pour utiliser des matériaux naturels ou recyclés. Les matériaux biosourcés sont constitués principalement de fibres végétales ou animales, leur matière première est donc largement issue de ressources renouvelables (l'agriculture ou l'industrie du bois). Dans cette partie du travail, nous avons essayé de tester les capacités isolantes du bois issu du tronc du palmier dattier. L'objectif est de proposer un nouveau matériau isolant biosourcé. Des expériences ont été réalisées sur un banc d'essai conçu spécialement pour cette fin. Une étude comparative a été faite avec d'autres matériaux d'isolations thermiques largement utilisés dans le secteur du bâtiment.

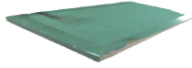


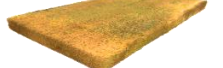
IV.I.2 Procédure expérimentale

La procédure expérimentale adoptée dans cette étude consiste à comparer un échantillon du matériau biosourcé avec le polystyrène expansé et la laine de verre, deux matériaux d'isolation largement utilisés dans le domaine du bâtiment. L'échantillon du matériau biosourcé a été préparé en exploitant les résidus des arbrisseaux secs abandonnés dans la nature (Troncs de palmiers-dattiers secs), en utilisant des machines à bois pour donner à l'échantillon testé une forme parallélépipédique de faible épaisseur prise égale à 2 cm (Figure IV.1). Chaque échantillon des trois matériaux est mis entre deux plaques de plâtre (disposition "multicouche" ou "sandwich") et exposé à un flux de chaleur constant. Les dimensions des différents constituants de ces éléments sont présentées dans le Tableau IV.1. Les propriétés thermophysiques des matériaux utilisés sont résumées dans le Tableau IV.2.



Figure IV.1 Etapes de préparation de l'échantillon du bois de palmier-dattier.

Tableau IV.1 Dimensions des matériaux isolants étudiés.

Produit				
Dimension (cm)	Plâtre	Polystyrène expansé	Laine de verre	Bois de palmier-dattier
Longueur	30,5	30,5	30,5	30,5
Largeur	16,5	16,5	16,5	16,5
Épaisseur	1,3	2	2	2

IV.I.2.1 Banc d'essai

Le banc d'essai est constitué d'une plaque horizontale en bois représentant sa base. Des supports métalliques installés sur cette base permettent de fixer les plaques de plâtre et les échantillons à tester et également la source de chaleur. Les thermocouples ont été fixés sur les plaques de plâtre dans différentes positions correspondant aux mêmes coordonnées sur les surfaces internes et externes. (Figure IV.2).

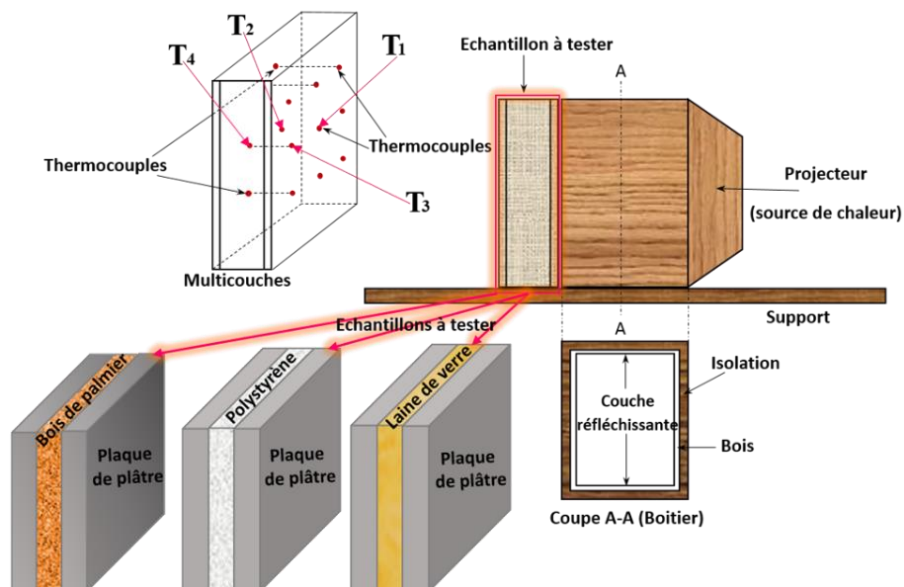


Figure IV.2 Le banc d'essai.

Tableau IV.2 Propriétés thermophysiques des matériaux utilisés.

	Masse volumique (kg/m ³)	Conductivité thermique (W/m K)	Chaleur spécifique (J/kg K)
Plaque de Plâtre	875	0,21	936
Polystyrène expansé	20	0,042	1404
Laine de verre	17	0,035	1030

IV.I.2.2 Instruments de mesures

Les instruments de mesure utilisés dans notre expérience sont :

- Thermocouples de type "K" et
- Appareil enregistreur de données de type "*Testo 176 T4*" à 04 canaux. Il permet de mesurer la température dans quatre points différents et de transformer les résultats vers l'ordinateur pour le stockage et le traitement (Figure IV.3).
- L'étalonnage a été assuré par un appareil de mesure infrarouge de type "*Testo 830*" (Figure IV.3).

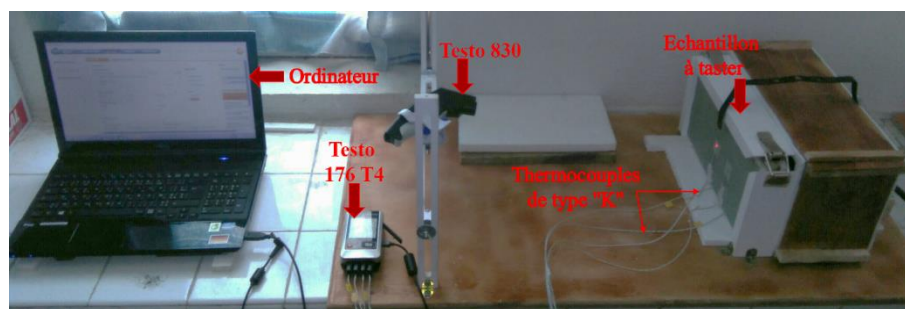


Figure IV.3 Emplacement des instruments de mesure sur le banc d'essai.

a- Enregistreur de données 'Testo 176 T4' : Cet enregistreur sert aux mesures instationnaires des températures et au transfert vers un ordinateur via un câble USB. Les résultats enregistrés sur le PC sont alors traités au moyen du logiciel 'Testo Comfort Software' qui sert également à la programmation de l'enregistreur. Les caractéristiques techniques du '*Testo 176 T4*' sont résumés dans le tableau IV.3.



Figure IV.4 Enregistreur de données 'Testo 176 T4'.

Tableau IV.3 Caractéristiques techniques de l'enregistreur 'Testo 176 T4'.

Propriétés	Descriptions
Grandeur	Température (°C/°F)
Type de capteur	4 sortie pour thermocouples type K externes
Plage de mesure	-195 à +1000 °C
Précision de l'appareil	± 1 % de la valeur (-200 à -100,1 °C), ± 1 digit ± 0,3 °C (-100 à +70 °C), ± 1 digit ± 0,5 % de la valeur (+70,1 à +1000 °C), ± 1 digit
Résolution	0,1 °C
Interface	Mini USB, fente pour carte SD
Capacité mémoire	2 millions de valeurs
Dimensions en mm	103 x 63 x 33 mm

b- Logiciel de traitement 'Testo Comfort Software' : Ce logiciel sert à la mise en mémoire, à la lecture et à l'évaluation des séries de mesures. La représentation graphique des valeurs mesurées est la tâche principale de ce programme. Le logiciel 'Testo Comfort Software' est compatible avec tous les systèmes d'exploitation Windows (7, 8, 8 Pro, 8 Enterprise, 8.1 et 10). La Figure IV.5 illustre l'interface d'accueil de ce logiciel.

**Figure IV.5** Page d'accueil du logiciel 'Testo Comfort Software'.

c- Thermomètre infrarouge 'Testo 830 T1' : C'est thermomètre infrarouge avec marquage ponctuel laser sous forme de pistolet ergonomique (Figure IV.6). Il se distingue par :

- Enregistrement rapide des valeurs de mesure,
- Marquage du spot de mesure au moyen d'un rayon laser,
- Alarmes sonore et visuelle en cas de dépassement des limites,
- Limites d'alarme réglables,
- Manipulation aisée grâce au design « pistolet »,
- Ecran éclairé,
- Emissivité réglable (0.1 à 1.0),



Figure IV.6 Thermomètre infrarouge 'Testo 830 T1'.

Les caractéristiques techniques du '*Testo 176 T4*' sont résumés dans le tableau IV.4.

Tableau IV.4 Caractéristiques techniques de 'Testo 830 T1'.

Propriétés	Descriptions
Grandeur	Température (°C / °F)
Marquage du spot de mesure	Laser à 1 point
Plage de mesure	-30 ... +400 °C
Précision	± 1.5 °C ou 1.5 % v.m. (+0.1 ... +400 °C) ± 2 °C ou ± 2 % v.m. (-30 ... 0 °C)
Résolution	0,1 °C
Facteur d'émission	0.1 ... 1.0, réglable
Réponse spectrale	8 ... 14 μm
Dimensions en mm	190 × 75 × 38 mm

IV.1.3 Résultats des essais

Les températures en fonction du temps dans les surfaces interne et externe obtenus pour chaque type de matériaux sont représentées sous forme graphique sur la Figure IV.7. Les mesures ont été effectuées pour le polystyrène expansé, la laine de verre et le bois du palmier-dattier dans les mêmes conditions, pendant une heure d'application du flux de chaleur et une demi-heure de son arrêt. De même, les variations de la température à travers la paroi multicouche pour les trois matériaux isolants testés sont illustrées sur la Figure IV.8.

A partir de ces courbes, on peut remarquer que le matériau biosourcé du palmier-dattier possède un comportement thermique identique que le polystyrène expansé et la laine de verre. Par conséquent, les propriétés thermophysiques du bois de palmier-dattier, telles que la conductivité et la diffusivité thermiques, sont proches de celles des matériaux isolants étudiés qui sont couramment utilisés dans le domaine du bâtiment.

Ces résultats montrent que le bois de palmier-dattier peut être considéré comme une ressource naturelle avec des propriétés thermiques équivalentes à celles des matériaux d'isolations couramment utilisés dans la construction tels que le polystyrène et la laine de verre. Ce qui représente une nouvelle perspective pour l'isolation thermique des bâtiments, permettant

de réduire le coût de la construction et de la consommation énergétique. D'autre part, l'exploitation des déchets du bois de palmier-dattier au lieu de les brûlés dans la nature permet de contribuer à la préservation de l'environnement et au développement durable.

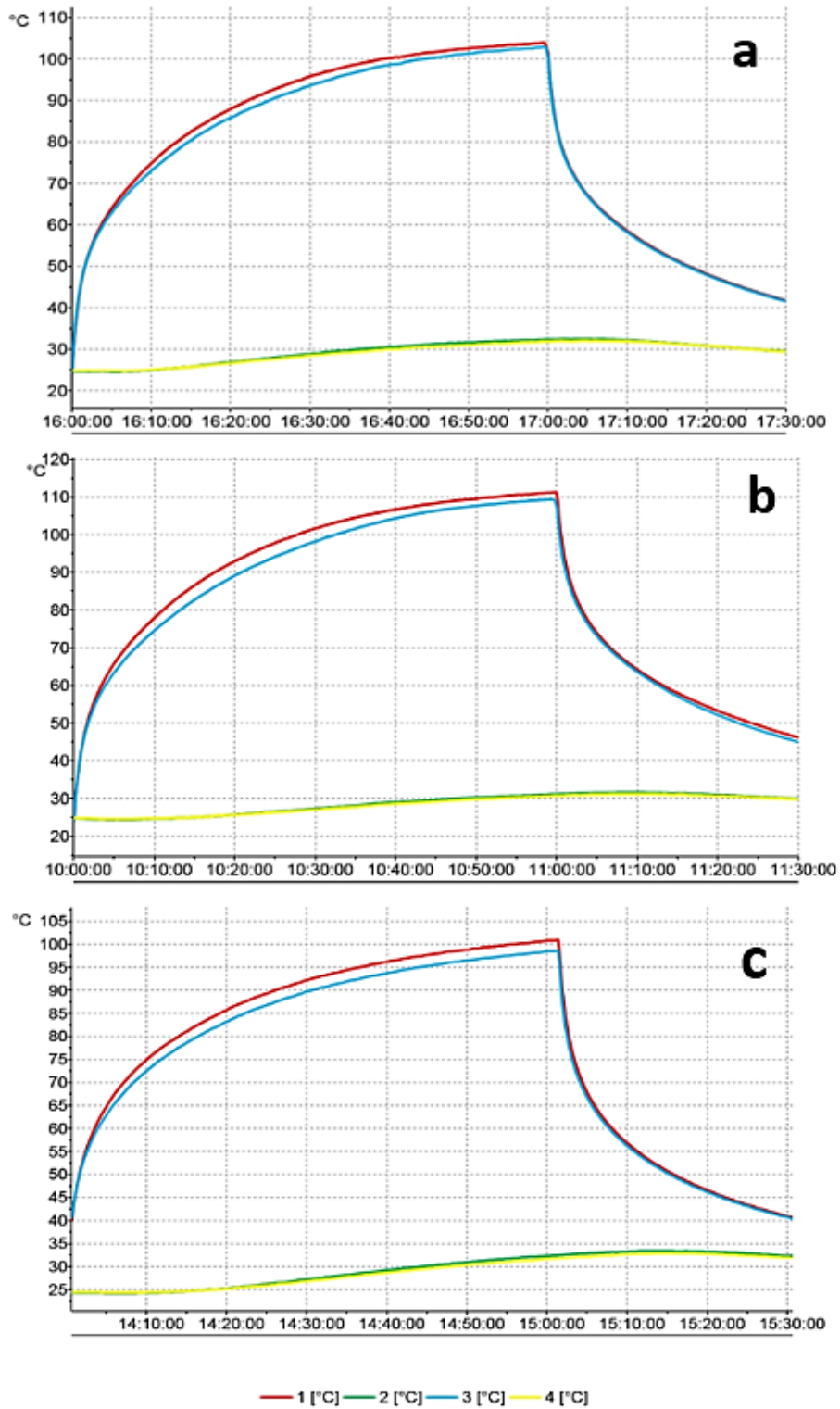


Figure IV.7 Variations des températures en fonction du temps dans les surfaces interne de : a- Polystyrène, b- Laine de verre, c- Bois de Palmier-Dattier.

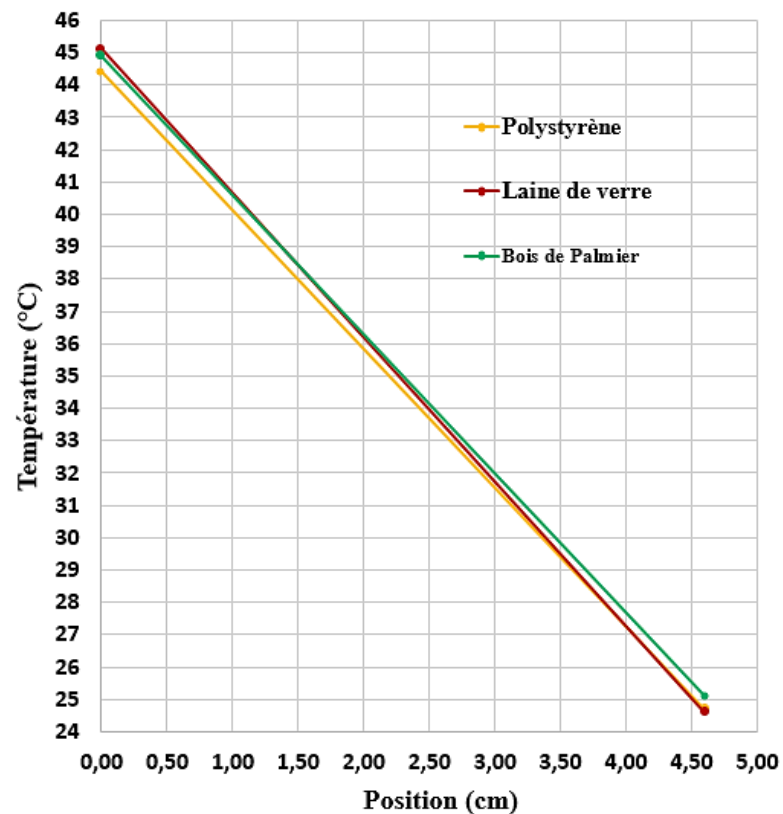


Figure IV.8 Variations de la température à travers les parois multicouches.

IV.I.4 Conclusion

Grâce à des résultats de cette partie d'investigation expérimentaux, montrant que le bois de palmier est une ressource naturelle avec des propriétés thermiques équivalentes tels que la conductivité thermique à celui du matériau d'isolations fabriquées couramment utilisés dans la construction comme le polystyrène, et la laine de verre, ce qui nous donne un nouveau choix dans l'amélioration de la structure efficacement dans l'isolation thermique, et ainsi que réalise des habitats plus confort et réduit les coûts de construction et consommation d'énergie. Et le plus important encore est d'exploiter les résidus déchets de bois de palmier dattier comme une matière première disponible, et de contribuer à la préservation de l'environnement ainsi plus de développement durable.

Chapitre IV

Partie II : Efficacité Energétique d'un mur Trombe dans la région semi-aride de Batna

L'utilisation passive de l'énergie solaire vise à chauffer ou à climatiser des habitations en impliquant une architecture adaptée et en employant des matériaux spéciaux. Dans ce contexte, cette partie est dédiée à l'étude de l'efficacité thermique des habitats en utilisant le mur Trombe et des matériaux biosourcés locaux pour la construction et l'isolation thermique. Pour cela, un prototype d'une maison solaire a été réalisé et testé sous les conditions climatiques hivernales et estivales semi-arides de la ville de Batna. Des matériaux de construction locaux (l'adobe et la pierre des montagnes des Aurès) ont été utilisés pour bâtir ce prototype et un matériau biosourcé issu des troncs des palmiers-dattiers a été utilisé pour son isolation thermique.

IV.II.1 Introduction

Un prototype d'une maison solaire passif a été réalisé pour évaluer les performances énergétiques du mur à inertie thermique connu communément sous le nom du mur Trombe. L'objectif est d'étudier l'effet de l'introduction de l'énergie solaire passive sur le confort thermique et l'efficacité énergétique de l'habitat pour la zone semi-aride de Batna. Pour la construction du prototype de la maison solaire passive, des matériaux locaux et biosourcés ont été utilisés.

IV.II.2 Conception du prototype de la maison solaire passive

La construction du prototype de la maison solaire passive et les essais expérimentaux ont été effectués à la Faculté de Technologie, Université de Batna 2 (CUB) situé au centre-ville de Batna (Figure IV.9). La ville de Batna est située dans la région du massif montagneux des Aurès, elle est située à l'Est de l'Algérie entre 4° et 7° longitude Est et 35° et 36° latitude Nord, avec une altitude d'environ 800 mètres. Le climat de Batna est de type semi-aride où les températures moyennes varient de 4 °C en janvier à 35 °C en juillet. En hiver, la température descend en dessous de zéro la nuit, avec de fréquentes gelées. En été, la température peut atteindre les 45 °C à l'ombre. Le prototype de la maison passive possède une géométrie parallélépipédique d'un volume de 1x1x1 m³. La toiture de la maison est construite en tôle de 45° d'inclinaison (Inclinaison optimal correspondant à la latitude de Batna). Des roues ont été insérées à sa base du prototype permettant de faciliter sa mobilité pendant les essais expérimentaux (Figure IV.10).

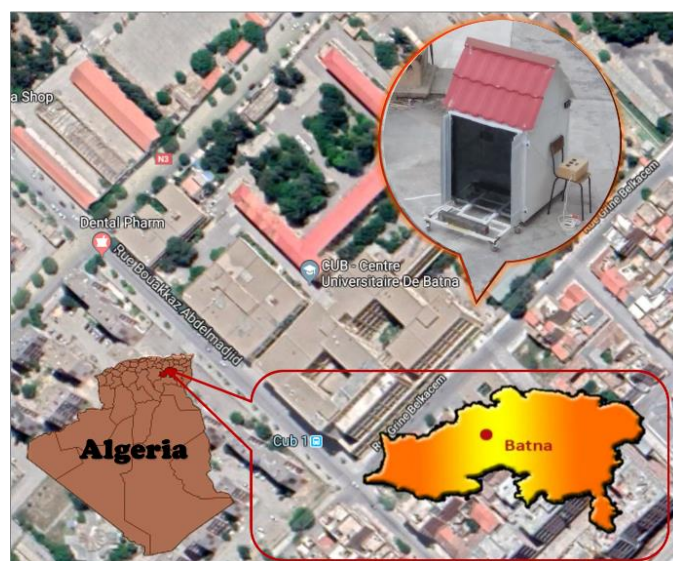


Figure IV.9 Site de l'expérimentation du prototype de la maison solaire passive.

Les dimensions géométriques du prototype sont récapitulées dans le tableau IV.5. Les murs sont construits en paroi multicouche d'épaisseur totale de 4,6 cm. Pour l'isolation des murs latéraux on a utilisé le bois du palmier-dattier avec une épaisseur de 2 cm. Pour la face arrière nous avons utilisé le polystyrène expansé avec la même épaisseur (Figure IV.11). Pour une meilleure isolation thermique, le toit et le sol ont été isolés par deux couches : une couche de bois multiple et une couche de polystyrène expansé.

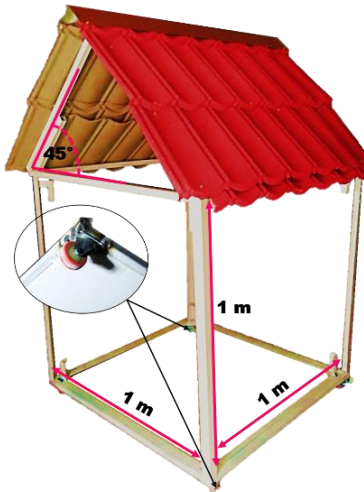


Figure IV.10 Structure fondamentale de Prototype de la maison passive.

Tableau IV.5 Paramètres géométriques du prototype de la maison solaire passive.

Désignation	Symbole	Dimension [m]
Hauteur du mur	H	1
Épaisseur du vitrage	a	0,003
Distance entre le vitrage et le mur massif	b	0,05
Épaisseur du mur massif	c	0,055
Hauteur d'ouverture de mur massif	d	0,1
Largeur d'ouverture de mur massif	e	0,2
Longueur totale du prototype	l	1
Largeur totale du prototype	L	1,108

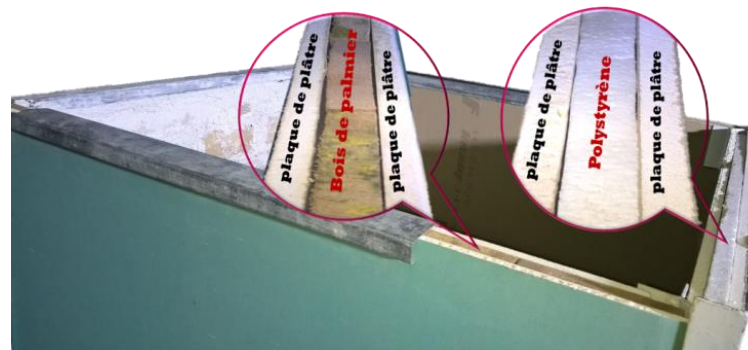


Figure IV.11 Composition des murs multicouche du prototype de la maison solaire.

Le mur de la façade du prototype exposé au soleil est construit par un matériau à inertie thermique. Il est réglable et démontable permettant ainsi de tester plusieurs types de matériaux. En première lieu, le mur de façade a été construit en pierres taillées issues des montagnes des Auers (région de Batna, commune de Bouzina) (Figure IV.12-a). Ensuite, il a été fabriqué en briques d'Adobe composées de terre mélangée à la paille et de l'eau (Figure IV.12-b). Nous avons utilisé, dans un moule sous forme parallélépipédique, un mélange de 70% terre, 20% paille et 10 % eau. L'épaisseur du mur à inertie thermique est d'environ 5,5 cm, il comporte deux ouvertures contrôlables en haut et en bas de 20 cm de long et 10 cm de large pour gérer les courants d'air et assurer le chauffage ou l'aération de la maison.



Figure IV.12 Matériaux à inertie thermique utilisés pour la construction du mur de la façade :
a: Pierres taillées, b: Adobe.

Pour l'expérimentation du prototype de la maison solaire passive, les températures de surface internes ont été mesurées à l'aide de thermocouples du type 'K' placés au centre des quatre surfaces intérieures. Ces thermocouples sont connectés à un enregistreur de données 'Testo 176 T4' (Figure IV.13-B) qui exporte les résultats de mesure vers un ordinateur via une connexion USB. D'autres thermocouples ont été utilisés pour mesurer les températures de l'air ambiant intérieur et de l'air ambiant extérieur dans la maison passive ainsi que la température du canal entre le vitrage et le mur Trombe. Les valeurs mesurées sont affichées sur un écran digital (Figure IV.13-C). Un capteur infrarouge de type 'Testo 830-T1' a été utilisé pour mesurer les températures des surfaces extérieures (Figure IV.13-D). Le rayonnement solaire qui atteint la façade de la maison passive a été mesurée à l'aide d'un pyranomètre 'Kipp & Zonen CM 5/6' (Figure IV.13-E) fixé sur la façade. Les données de la vitesse du vent et l'humidité relative sont importées de la station météorologique.

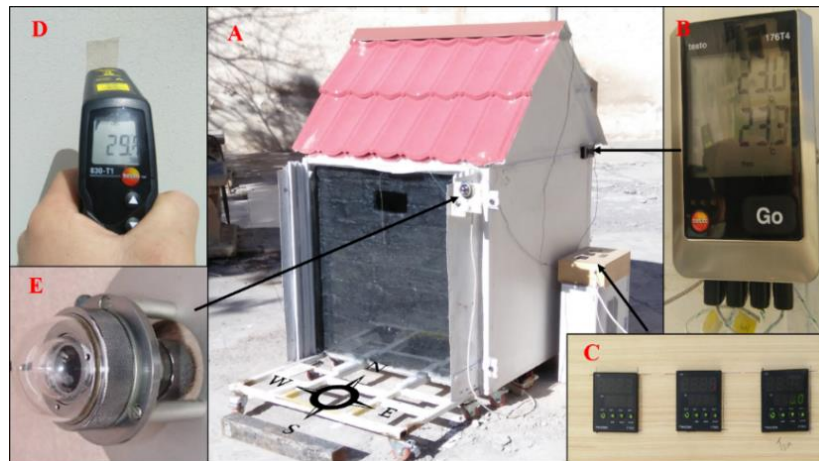


Figure IV.13 Dispositif expérimentale du prototype de la maison solaire passive.

IV.II.3 Principe de fonctionnement du mur Trombe

Le mur Trombe, appelé également mur à inertie thermique, est un mur plein de couleur noir mat, exposé au soleil et devant lequel on dispose un vitrage qui piège la chaleur, l'accumule et la diffuse dans la maison. La restitution, à l'intérieur de l'habitation, se fait de manière douce, continue et étalée dans le temps. Le percement, dans le mur, d'ouvertures basse et haute permet à l'air préchauffé d'être envoyé dans l'espace intérieur (Figure IV.14).

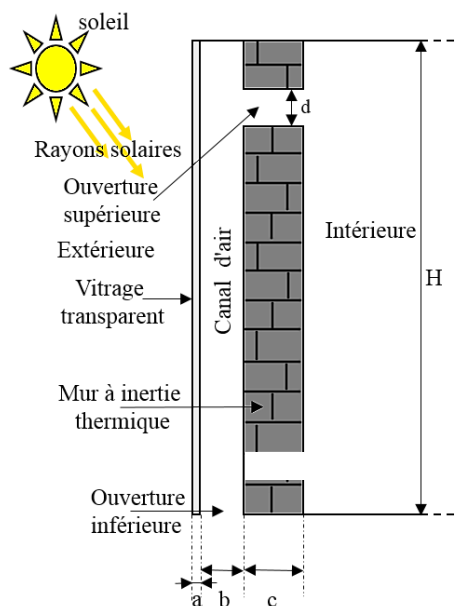


Figure IV.14 Mur Trombe.

Le mur Trombe peut être utilisé pour le chauffage (Figure IV.15-a) ou pour la ventilation naturelle (Figure IV.15-b), ce qui permet de réduire la consommation de l'énergie conventionnelle et les émissions des gaz à effet de serre correspondant.

Où α_g est l'absorptivité du vitrage, G la densité globale du flux de rayonnement solaire (W/m^2), T_{sky} est la température du ciel, elle est donnée par [3]:

$$T_{sky} = 0.0552T_{amb}^{1.5} \quad (\text{IV.3})$$

T_{amb} et T_g sont respectivement la température ambiante et celle du vitrage.

h_{ce} est le coefficient de transfert par convection, il est donné par [4]:

$$h_{ce} = 5.7 + 3.8V_{vent} \quad (\text{IV.4})$$

h_{re} est le coefficient de transfert thermique par radiation extérieur, il est donné par [4]:

$$h_{re} = \sigma \varepsilon_g (T_{sky}^2 + T_g^2)(T_{sky} + T_g) \quad (\text{IV.5})$$

Où ε_g est l'émissivité du vitrage, $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ est la constante de Stefan Boltzmann.

b- Surface intérieure du vitrage : La surface intérieure du vitrage est directement en contact avec le canal d'air du mur Trombe. Les échanges thermiques sont donc essentiellement : un échange convectif entre le vitrage et le canal d'air et un échange radiatif entre le mur massif et le vitrage. La densité du flux thermique sur la surface intérieure du vitrage s'écrit par [5]:

$$\Phi_v = h_g (T_g - T_c) + h_{rc} (T_{we} - T_g) \quad (\text{IV.6})$$

Où h_g et h_{rc} sont les coefficients de transfert de chaleur par convection et radiation entre la surface extérieure du mur et le vitrage, ils sont donnés par les équations suivantes :

$$h_g = \frac{Nu \lambda_f}{H} \quad (\text{IV.7})$$

$$h_{rc} = \sigma F_g (T_g^2 + T_{we}^2) (T_g + T_{we}) \quad (\text{IV.8})$$

T_{we} la température extérieure du mur massif, F_g est le facteur d'émission global entre le vitrage et la surface extérieure du mur :

$$F_g = \frac{1}{\left(\frac{1}{\varepsilon_g} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1 \right)} \quad (\text{IV.9})$$

c- Surface extérieure du mur massif : La densité du flux thermique sur la surface extérieure du mur massif est donné par [6]:

$$\Phi_m = h_w (T_{we} - T_c) + h_{rc} (T_{we} - T_g) + \Phi_w \quad (\text{IV.10})$$

Où T_c température de l'air dans le canal, Φ_w est la densité du flux de chaleur solaire absorbé par le mur massif, donnée par :

$$\Phi_w = \tau_g \alpha_w G \quad (\text{IV.11})$$

Où τ_g est la transmissivité du vitrage, α_w l'absorptivité du mur massif. Et h_w est le coefficient de transfert de chaleur par convection entre la surface extérieure du mur massive et l'air dans le canal, il est calculé par [6]:

$$h_w = \frac{\lambda Nu_H}{H} \quad (IV.12)$$

d- Convection dans le canal d'air : La densité du flux de chaleur transféré vers l'intérieur de la maison à travers l'ouverture peut s'écrire par la relation [5]:

$$\Phi_{conv} = h_w (T_{we} - T_c) + h_{rc} (T_g - T_c) \quad (IV.13)$$

$$h_w = h_g = \frac{Nu \lambda_f}{H} \quad (IV.14)$$

Le nombre de Nusselt est calculé à partir des corrélations proposées par Curchill et Chu [7], basées sur le nombre de Rayleigh:

Si $Ra_H > 10^9$, l'écoulement est turbulent et le nombre de *Nusselt* est donné par l'expression :

$$Nu = \left[0.825 + \frac{0.387 (Ra_H)^{1/6}}{\left[1 + (0.492/Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right]^2 \quad (IV.15)$$

Si $Ra_H < 10^9$, l'écoulement est laminaire et le nombre de *Nusselt* est donné par l'expression :

$$Nu = 0.68 + \frac{0.67 (Ra_H)^{1/4}}{\left[1 + (0.492/Pr)^{9/16} \right]^{4/9}} \quad (IV.16)$$

L'air entre dans le canal d'air à la température T_{amb} et sort à la température T_c . Le débit massique d'air dans le canal est calculé par :

$$\dot{m} = \rho V_{air} A_c \quad (IV.17)$$

Où : - V_{air} est la vitesse moyenne de l'air dans le canal en m/s ;

- A_c est la section de passage du canal d'air en m^2 ;

- ρ est la masse volumique de l'air qui varie avec la température en kg/m^3 ;

La vitesse moyenne V_{air} de l'air dans le canal est déterminée par [8]:

$$V_{air} = \left[\frac{2gH \cdot (T_c - T_{in})}{(C_1 (A_c / A_v)^2 + C_2) \cdot T_c} \right] \quad (IV.18)$$

Où :

- T_c est la température moyenne de l'air dans le canal en $^{\circ}C$,
- T_{in} est la température de l'air à l'intérieur de la pièce en $^{\circ}C$,

- H est la hauteur du mur massif en m,
- A_v est la surface d'ouverture en m^2 ,
- g est l'accélération gravitationnelle en m^2/s ,
- $C_1 = 8$ et $C_2 = 2$ sont des constantes empiriques déterminées par Utzinger [8].

L'énergie transportée à l'intérieur de la maison passive est donnée par [9]:

$$\Phi_{conv} = \frac{\dot{m}C_p (T_c - T_{in})}{A_w} \quad (IV.19)$$

e- Surface intérieure du mur massif : Des échanges convectifs et radiatifs se produisent entre la surface intérieure du mur massif et l'intérieur de la maison. La densité du flux thermique est donnée par [6]:

$$\Phi_{in} = (h_{ri} + h_{ci})(T_{wi} - T_i) \quad (IV.20)$$

h_{ri} est le coefficient radiatif sur la surface intérieure du mur massif, donné par l'expression:

$$h_{ri} = \sigma \varepsilon_w (T_{wi}^2 + T_{in}^2)(T_{wi} + T_{in}) \quad (IV.21)$$

Où ε_w est l'émissivité du mur massif, T_{wi} la température surfacique intérieur du mur massif, T_{in} la température intérieure de la maison solaire passive.

h_{ci} est le coefficient convectif de la surface intérieure du mur, calculé par:

$$h_{ci} = \frac{Nu \lambda_{fin}}{H} \quad (IV.22)$$

Le nombre de Nusselt est calculé à partir des corrélation relatives aux plaques verticales [2]:

$$\text{Si } 10^4 < Gr_H < 10^8 \quad \text{pour } Nu_H = 0.516 Ra_H^{1/4} \quad (IV.23)$$

$$\text{Si } 10^8 < Gr_H < 10^{12} \quad \text{pour } Nu_H = 0.117 Ra_H^{1/3} \quad (IV.24)$$

f- Efficacité thermique de la maison solaire passive :

Dans le cas du chauffage, l'efficacité thermique (η) de la maison solaire passive est définie comme le rapport de l'énergie absorbée (Φ_{conv}) à l'apport de l'énergie solaire reçue (G). Elle est donnée par l'expression [10]:

$$\eta = \frac{\Phi_{conv}}{G} \quad (IV.25)$$

Dans le cas du refroidissement, l'efficacité thermique du système est donnée par [11]:

$$\eta = \frac{\Phi_{conv}}{\Phi_{conv} + G} \quad (IV.26)$$

Où Φ_{conv} est le flux thermique due au flux d'air dans le canal, donnée par l'expression [12]:

$$\Phi_{conv} = \frac{\dot{m}C_p (T_c - T_{in})}{\gamma} \quad (IV.27)$$

Où γ est le coefficient moyen d'approximation de la température pris égal à 0,74 [13].

g- coefficient de ventilation global :

Le coefficient de ventilation global est défini comme étant le rapport entre la vitesse moyenne de l'air dans la maison passive (V_{int}) et la vitesse du vent à l'extérieur (V_{vent}). Une valeur proche de 1 signifie que la maison capte les courants d'air de l'extérieur. IL s'exprime par [14]:

$$k = \frac{V_{int}}{V_{vent}} \quad (IV.28)$$

A cause des variations modérées des températures dans le système à mur Trombe, on considère que les propriétés thermophysiques de l'air varient linéairement avec la température. Ces propriétés sont représentées dans le Tableau IV.6 [1]. Les propriétés thermophysiques des différents matériaux qui composent le mur Trombe sont résumées dans le Tableau IV.7 [8].

Tableau IV.6 Propriétés thermophysiques de l'air [1].

Propriété	Formule
Masse volumique	$\rho = 1,1614 - 0,00353 (T - 300)$
Chaleur spécifique	$C_p = [1,007 + 0,00004 (T - 300)] \times 10^3$
Viscosité dynamique	$\mu = [1,846 + 0,00472 (T - 300)] \times 10^{-5}$
Conductivité thermique	$\lambda = 0,0263 + 0,000074 (T - 300)$

Tableau IV.7 Propriétés thermophysiques des composants du mur Trombe.

Matériau	Masse volumique ρ kg/ m ³	Chaleur spécifique C_p J/kg K	Conductivité λ W/m °C	Absorptivité α	Emissivité ϵ	Transmissivité τ
Vitrage	2500	800	0,8	0,06	0,95	0,85
Adobe	1700	700	0,6	0,7	0,9	0,3
Pierre	2200	990	1,7	0,7	0,9	0,3
Aluminium	2700	870	200	0,23	0,95	0,7

IV.II.3.2 Système d'aération passive amélioré

Pour assurer un bon confort thermique, la maison solaire passive à mur Trombe doit également permettre une aération (ventilation) passive. Pour cela, nous avons essayé d'améliorer la ventilation de notre maison en utilisant un système amélioré d'aération passive que nous avons baptisé 'Eco-Cooler' (Figure IV.17).

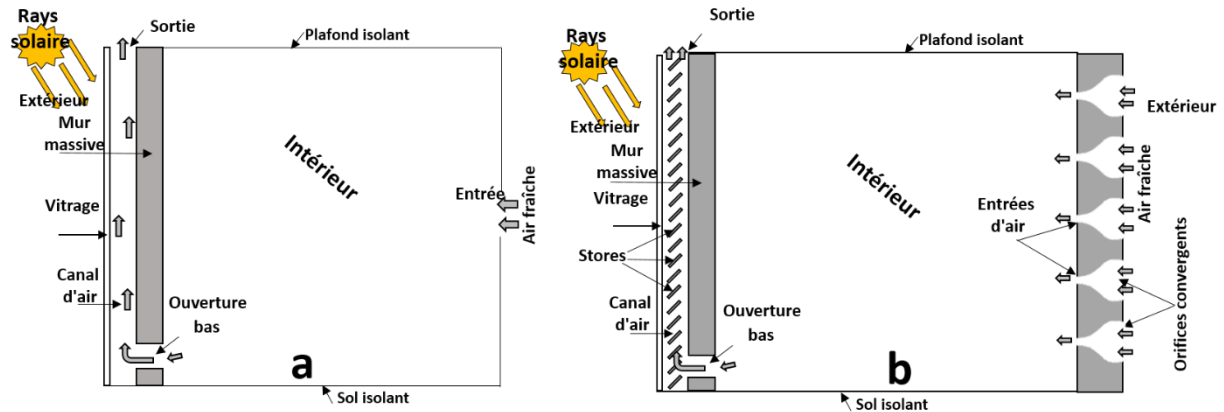


Figure IV.17 Schéma du système passif : a- refroidissement classique, b- refroidissement amélioré.

Le système 'Eco-Cooler' consiste à utiliser des orifices sous forme de convergent dans la face arrière de la maison solaire située à l'ombre et entourée par des arbres. L'air à l'arrière de la maison est nettement plus frais que celui près de la face avant exposée au soleil. A cause de leurs formes géométriques (réduction de la section de passage de l'air), les orifices permettent l'accélération de l'air qui les traverse (effet Venturi) et par conséquent améliorent le refroidissement de l'intérieur de la maison.

D'autre part, le système comporte des stores dans le canal d'air (entre le mur massif et le vitrage). Le système à mur Trombe classique reçoit directement les rayons solaires, tandis que celui avec des stores (inclinés de 45° entre le vitrage et le mur massif) permet de réfléchir une partie de ces rayons et d'éviter ainsi la surchauffe du système [15].

V. Conclusion

Dans cette partie du travail, nous avons essayé d'estimer les performances thermiques d'un prototype d'une maison solaire passive utilisant le système à mur Trombe. Le prototype a été réalisé et testé sous les conditions climatiques hivernales et estivales semi-arides de la ville de Batna. Des matériaux de construction locaux (l'adobe et la pierre des montagnes des Aurès) ont été utilisés pour bâtir ce prototype et un matériau biosourcé issu des troncs des palmiers-dattiers a été utilisé pour son isolation thermique. Les deux modes passifs, chauffage et ventilation (refroidissement) ont été traités dans cette étude.

Références Bibliographiques

- [1] Rabani M, Kalantar V, Rabani M. Heat transfer analysis of a Trombe wall with a projecting channel design. *Energy*, 2017, 134:943–950.
- [2] Dimassi N, Dehmani L. Experimental heat flux analysis of a solar wall design in Tunisia. *Journal of Building Engineering*, 2016, 8:70–80.
- [3] Abdeen A, Serageldin A A, Ibrahim M. G. E, El-Zafarany A, Ookawara S, Murata R. Experimental, analytical, and numerical investigation into the feasibility of integrating a passive Trombe wall into a single room. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 154: 751–768.
- [4] Shen J, Lassue S, Zalewski L, Huang D. Numerical study of classical and composite solar walls by TRNSYS. *Journal of Thermal Science*, 2007, 16:46–55.
- [5] Shen J, Lassue S, Zalewski L, Huang D. Numerical study on thermal behavior of classical or composite Trombe solar walls. *Energy and Buildings*, 2007, 39:962–974.
- [6] Bejan A. HEAT TRANSFER. John Wiley & Sons, 1993,160–189.
- [7] Churchill S W, Chu H H S. Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical. 1975, 18:1323–1329.
- [8] Abbassi F, Dimassi N, Dehmani L. Energetic study of a Trombe wall system under different Tunisian building configurations. *Energy and Buildings*, 2014, 80:302–308.
- [9] Dragičević S, Lambic M. Influence of constructive and operating parameters on a modified Trombe wall efficiency. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2011, 11:825–838.
- [10] Hong X, He W, Hu Z, Wang C, Ji J. Three-dimensional simulation on the thermal performance of a novel Trombe wall with venetian blind structure. *Energy and Buildings*, 2015, 89:32–38.
- [11] Li Y, Liu S. Experimental study on thermal performance of a solar chimney combined with PCM. *Applied Energy*, 2014, 114:172–178.
- [12] Bansal N K, Mathur J, Mathur S, Jain M. Modeling of window-sized solar chimneys for ventilation. *Building and Environment*, 2005, 40:1302–1308.
- [13] Ong K S, Chow C C. Performance of a solar chimney. *Solar Energy*, 2003, 74:1–17.
- [14] Joffroy T, Misse A, Celair R, Rakotomalala L. Architecture bioclimatique et efficacité énergétique des bâtiments au Sénégal. 2017.
- [15] Hazem A, Ameghchouche M, Bougriou C. A numerical analysis of the air ventilation management and assessment of the behavior of double skin facades. *Energy and Buildings*, 2015, 102:225–236.

Chapitre V

Résultats et discussions

V.1 Introduction

Les conditions de confort thermique à l'intérieur des habitats dépendent des conditions climatiques, de l'architecture du bâtiment, des matériaux utilisés et des apports énergétiques (chauffage ou climatisations). De plus, la conception de bâtiments impliquant une utilisation passive de l'énergie solaire doit être adaptée non seulement aux conditions climatiques, mais également à l'environnement local et à l'emplacement et l'orientation géographique du bâtiment.

Dans cette partie, nous présentons les résultats des essais du prototype de la maison solaire passive dans les conditions météorologiques semi-arides de Batna. Une simulation numérique utilisant le logiciel Fluent a été réalisée dans le but de valider les résultats expérimentaux. Nous présentons, en premier lieu, le chauffage ensuite le refroidissement (ventilation) de notre maison solaire passive.

V.2 Chauffage solaire passive

V.2.1 Détermination de l'orientation optimale

Afin d'identifier l'orientation optimale relative à la région semi-aride de Batna, des mesures ont été effectuées sur le prototype de la maison passive pour plusieurs orientations (160° Sud-est, 180° Sud, et 200° Sud-Ouest) comme il est indiqué sur la Figure V.1.

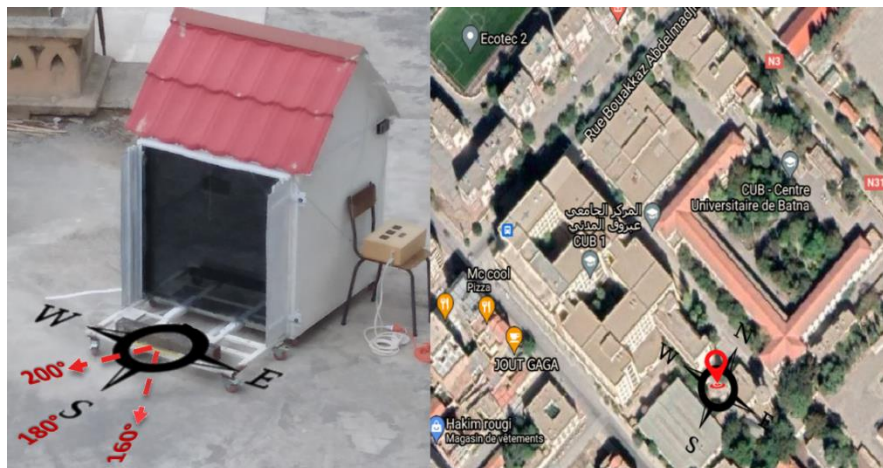


Figure V.1 Les différentes orientations étudiées dans le site de la faculté de Technologie.

Les températures surfaciques et ambiantes ont été mesurées toutes les 15 minutes de 10h00 à 15h00. Les évolutions des températures, de l'humidité relative, de la vitesse du vent et du rayonnement solaire pour diverses orientations et pour un mur Trombe en Adobe sont illustrées sur la Figure V.2. Ces mêmes évolutions pour un mur Trombe en pierre sont

présentées dans la Figure V.3. Dans les deux cas les températures mesurées sont celles de l'air intérieur, de l'air extérieur et du 'canal d'air' compris entre le mur massif et le vitrage.

Les températures moyennes dans la maison et dans le canal d'air pour différentes orientations correspondant aux façades en Adobe et en pierre sont également présentées dans le Tableau V.1.

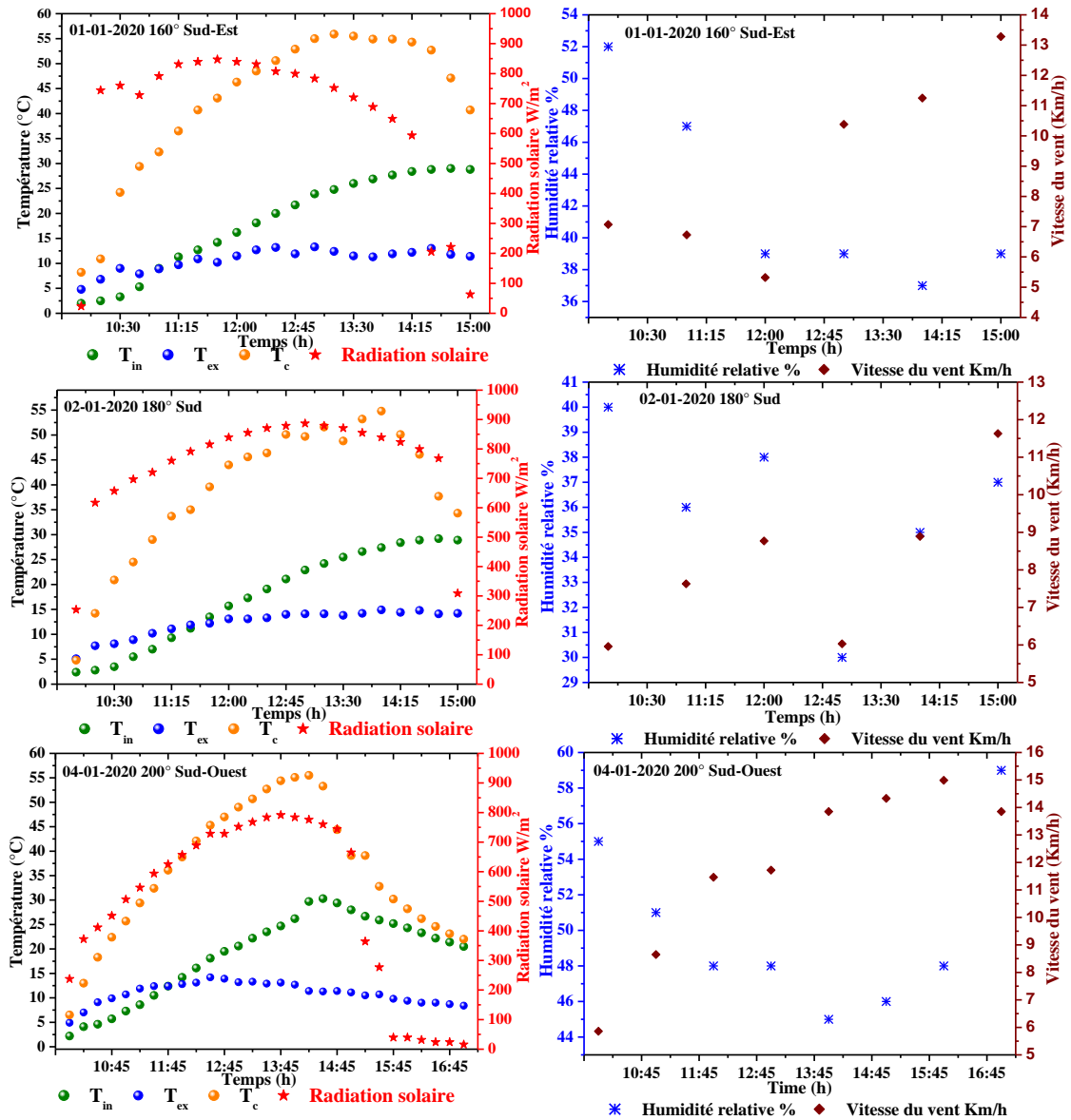


Figure V.2 Evolutions des températures, de l'humidité relative, de la vitesse du vent et du rayonnement solaire pour diverses orientations et pour une façade en Adobe.

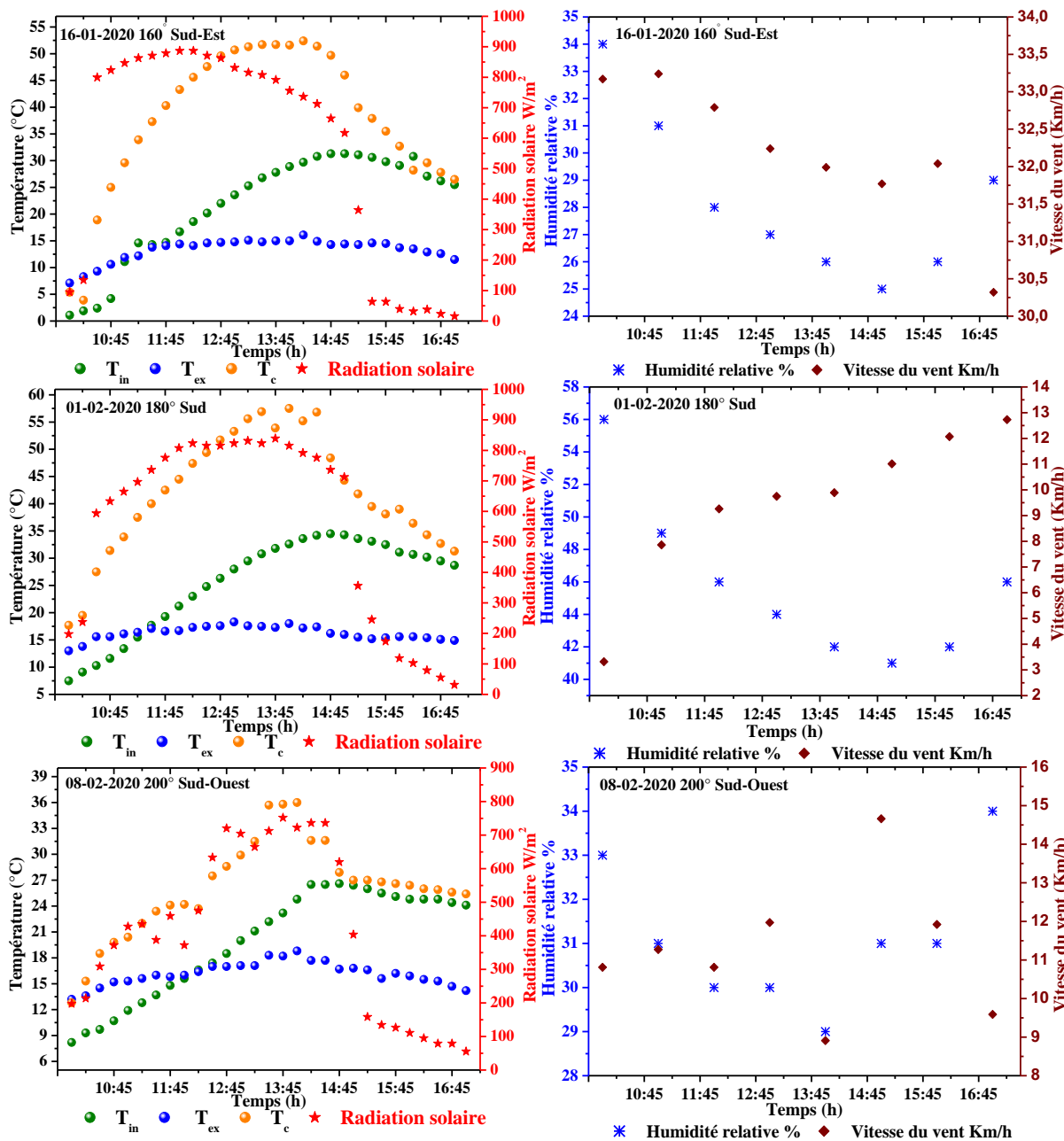


Figure V.3 Evolution des différentes températures, rayonnement solaire, humidité relative et vitesse du vent au diverses orientations avec la façade en pierre.

Tableau V.1 Températures moyennes internes et du canal d'air pour différentes orientations.

Orientation	Façade en Adobe								
	160° Sud-Est			180° Sud			200° Sud-Ouest		
Radiation solaire W/m ²	T _i [°C]	T _c [°C]	T _c - T _i	T _i [°C]	T _c [°C]	T _c - T _i	T _i [°C]	T _c [°C]	T _c - T _i
650 – 720	12,6	39,7	27,1	11,3	36,2	24,9	10,6	32,4	21,8
720 – 800	25,8	55,2	29,4	25,3	51,6	26,3	23,4	52,3	28,9
	Façade en Pierre								
	650 – 720	14,2	36,8	22,6	17,4	30,5	13,1	13,4	22,8
720 – 800	26,4	51,4	25	39,6	55,4	15,8	22,2	49,7	27,5

On peut constater à partir des figures V.2 et V.3 et du Tableau V.1 que, la différence de température maximale entre le canal d'air et l'intérieur de la maison solaire est obtenue pour l'orientation '160° Sud-Est'. Sachant que c'est cette différence de température qui détermine la quantité de chaleur transférée vers l'intérieur de la maison solaire pour chaque orientation. D'où, l'orientation optimale pour la région semi-aride de Batna est '160° Sud-Est'. C'est les résultats relatifs à cette orientation optimale qui seront analysés pour le reste du travail.

V.2.2 Détermination de l'efficacité thermique de la maison solaire

D'après le Tableau V.1, la différence de température la plus importante qui cause la plus grande quantité de chaleur transférée vers l'intérieur de la maison est obtenue pour le mur de stockage en Adobe. Ceci est confirmé par la valeur du débit d'air chaud dans le 'canal d'air' (situé entre le vitrage et le mur Trombe) pour l'orientation optimale qui est présenté sur la Figure V.4. La plus grande valeur du débit d'air est obtenue pour le mur en Adobe. En effet, le débit d'air chaud permet de déterminer la densité du flux de chaleur transféré par convection naturelle vers l'intérieur de la maison solaire à travers les orifices situés en haut du mur Trombe (étant donné que la densité du flux thermique est égale au flux d'air multiplié par la différence de température entre le canal d'air et l'intérieur de la maison). Concernant le début (10H00) et la fin (15H00) de la période d'essais, le débit d'air correspondant à la façade en pierre est supérieur à celui de la façade en Adobe. Ceci est dû au fait que l'inertie thermique de la pierre est meilleure que celle de l'Adobe. D'où, la pierre s'échauffe rapidement et cède la chaleur lentement par rapport à l'Adobe.

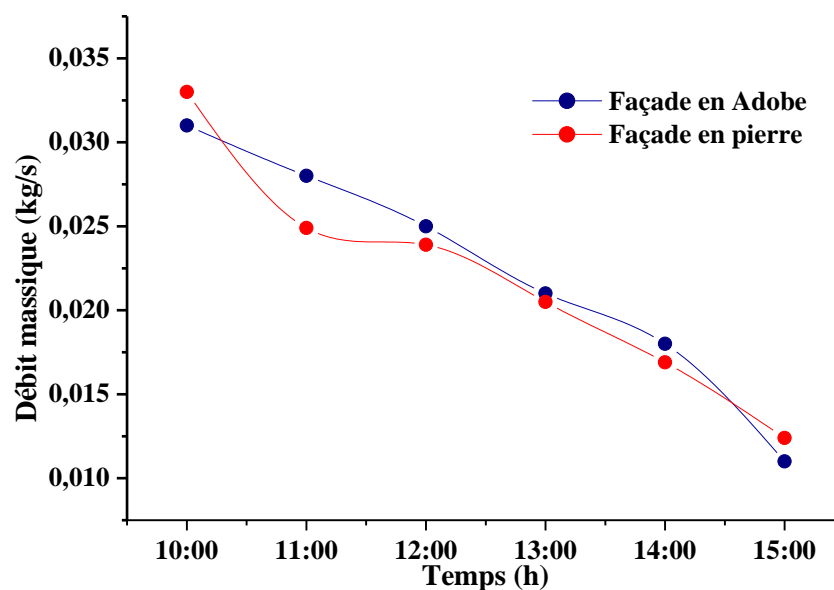


Figure V.4 Débit d'air dans le canal entre le vitrage et le mur Trombe pour l'orientation optimale.

Le transfert de chaleur dans le canal est similaire à celui qui s'effectue par convection naturelle entre deux plaques verticales parallèles (le mur massif et le vitrage). Le coefficient de transfert de chaleur convectif moyen dans le canal d'air (équation IV.14) est représenté sur la Figure V.5.

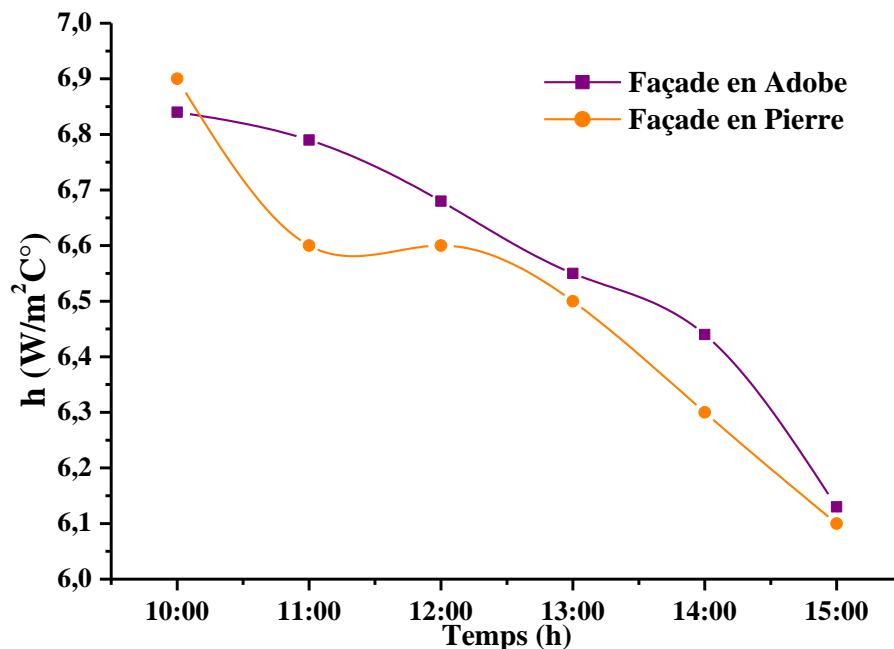


Figure V.5 Evolution des coefficients de transfert de chaleur convectifs dans le canal d'air.

Il est clair que le taux de transfert de chaleur dans le canal d'air pour la façade en Adobe est bien supérieur à celui relatif à la façade en pierre. D'où, la quantité de chaleur introduite à l'intérieur de la maison avec un mur Trombe en Adobe est meilleure que celle d'un mur en pierre.

Le flux thermique solaire absorbé par le mur massif de la maison est présenté sur la Figure V.6. Le mur en pierre qui possède une meilleure inertie thermique, absorbe un flux de chaleur légèrement supérieur à celui absorbé par le mur en Adobe. Une partie de ce flux absorbé est ensuite restitué directement vers l'intérieur de la maison, par convection libre, via la façade interne du mur massif. L'autre partie est restituée, principalement, par conduction vers le canal d'air (ayant une faible épaisseur). Cependant, le flux (rayonnement) solaire réfléchi par le mur massif en Adobe est supérieur à celui du mur en pierre. Ce rayonnement (infrarouge) piégé dans le canal d'air (à cause de l'effet de serre dû au vitrage), contribue à l'augmentation de la température de l'air dans ce canal. En conséquence, le flux thermique transféré à l'intérieur de la maison solaire passive via l'orifice supérieur est meilleur pour le mur massif en Adobe. Ceci est confirmée par la Figure V.7 de l'efficacité thermique solaire (équation IV.25)

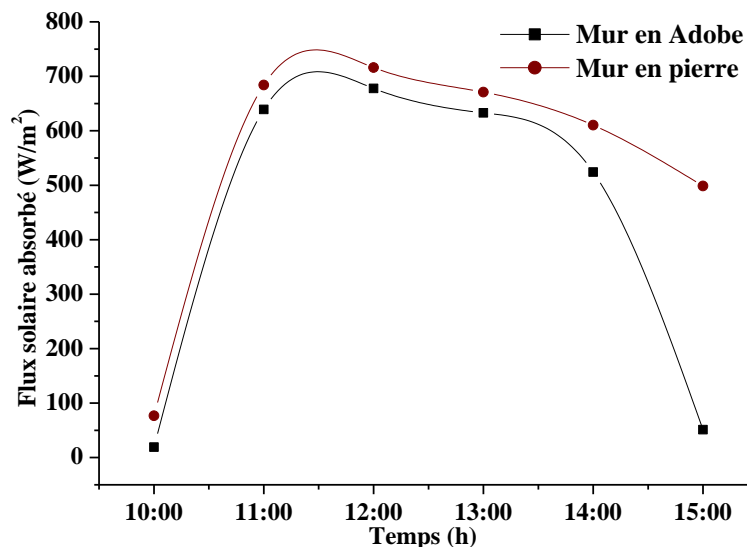


Figure V.6 Flux de chaleur absorbé par le mur : a- façade en Adobe, b- façade en Pierre.

En effet, l’efficacité thermique du prototype de la maison solaire passive avec une façade en Adobe est nettement supérieure à celui avec une façade en pierres. Cette efficacité thermique atteint un maximum de 50 % pour le mur en Adobe alors qu’elle atteint un maximum de 30,7 % pour le mur en pierre. Cela est dû au gradient de température entre le ‘canal d’air’ et l’intérieur de la maison solaire passive qui est plus grand pour la façade en Adobe (Figure V.8).

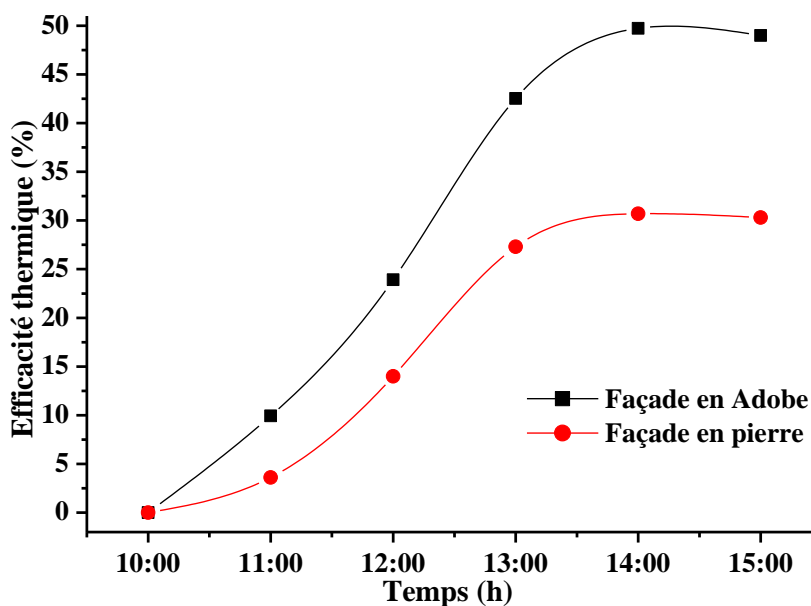


Figure V.7 Efficacité thermique solaire de la maison passive.

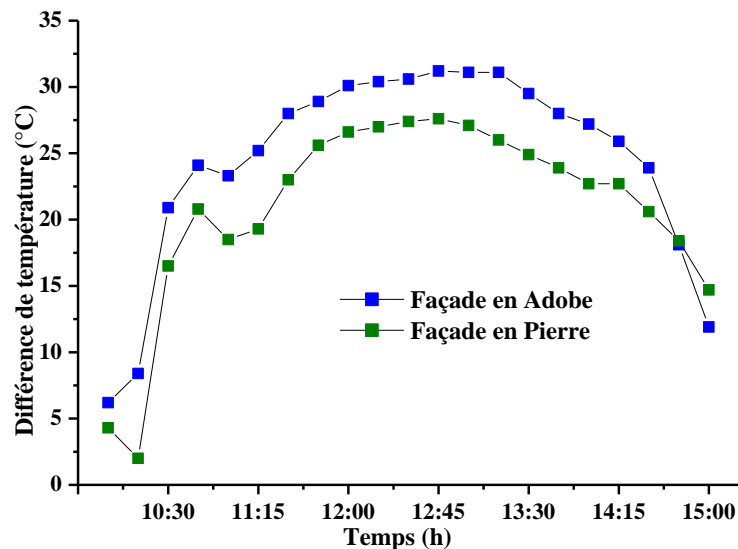


Figure V.8 Gradient de température entre le 'canal d'air' et l'intérieur de la maison passive.

En se basant sur les résultats obtenus pour le prototype de la maison solaire passive, utilisant le système à mur Trombe, nous pouvons affirmer que la conception du système de chauffage passive proposé a assuré des conditions de confort thermique suffisantes, avec une variation minimale de température à l'intérieur de la maison.

V.2.3 Résultats de la simulation numérique

Dans le but de valider les résultats des tests expérimentaux, une simulation numérique sur l'écoulement et le transfert de chaleur dans la maison passive a été réalisée à l'aide du code CFD FLUENT. Dans cette simulation, nous avons choisi un modèle stationnaire bidimensionnel pour résoudre les équations de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie de l'air en utilisant la méthode des volumes finis. Cette résolution nous a permis d'appréhender les champs hydrodynamique et thermique dans la maison solaire passive. Pour le couplage vitesse-pression, nous avons opté pour l'algorithme SIMPLE. La discrétisation de la pression est obtenue par un schéma standard et un schéma du second ordre décentré est choisi pour la discrétisation des équations de quantité de mouvement et d'énergie. Nous avons utilisé l'hypothèse de Boussinesq et nous avons considéré que les propriétés thermophysiques de l'air varient linéairement avec la température (Tableau IV.6).

Concernant les conditions aux limites, nous avons choisi les données expérimentales d'une journée d'hiver typique pour l'entrée du 'canal d'air' (01 janvier 2020, l'orientation optimale 160° Sud-Est, l'efficacité thermique solaire maximale de 50% avec façade en Adobe). Tous les murs sont considérés adiabatiques à l'exception du mur de stockage thermique. Le vitrage a été considéré comme une paroi en convection forcée externe (Figure V.9).

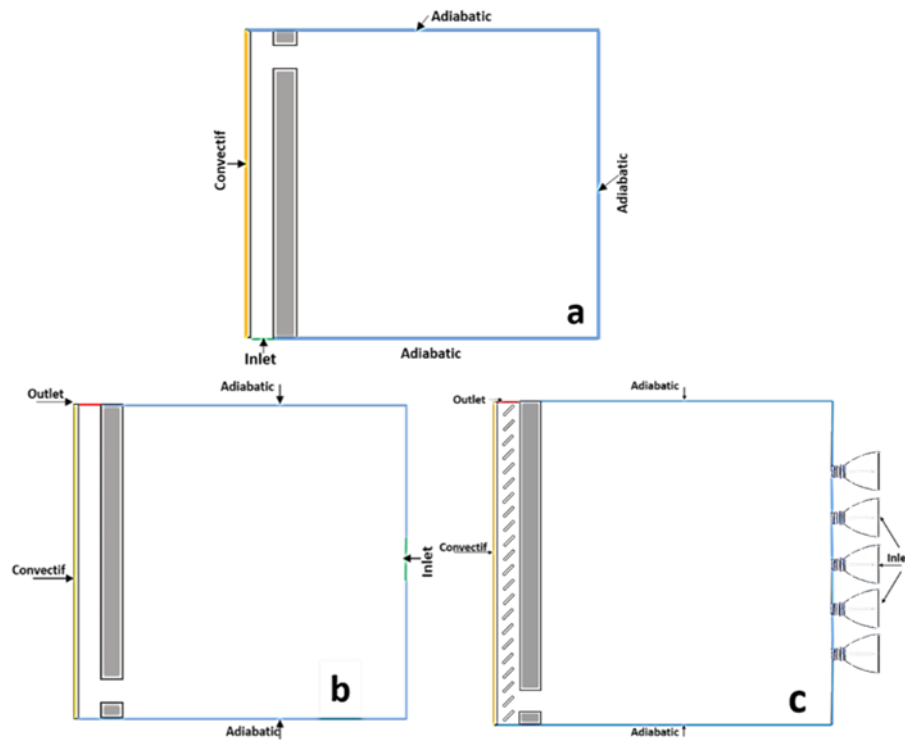


Figure V.9 Schéma des conditions aux limites du système : a- chauffage classique, b- refroidissement classique et c- refroidissement amélioré.

Les résultats de la simulation sont présentés sous forme de champs de température (Figure V.10) et de vitesses (Figure V.11).

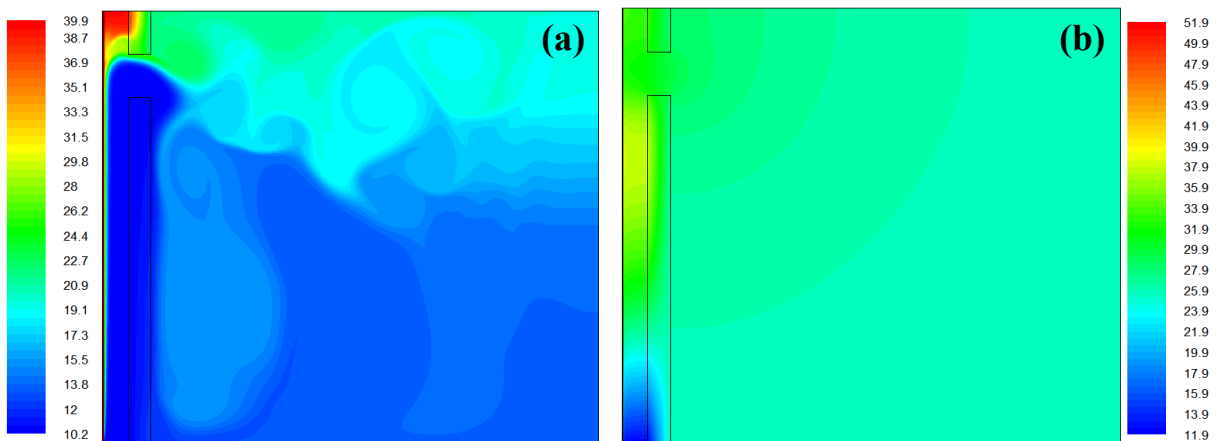


Figure V.10 Champs de température dans la maison solaire passive [°C] : a- 11h30, b- 14h00.

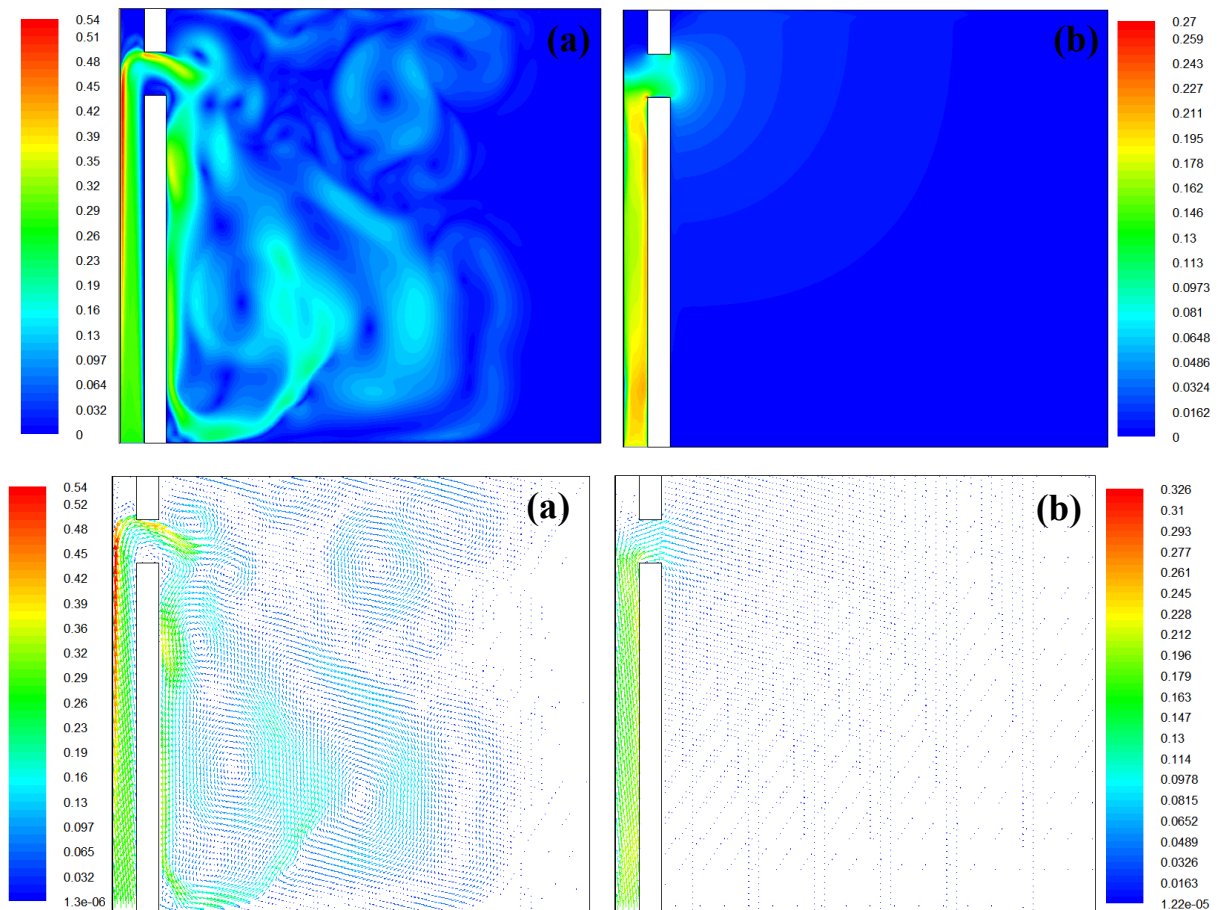


Figure V.11 Champs et vecteurs de vitesses dans la maison passive : a- 11h30, b- 14h00.

Deux instants différents de cette journée d'hiver ont été choisis le matin (au début du processus de chauffage) et l'après-midi (phase de saturation) pour suivre l'évolution du comportement thermique de la maison passive et valider le modèle à ces moments. Après une heure et demie de chauffage passif, à 11h30 le gradient de température entre le mur de stockage et l'intérieur de la maison commence à s'établir mais il est à sa valeur minimale. En conséquence, le mur de stockage commence le chauffage de l'air dans le canal. Puis, grâce à la force de flottabilité, l'air chaud pénètre dans l'intérieur de la maison solaire passive par l'ouverture supérieure du mur Trombe comme le montre les Figures V.10-a et V.11-a. L'air le plus proche du toit se réchauffe plus tôt que la partie inférieure, ce qui entraîne la naissance d'un gradient de température (Figure V.9-a). L'après-midi (à 14h00), la répartition de la vitesse à l'intérieur de la maison devient uniforme (Figures V.10-b et V.11-b). Le gradient de température devient très faible par rapport à la période matinale (période de démarrage du chauffage). Dans ce cas, la température à l'intérieur de la maison est uniforme (Figure V.9-b), et les fluctuations de la température sont très faible voire inexistante, ce qui donne un bon

confort thermique. Les résultats de la simulation numérique sont en bon accord avec les tests expérimentaux, comme le montre le Tableau V.2. L'erreur relative est acceptable pour la température interne et l'efficacité thermique solaire.

Tableau V.2 Erreur relative entre les valeurs de la simulation numérique et les données expérimentales.

Température interne (°C)	Période	
	11h30	14h00
Expérimentale	14,2	27,7
Simulation	13,9	25,9
Erreur %	2,11	6,49
Efficacité thermique solaire (%)		
Expérimentale	22,4	49,7
Simulation	21,9	49,1
Erreur %	2,23	1,20

V.3 Refroidissement solaire passif

Pour le refroidissement passif, nous présentons les résultats obtenus par simulation numérique pour deux cas, un système de refroidissements passifs classiques et un autre améliorés (décrits en détails dans le chapitre précédent). Les mêmes conditions climatiques réelles ont été appliquées pour comparer les deux systèmes. Ces conditions correspondent à une journée très chaude de la saison estivale pour la région semi-aride de Batna (20 août 2020). L'évolution journalière de la radiation solaire moyenne et de la température externe et celle à l'ombre est montré sur la Figure V.12. On peut remarquer que les valeurs maximales sont obtenues entre 13h00 et 15h00. On peut également constater que la différence entre la température externe et celle à l'ombre est importante (elle est de 15°C à 14h00). La Figure V.13 montre l'évolution journalière de la vitesse du vent et du coefficient moyen de transfert de chaleur par convection sur la surface externe du vitrage. Il faut souligner qu'il y a une relation étroite entre la variation de la vitesse du vent et celle du coefficient de transfert de chaleur par convection.

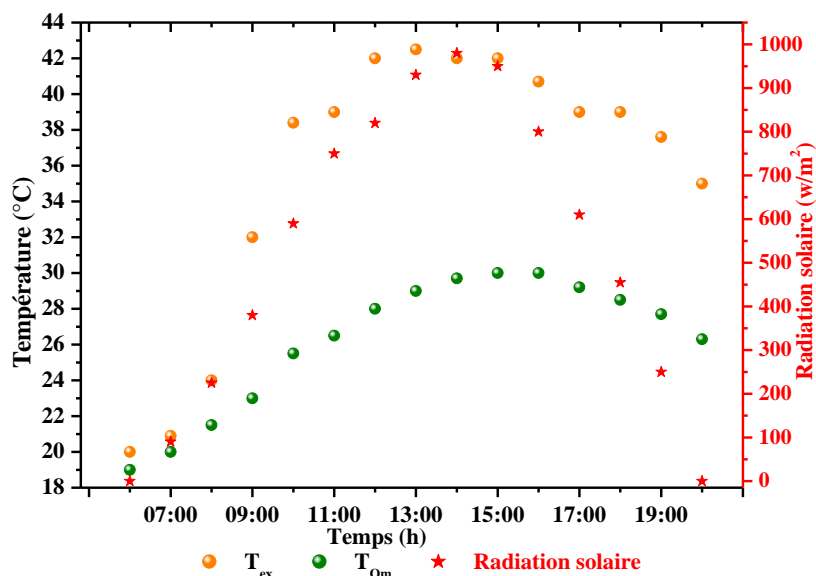


Figure V.12 Evolution journalière des températures et de la radiation solaire.

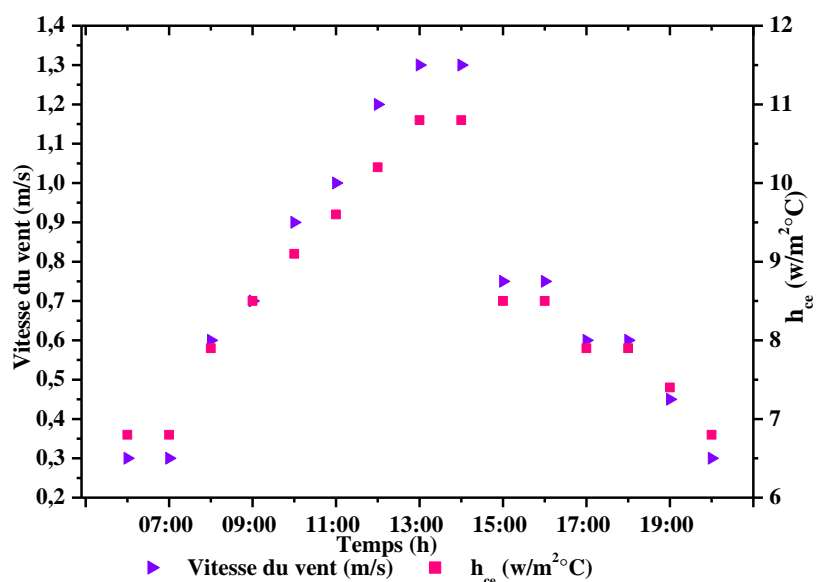


Figure V.13 Evolution journalière de la vitesse du vent et du coefficient convectif.

Les données issues des Figures V.12 et V.13 ont été introduites dans la simulation numérique pour obtenir les champs de vitesses et de températures à l'intérieur de la maison solaire pour les deux systèmes de refroidissement passif (classique et amélioré). Les champs de température et de vitesse pour les deux systèmes de refroidissement solaire passif sont représentés sur les Figures V.14 et V.15 respectivement. Ces résultats correspondent aux valeurs maximales obtenus pour la température extérieure et le rayonnement solaire 14h00 (pic des conditions climatiques, voir Figure V.12).

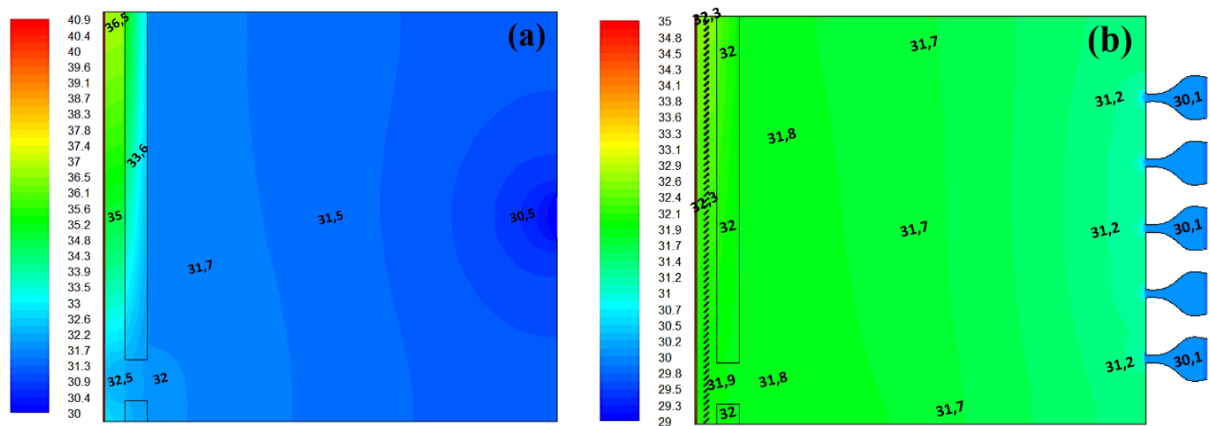


Figure V.14 Champs de températures à 14h00 : a- système classique, b- système amélioré.

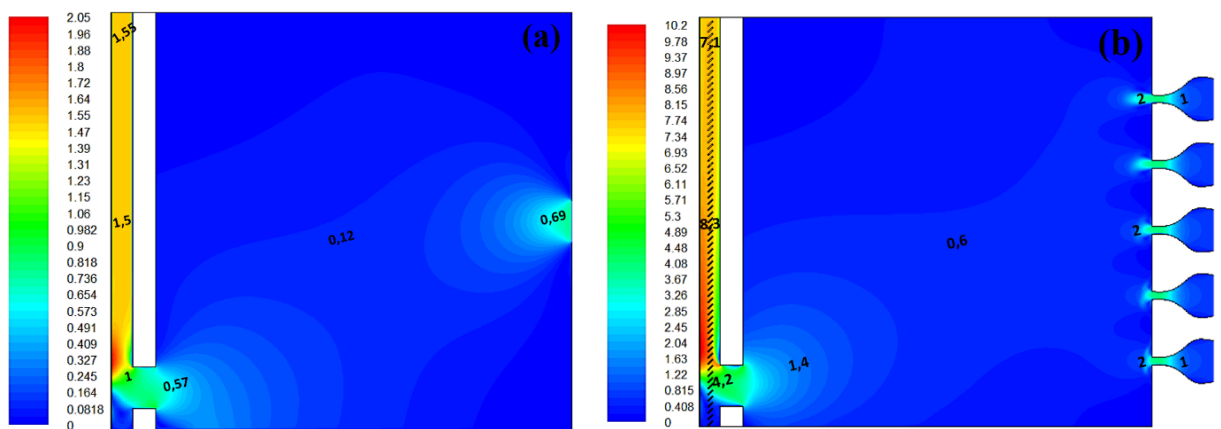


Figure V.15 Champs de vitesses à 14h00 : a- système classique, b- système amélioré.

On remarque que les deux systèmes permettent de réduire la température à l’intérieur de la maison solaire par rapport à la température externe qui est autour de 43 °C à 14h00. Cependant, le système de refroidissement amélioré permet d’obtenir des températures plus homogènes que le système classique. Les stores placés entre le vitrage et le mur massifs réduisent le flux solaire incident sur ce mur et, par conséquent, les températures de celui-ci sont inférieures à celle du système sans stores. D’autre part, la vitesse d’évacuation de l’air à partir de l’orifice inférieur du système classique est nettement inférieure à celle du système amélioré. Ce qui permet à ce dernier d’évacuer une quantité importante d’air (étant donné que la section de passage est la même pour les deux systèmes). Ce procédé permet à l’air de circuler rapidement de l’intérieur vers l’extérieur, assurant ainsi un renouvellement et une fraîcheur à l’intérieur de la maison.

Pour une comparaison qualitative des deux systèmes étudiés, nous présentons les résultats de la vitesse et température moyennes le long d’une ligne médiane verticale dans le canal d’air. À partir des Figures V.16 et V.17, on constate que la température moyenne dans le système de refroidissement passif amélioré est toujours plus basse que celle du système de refroidissement classique. Cependant, le contraire est remarqué pour la vitesse moyenne de l’air.

En effet, cette dernière représente la vitesse d'évacuation de l'air par convection libre vers l'extérieur de la maison. Elle représente également la vitesse de remplacement de l'air à l'intérieur de la maison par l'air plus frais en provenance de l'arrière de la maison situé à l'ombre et entouré par la végétation. Les valeurs moyennes de la température et de la vitesse dans le canal d'air, données dans le Tableau V.3, confirme notre constatation (le système de refroidissement passif amélioré et plus performant que le système classique).

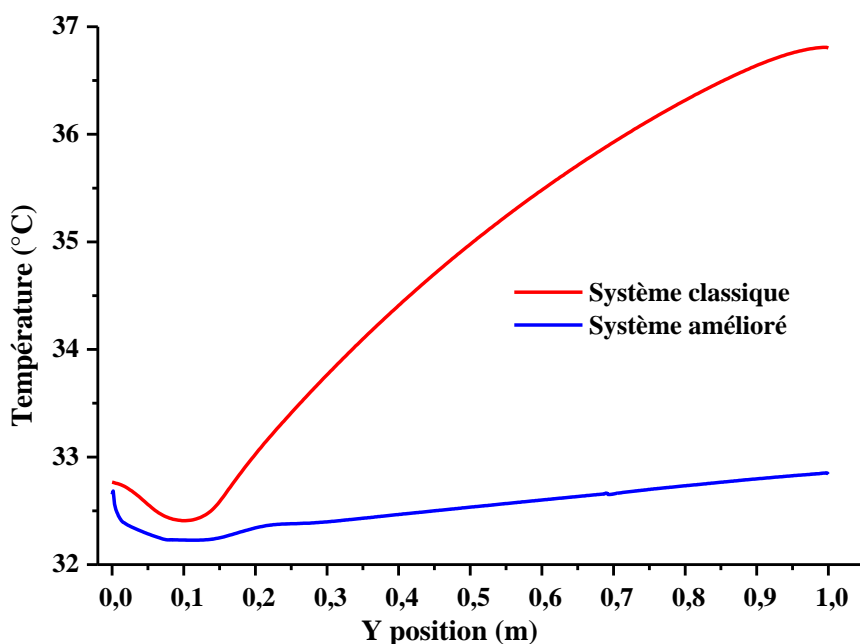


Figure V.16 Variation de la température le long d'une ligne verticale dans le canal d'air.

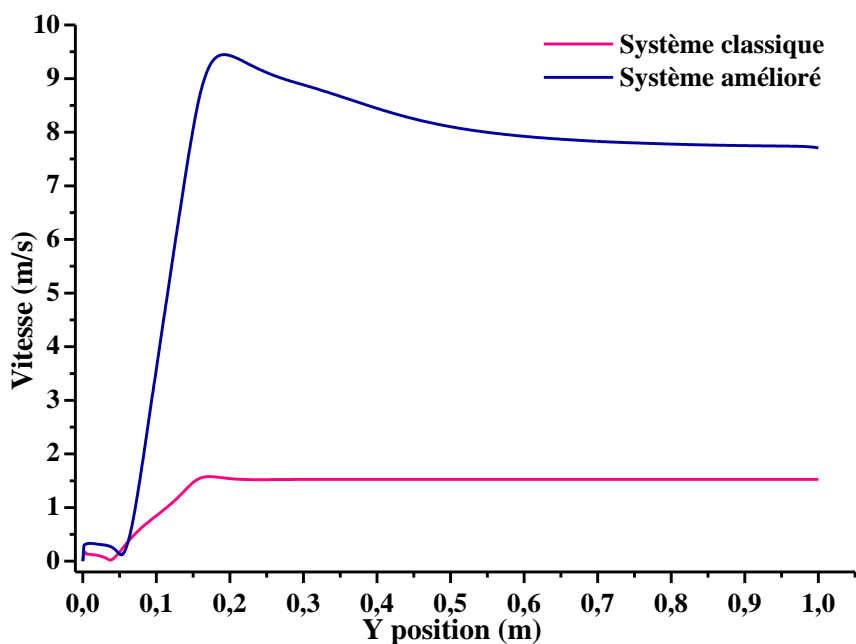


Figure V.17 Variation de la vitesse le long d'une ligne verticale dans le canal d'air.

Tableau V.3 Température et vitesse moyennes dans le canal d'air pour les deux systèmes.

Type de système passif	Température moyenne (°C)	Vitesse moyenne (m/s)
Classique	34,7	1,8
Amélioré	32,5	7,8

En comparant les températures et vitesses moyennes, dans les différentes parties des deux systèmes de refroidissement passif classique et améliorés (voir Tableau V.4). Il apparaît clairement que la température moyenne du système passif amélioré est toujours inférieure à celle du système passif classique. Cependant, la vitesse moyenne reste élevée dans le système amélioré.

Tableau V.4 Comparaison des différents paramètres entre les deux systèmes passifs.

Type de système de refroidissement	Vitrage		Canal d'air		Mur massif		Air Intérieur	
	T _m (°C)	V _m (m/s)	T _m (°C)	V _m (m/s)	T _m (°C)	V _m (m/s)	T _m (°C)	V _m (m/s)
Classique	40,9	/	35,2	1,3	34,7	/	31,4	0,16
Amélioré	34,7	/	32,7	6,5	32,1	/	31,4	0,5

Ces constatations permettent de vérifier l'efficacité des techniques auxiliaires du mur Trombe avec stores combiné au système 'Eco-Cooler' pour améliorer le processus de refroidissement passif. Les résultats de la simulation numérique ont prouvé que le processus de refroidissement (ventilation) passif amélioré est capable d'atteindre un confort thermique adéquat et une meilleure circulation et distribution d'air frais. A travers les valeurs du coefficient de ventilation de la Figure V.18, il est clair que le système passif amélioré est plus performant que le système classique. On remarque une amélioration considérable à 14h00 lorsque le rayonnement solaire atteint son maximum, puisque la vitesse de ventilation dépend du gradient de température entre l'intérieur et l'extérieur de la maison.

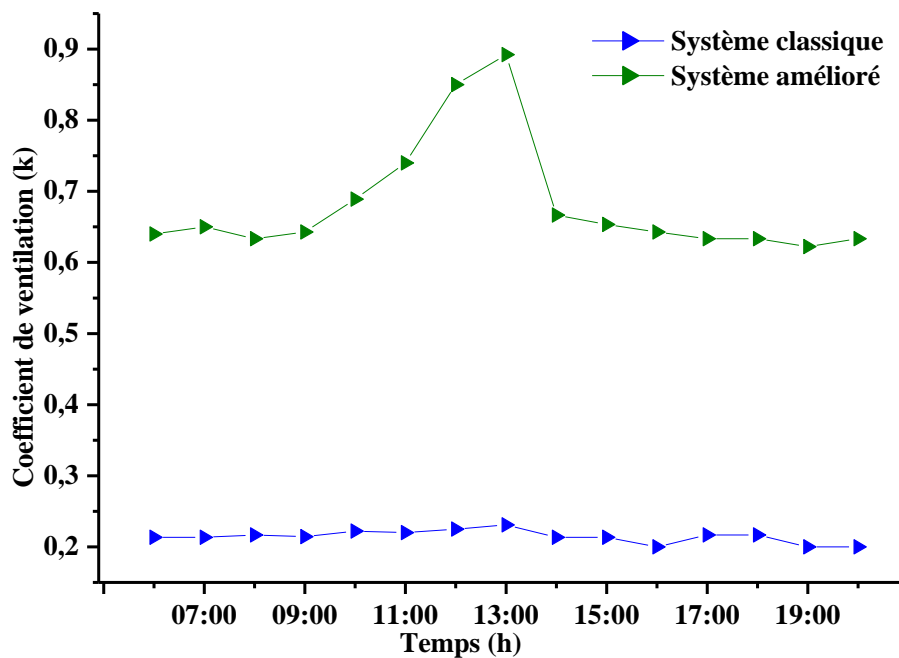


Figure V.18 Coefficients de ventilation du système de refroidissement passifs.

L'efficacité thermique des deux systèmes de refroidissement passif est représentée sur la Figure V.19. On remarque que le système de refroidissement amélioré est plus efficace que le système classique entre 10h00 et 16h00. Ces instants correspondent au rayonnement solaire et aux températures externes les plus élevés de la journée (voir Figure V.12). En conséquence, le système de refroidissement amélioré convient mieux aux conditions climatiques estivales extrêmes (rayonnement solaire et température externe élevés). Ces conditions donnent naissance à des gradients de température élevés, entre l'intérieure et l'extérieure de la maison passive, d'où des débits d'air évacué élevés. Ceci permet une meilleure ventilation (refroidissement) et donc un meilleur confort thermique.

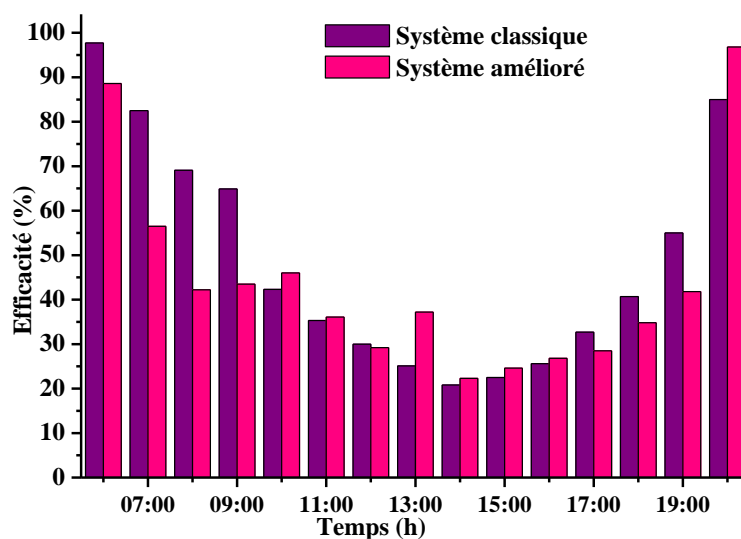


Figure V.19 Efficacité de refroidissement des systèmes passifs classique et amélioré.

V.4 Conclusion

Pour atteindre l'objectif de bâtiments durables et moins énergivores, l'utilisation du système solaire passif à mur Trombe s'est avéré une solution prometteuse permettant de générer des gains de chaleur importants pour les besoins de chauffage et de refroidissement.

Les tests expérimentaux menés sur le prototype de la maison solaire passive, réalisée à la Faculté de Technologie de l'Université Batna 2, ont permis de déterminer l'orientation optimale pour ce site (160° Sud-Est). D'autre part, l'utilisation de matériaux de construction locaux (Adobe et pierres) pour le mur de stockage thermique et d'un matériau biosourcé pour l'isolation thermique a prouvé son efficacité pour ce système de chauffage passif.

Les résultats de cette étude ont montré que la plus grande quantité de chaleur transférée vers l'intérieur de la maison solaire passive est obtenue pour le mur de stockage en Adobe pour l'orientation optimale. De même, la plus importante valeur du débit d'air chaud dans le 'canal d'air' est obtenue pour le mur en Adobe. Ce débit d'air est transféré par convection naturelle vers l'intérieur de la maison solaire à travers les orifices situés en haut du mur Trombe.

Les résultats ont également montré que le taux de transfert de chaleur dans le canal d'air pour la façade en Adobe est bien supérieur à celui pour la façade en pierre. Quoique le mur en Adobe absorbe un flux de chaleur légèrement inférieur à celui absorbé par le mur en pierre à cause de la meilleure inertie thermique de ce dernier. De ce fait, l'efficacité thermique du prototype de la maison solaire passive avec une façade en Adobe est nettement supérieure à celui avec une façade en pierres.

En se basant sur les résultats obtenus pour le prototype de la maison solaire passive, utilisant le système à mur Trombe, nous pouvons affirmer que la conception du système de chauffage passif proposé a assuré des conditions de confort thermique suffisantes, avec une variation minimale de la température à l'intérieur de la maison.

Aussi, les résultats de la simulation numérique bidimensionnelle effectuée sur le système de chauffage solaire passif utilisant le logiciel Fluent ont permis une bonne compréhension de la circulation de l'air par convection naturelle ainsi que du transfert de chaleur par conduction. Les résultats numériques sont en assez bon accord avec les données expérimentales.

L'étude numérique du refroidissement passif a permis de comparer l'efficacité d'un système classique à un autre amélioré combinant des stores à des Eco-Cooler installés à l'arrière de la maison solaire, pour les conditions climatiques estivales semi-arides de Batna. Les résultats montrent que les deux systèmes permettent de réduire la température à l'intérieure de la maison solaire par rapport à celle externe et que le système de refroidissement amélioré

permet d'obtenir des températures plus homogènes que le système classique. D'autre part, les stores placés entre le vitrage et le mur massifs réduisent le flux solaire incident sur ce mur et, par conséquent, les températures de celui-ci sont inférieures à celle du système sans stores. Il est à noter que la vitesse d'évacuation de l'air à partir de l'orifice inférieur du système classique est nettement inférieure à celle du système amélioré. Ce qui permet à ce dernier d'évacuer rapidement une quantité importante d'air vers l'extérieur, assurant ainsi un bon renouvellement d'air et une fraîcheur à l'intérieur de la maison passive.

Toutes ces constatations permettent de vérifier l'efficacité du mur Trombe avec stores combiné au système 'Eco-Cooler' pour améliorer le refroidissement passif. Les résultats de la simulation numérique ont prouvé que le refroidissement passif amélioré est plus efficace que le système classique et il est capable d'atteindre un confort thermique adéquat avec une meilleur circulation et distribution d'air frais. En effet, le système de refroidissement amélioré convient mieux aux conditions climatiques estivales extrêmes (rayonnement solaire et température externe élevés).

Finalement, on peut dire que cette étude a donné des résultats appropriés qui respectent les critères du confort thermique dans le secteur de l'habitat recommandés par l'ASHRAE. Le système de chauffage et de refroidissement passif du mur Trombe s'est avéré efficace pour fournir un confort thermique acceptable dans les conditions semi-arides locales de la ville de Batna.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de la problématique de la réduction de la consommation énergétique et du confort thermique du bâtiment et en réponse aux préoccupations environnementales et au développement durable. Dans ce contexte, un prototype d'une maison solaire passive a été réalisé et testé expérimentalement sous les conditions climatiques semi-arides de la ville de Batna. Le système à mur Trombe a été utilisé pour le chauffage et le refroidissement passifs de la maison solaire. Dans la construction du mur Trombe, des matériaux locaux ont été choisis (l'Adobe et la pierre des montagnes des Aurès). Pour l'isolation thermique, un nouveau matériau biosourcé issu des troncs de Palmiers-Dattiers a été utilisé. Afin de valider les tests expérimentaux, ce travail a été suivi par une simulation numérique par le logiciel Fluent sur le chauffage et le refroidissement passifs du prototype de la maison solaire passive.

En premier lieu, l'orientation optimale de la maison solaire passive relative à la zone semi-aride de Batna a été déterminée (Il s'agit d'une orientation située entre le Sud et l'Est). Ensuite, l'effet des matériaux de construction et d'isolation thermique sur le comportement et l'efficacité thermique du système de chauffage passif de notre maison solaire a été évalué. Les résultats obtenus montrent que, les matériaux utilisés sont efficaces pour le chauffage passif et que, tout en ayant une inertie thermique inférieure à la pierre, le mur construit en Adobe donne une meilleure efficacité thermique du système. Ceci est dû au fait que le gradient des températures entre le canal d'air et l'intérieur de la maison est plus important pour le mur en Adobe. Ce qui conduit à un meilleur taux de transfert de chaleur par convection.

D'autre part, les résultats de la caractérisation du matériau biosourcé ont montré que celui-ci possède des caractéristiques d'isolation thermique similaires à celles des matériaux couramment utilisés dans le domaine de l'habitat, à savoir la laine de verre et le polystyrène expansé. Ceci va permettre de préserver des milliers de troncs de palmiers dattiers qui sont brûlés chaque année en Algérie et de les utiliser dans l'isolation thermique des maisons.

Les résultats de la simulation numérique bidimensionnelle effectuée sur le système de chauffage solaire passif utilisant le logiciel Fluent sont en bon accord avec les résultats des tests expérimentaux. Ce qui représente une validation de ces derniers.

Concernant le refroidissement (ventilation) passif, les résultats ont permis de comparer l'efficacité d'un système classique à un autre amélioré combinant des stores à des Eco-Cooler

installés à l'arrière de la maison solaire situé à l'ombre et près de la végétation. Les résultats montrent que les deux systèmes permettent de réduire la température à l'intérieure de la maison solaire par rapport à la température externe et que le système de refroidissement amélioré permet d'obtenir des températures plus homogènes que le système classique. L'efficacité thermique du mur Trombe avec stores combiné au système 'Eco-Cooler' est meilleur que celle du système de refroidissement passif classique.

En se Basant sur les résultats expérimentaux et numériques obtenus pour le prototype de la maison solaire passive utilisant le système à mur Trombe, nous pouvons conclure que, dans les conditions semi-arides de la ville de Batna, les systèmes de chauffage et de refroidissement passifs proposés assurent des conditions de confort thermique acceptables, avec une variation minimale de la température moyenne à l'intérieur de la maison.

Comme perspectives nous proposons :

- Une étude plus approfondie du matériau biosourcé extrais des troncs de palmiers dattiers afin d'évaluer avec précision toutes ces propriétés thermo-physiques et de proposer des techniques permettant son intégration au secteur de l'habitat.
- Effectuer davantage de tests sur le prototype de la maison solaire qui s'étalent sur les quatre saisons de l'année, afin de donner plus de crédibilité aux résultats obtenus pour le chauffage et le refroidissement passifs du prototype de maison solaire passive.
- Proposer d'autres matériaux locaux biosourcé pour la construction et l'isolation thermique des habitats.

Annexes

Annexes

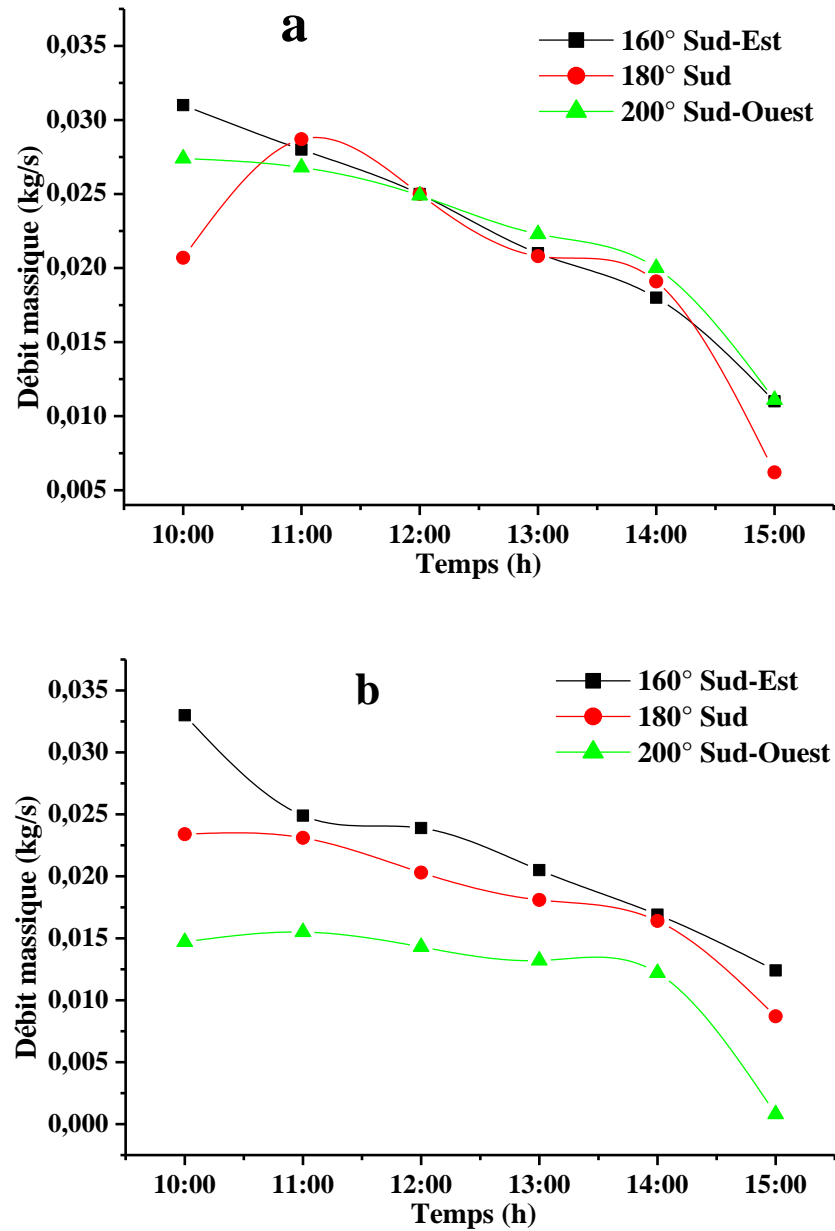


Figure 1 Débit d'air dans le canal : **a**- façade en Adobe, **b**- façade en pierres.

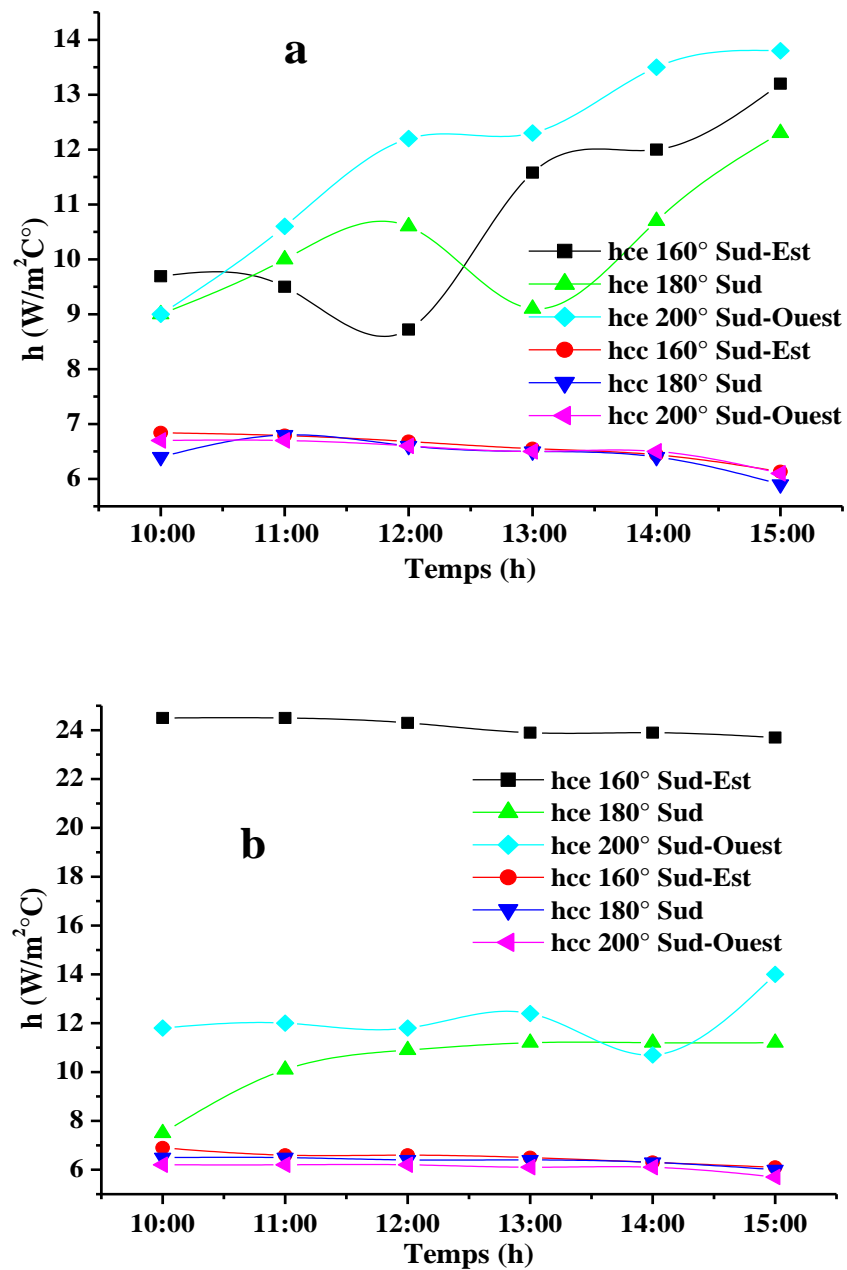


Figure 2 Evolution des coefficients convectifs : **a**- façade en Adobe, **b**- façade en Pierres.

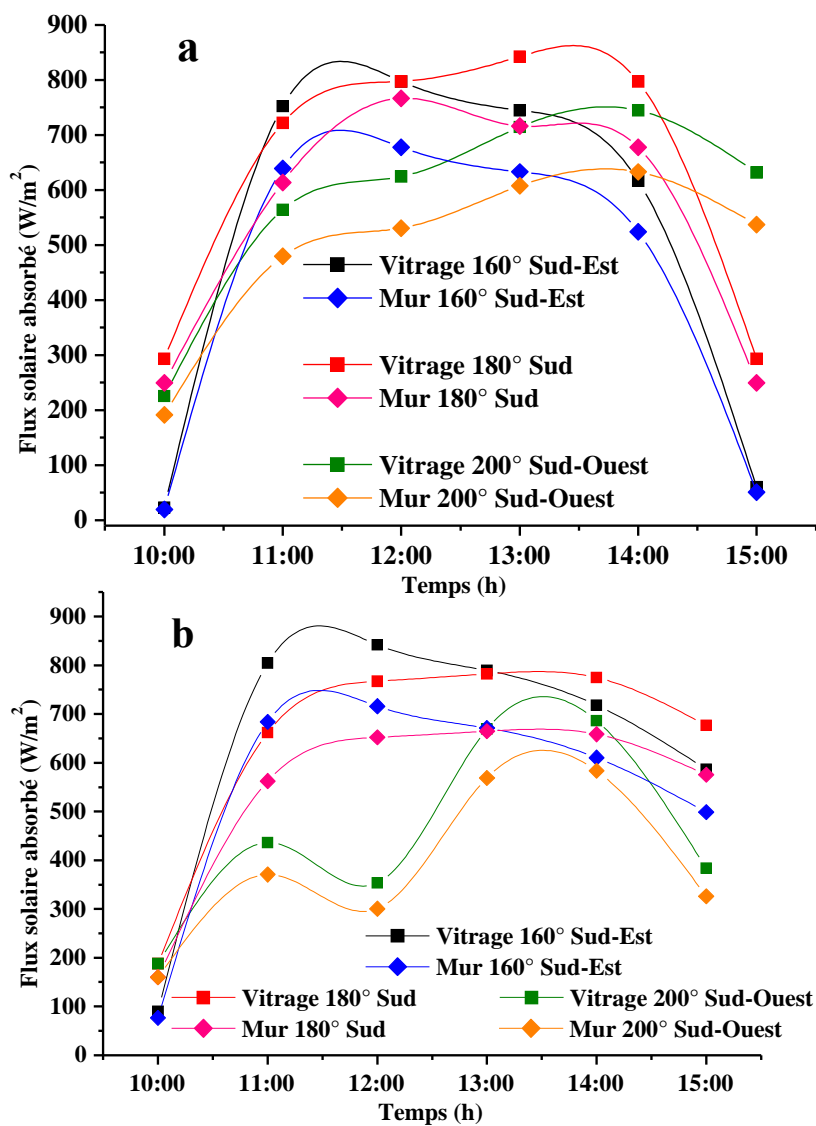


Figure 3 Flux solaire absorbé par le vitrage et le mur : **a**- façade en Adobe, **b**- façade en Pierre.

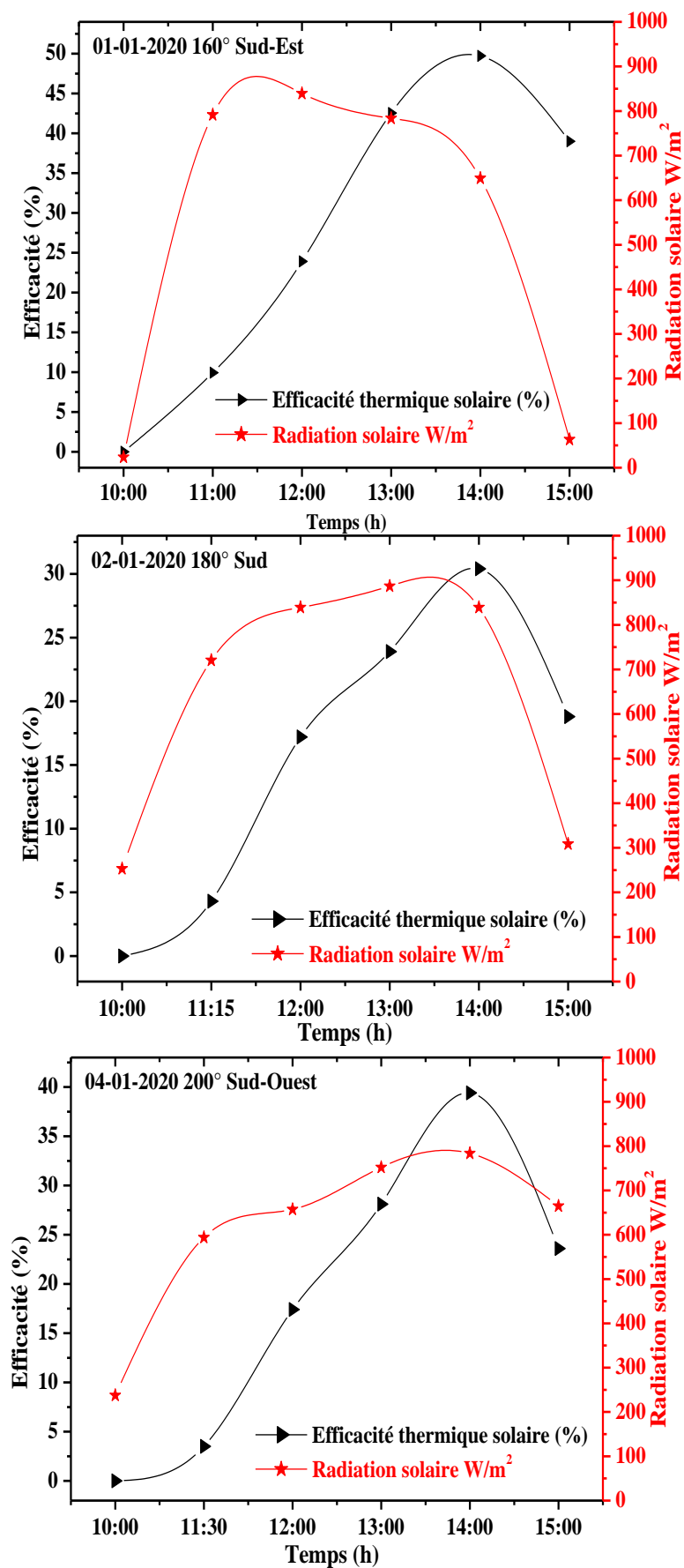


Figure 4 Efficacité thermique solaire avec façade en Adobe à différentes d'orientation.

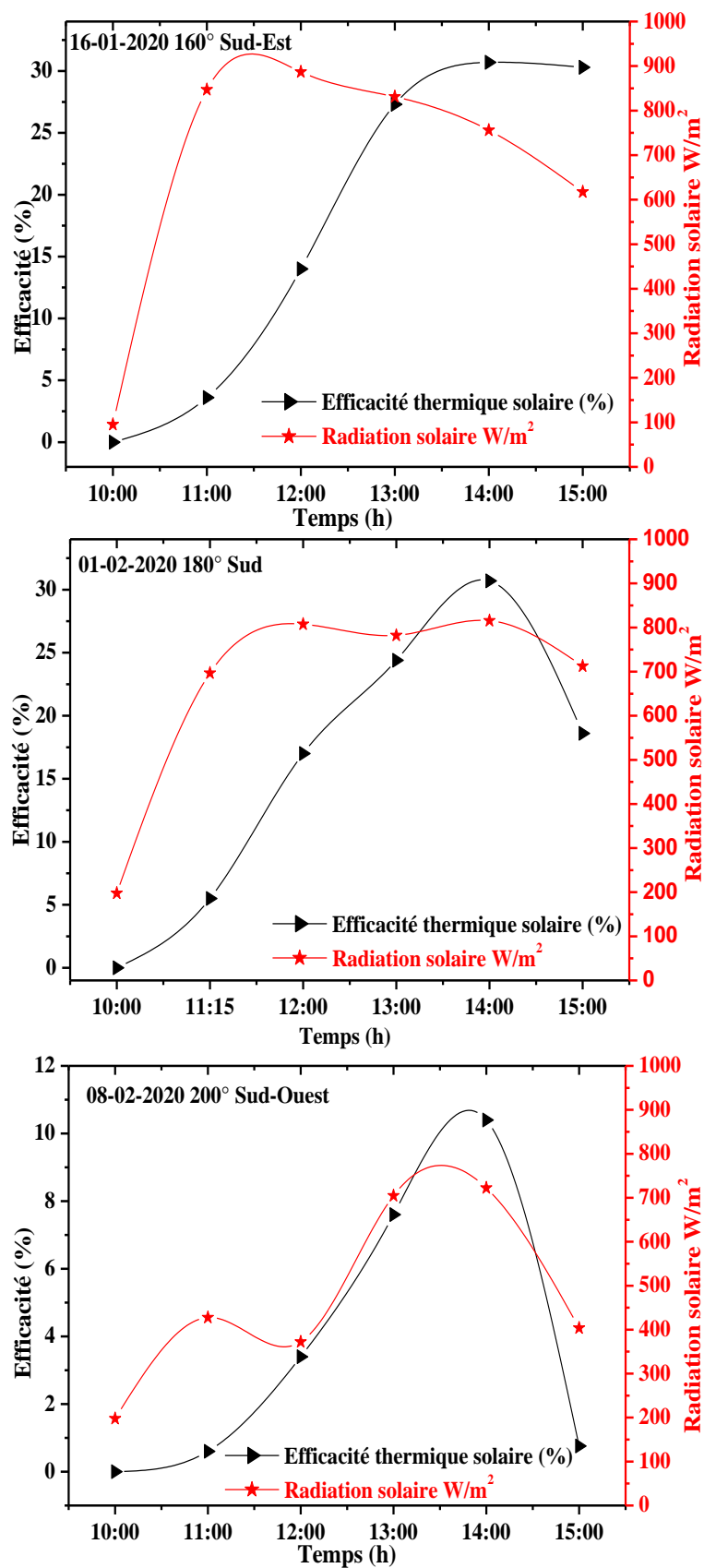


Figure 5 Efficacité thermique solaire avec façade en pierres à différentes d'orientation.



Passive solar house prototype design with a new bio-based material for a semi-arid climate

Cherif Boulebbina¹ · Ghazali Mebarki¹ · Samir Rahal¹

Received: 2 June 2021 / Accepted: 26 November 2021
© The Author(s) 2021

Abstract

In this study, a passive solar house prototype was built using Trombe wall and was tested in the semi-arid region of Batna, in eastern Algeria. Traditional local materials (stone and adobe) were used for the construction of the thermal storage wall. A new local bio-based material made from date palm trunks was used for the insulation of the passive house prototype. For a better understanding of passive house heating and for a comparative study, a numerical simulation, using Fluent, was carried out. The aim of this study was to supply recommendations for improving the passive systems and to participate to the energy consumption control in the building sector. The results show that the experimental and numerical simulation results are in good agreement. The optimal orientation of the solar passive house has been determined, which is at 160° southeast. The use of local and bio-based materials has proven its effectiveness in the construction of the passive house. The thermal behavior of date palm wood has been found to be close to those of insulation materials commonly used in buildings. That means it has the same thermal insulation ability (thermal conductivity). On the other hand, the results show that the thermal efficiency of the passive solar heating system, with an adobe wall is significantly higher (50%) than that with a stone wall (30.7%).

Keywords Passive heating · Semi-arid region · Bio-based materials · Energy efficiency · Trombe wall · Adobe

List of symbols

G	Global solar radiation flux density (W/m^2)
A	Surface (m^2)
H	Height (m)
T	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)
V	Fluid velocity (m/s)
m	Air mass flow rate (kg/s)
a	Thermal diffusivity (m^2/s)
C_p	Specific heat ($\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$)
g	Acceleration of gravity (m/s^2)
t	Time (s)
e	Thickness (m)
Q	Heating capacity (W)
R	Thermal resistance ($\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
h_c	Convection coefficient ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$)
h_r	Radiation coefficient ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$)
R_a	Rayleigh number
Gr	Grashof number

Nu	Nusselt number
Pr	Prandtl number
X	Independent variable of equations

Greek letters

ρ	Density (kg/m^3)
μ	Dynamic viscosity (kg/ms)
ν	Kinematic viscosity (m^2/s)
β	Thermal expansion coefficient ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
λ	Thermal conductivity ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$)
α	Solar absorptivity
ϵ	Emissivity
τ	Transmissivity
σ	Stefan Boltzmann constant ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$)
ϕ	Heat flux (W)
η	Average thermal efficiency (%)

Subscripts

c	Channel
w	Wall
g	Glazing
$cond$	Conduction
$conv$	Convection
amb	Ambiance
i	Interior
e	Exterior

✉ Ghazali Mebarki
g.mebarki@univ-batna2.dz

¹ LESEI Laboratory, Mechanical Engineering Department, Faculty of Technology, University of Batna 2, Avenue Chahid Boukhrouf Mohammed Elhadi 05001, Batna, Algeria

Résumé

Le présent travail traite le confort thermique dans le bâtiment avec optimisation de la consommation énergétique en zone semi-aride. Il s'agit d'une étude expérimentale et numérique d'un prototype d'une maison solaire passive, sous les conditions climatiques semi-arides de la ville de Batna. Ce prototype a été entièrement réalisé et testé à la faculté de technologie de l'université de Batna 2. Le système à mur Trombe a été utilisé pour étudier l'efficacité énergétique du chauffage et du refroidissement (ventilation) passifs. Des matériaux locaux ont été choisis pour la construction du prototype et un nouveau matériau biosourcé issu des troncs de Palmier-Dattier a été adopté pour l'isolation thermique. En premier lieu, l'orientation optimale de la maison solaire passive correspondant au site expérimental a été identifiée. Ensuite, les propriétés des matériaux utilisés et l'efficacité thermique de la maison solaire ont été évaluées. Les résultats ont montré que le bois de Palmier-Dattier possède des propriétés thermo-physiques proches de ceux des matériaux isolants couramment utilisés dans le bâtiment. Les résultats ont également montré que les matériaux de construction utilisés dans cette étude sont efficaces pour le chauffage et le refroidissement passifs et que l'efficacité thermique du système est meilleure pour la façade en Adobe qui possède une inertie thermique plus faible que celle de la pierre.

Mots clés: Climat semi-aride, Matériau biosourcé, Système solaire passif, Efficacité énergétique, Confort thermique, Durabilité.

Abstract

This work deals with thermal comfort in buildings with optimization of energy consumption in semi-arid regions. This is an experimental and numerical study of a passive solar house prototype realized and tested at the Faculty of Technology of the University of Batna 2. To study the energy efficiency of passive heating and cooling, the Trombe wall system was used. Local materials have been chosen for the construction of the prototype and a new bio-based material from the trunks of Date-Palm was adopted for the thermal insulation. At first the optimal orientation of the passive solar house corresponding to the experimental site was identified. Then, the properties of the materials used and the thermal efficiency of the solar house were evaluated. The results show that Date-Palm wood has thermo-physical properties close to those of insulating materials commonly used in construction. The results show that the building materials used in this study are efficient for passive heating and cooling and that the thermal efficiency of the system is better for the Adobe facade which has a lower thermal inertia than that of stone.

Key words: Semi-arid region, Biobased material, Passive solar system, Energy efficiency, Thermal comfort, Sustainability.

ملخص

هذه الدراسة مخصصة للراحة الحرارية في المباني مع تحسين استهلاك الطاقة في المناطق شبه القاحلة. هذه دراسة تجريبية ورقمية لنموذج أولي لمنزل شمسي سلبي، في ظل الظروف المناخية شبه القاحلة لمدينة باتنة. تم تحقيق واختبار هذا النموذج الأولي بالكامل في كلية التكنولوجيا بجامعة باتنة 2. تم استخدام نظام جدار ترامب (Trombe) لدراسة كفاءة الطاقة للتدفئة والتبريد السلبيين. تم اختيار المواد المحلية لبناء النموذج الأولي وتم اعتماد مادة جديدة بيولوجية من جذوع نخيل التمر للعزل الحراري. أولاً، تم تحديد الاتجاه الأمثل للمنزل الشمسي السلبي المقابل لموقع التجربة. ثم تم تقييم خصائص المواد المستخدمة والكفاءة الحرارية للبيت الشمسي. أظهرت النتائج أن خشب النخيل له خصائص حرارية فيزيائية قريبة من تلك الخاصة بالمواد العازلة التي يشيع استخدامها في البناء. أظهرت النتائج أيضاً أن مواد البناء المستخدمة في هذه الدراسة فعالة في التدفئة والتبريد السلبيين وأن الكفاءة الحرارية للنظام أفضل لواجهة الطوب التي تتميز بحمول حراري أقل من الحجر.

الكلمات المفتاحية: المنطقة شبه القاحلة (المنطقة القارية)، المواد الحيوية، النظام الشمسي السلبي، كفاءة الطاقة، الراحة الحرارية، الاستدامة.