

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Amar Telidji - Laghouat



Faculté de technologie

THÈSE DE DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité : Génie mécanique

Présentée et soutenue publiquement
le 13 Octobre 2019

BELLAHCENE Lahcene

THEME

Amélioration des Performances Thermiques de l'Enveloppe des Bâtiments en Vue de Réduire le Chauffage Solaire

Devant le jury composé de :

Mr AOUISSI Mokhtar	Professeur à l'Université de Laghouat	Président
Dr BEKKOUCHE Sidi Mohammed El Amine	Directeur de Recherche à l'URAER Ghardaïa	Directeur de thèse
Pr CHEKNANE Ali	Professeur à l'Université de Laghouat	Co-directeur de thèse
Pr BENMOUSSA Hocine	Professeur à l'Université de Batna	Examineur
Dr TOUAFEK Khaled	Directeur de Recherche à l'URAER Ghardaïa	Examineur
Dr SAHEL Djamel	Maître de Conférences à l'Université de Laghouat	Examineur

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail

*A la mémoire de mes grands parents, Que
Dieu ait vos âmes dans sa sainte
miséricorde.*

*A ma famille : mes parent, ma femme, ma
petite fille, mon frère, mes sœurs.*

A mes amis

A ceux qui m'ont soutenu de loin ou de près.

Remerciements

Je voudrais exprimer ma très vive gratitude et mes très sincères remerciements tout d'abord à mon Directeur de thèse Monsieur BEKKOUCHE Sidi Mohammed El Amine, Directeur de Recherche à l'Unité de Recherche Appliquée en Énergie Renouvelables de Ghardaïa, pour ses conseils judicieux et sa rigueur scientifique qui m'ont conduit à réaliser ce travail.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon Co-directeur de thèse, Professeur CHAKNANE Ali. Je le remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé, je le remercie aussi pour sa patience et sa disponibilité.

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à Messieurs les membres du jury, notamment :

- Monsieur AOUISSI Mokhtar, Professeur à l'Université Amar Thelidji de Laghouat, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant la présidence du jury.
- Monsieur TOUAFEK Khaled, Directeur de Recherche à l'Unité de Recherche Appliquée en Énergie Renouvelables de Ghardaïa.
- Monsieur BENMOUSSA Hocine, Professeur à l'Université de Batna
- Monsieur SAHEL Djamel, Maître de Conférences à l'université d'Amar Thelidji de Laghouat.

Pour avoir accepté gracieusement d'examiner ce travail.

Je tiens également à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce travail, en particulier :

- Monsieur YOUNSI Zohir, Professeur à l'Ecole des Hautes Etudes d'Ingénieur (HEI), Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement, LGCgE, de Lille de m'avoir accueilli dans son équipe pendant la période de mon stage.
- L'ensemble du personnel du Polytechnic Institute of Research and Innovation in Sustainability – INSPIRES, de m'avoir accueilli et facilité mon séjour scientifique en Espagne.

Résumé

Le travail mené dans cette thèse est consacré principalement à l'amélioration des performances thermiques de l'enveloppe d'une telle construction. L'objectif principal donc s'est focalisé sur l'amélioration du confort thermique qui va systématiquement conduire à la minimisation de la consommation énergétique.

On s'est intéressé à l'étude des performances thermiques de deux types de parois : une paroi composite opaque en pierre lourde et une autre en brique creuse. Le modèle mathématique conçu traduisant ainsi les échanges thermiques sous un régime instationnaire a prouvé que le problème du confort dépend principalement du nombre de cavités et sa forme géométrique. Les résultats obtenus, issus d'un code CFD, étaient intéressants notamment pour les briques creuses qui possèdent des propriétés thermo-physiques plus convenables. La démarche suivie s'est basée sur le choix de la configuration et le nombre adéquat de cavités.

La méthode d' "enthalpie-porosité" a été ensuite utilisée pour la modélisation du stockage d'énergie par chaleur latente avec des conditions environnementales variables. Nous avons pu confirmer que l'intégration des MCPs semble parfois une solution prometteuse et peut augmenter le confort thermique et améliorer en conséquence l'efficacité énergétique de l'édifice.

L'influence des matériaux de type MCP sur le confort et les économies potentielles a été étudiée en utilisant des outils d'évaluation (modèles sensible et latent) du confort et d'efficacité énergétique. Le chauffage a eu un intérêt prépondérant. Il s'est trouvé que ce concept de matériau dit "intelligent" peut conduire à une économie en énergie plus importante en profitant convenablement du gain solaire passif.

Mots clés

Pierre, Brique creuse, Inertie thermique, Mur à cavités, Matériau à changement de phase MCP, Température, Humidité relative, Besoins énergétiques, Efficacité énergétique.

Abstract

The work conducted in this thesis has been focused mainly on improving thermal performance of a building envelope. The primary objective was therefore to improve the thermal comfort which will automatically lead to minimizing energy consumption.

Special focus was accorded to thermal performances of two distinct walls: one opaque composite wall of heavy stone, the second is a hollow brick wall. The mathematical model of heat exchange in transient regime has revealed that comfort problems depend

mainly on the number of cavities and its geometrical shape. The results obtained from a CFD code were interesting, especially for hollow bricks which have more suitable thermo-physical properties. The followed approach was based on the configuration choice and the adequate number of cavities.

The "enthalpy-porosity" method was then used to model latent heat energy storage with varying environmental conditions. It is confirmed that the PCM integration sometimes seems a promising solution and can increase thermal comfort and consequently improve the energy efficiency of the building.

The influence of PCM on thermal comfort and potential savings was studied using assessment tools (sensible and latent models) of comfort and energy efficiency. Heating had a preponderant interest. It was found that this "smart" material concept can lead to greater energy savings by taking advantage of passive solar gain.

Keywords

Stone, Hollow brick, Thermal inertia, Cavity wall, Phase change material PCM, Temperature, Relative humidity, Energy needs, Energy efficiency.

ملخص

ركزت الأعمال المنجزة في هذه الرسالة بشكل أساسي على تحسين الأداء الحراري للإطار الخارجي للبناء. وبالتالي فإن الهدف الرئيسي يركز على تحسين الراحة الحرارية التي ستؤدي بشكل منهجي إلى تقليل استهلاك الطاقة كنا مهتمين بدراسة الأداء الحراري لنوعين من الجدران: جدار غير شفاف مركب من الحجر الثقيل وآخر من الأجر المجوف أي ما يسمى بالطوب الأحمر. لقد أثبت النموذج الرياضي المصمم لترجمة التبادلات الحرارية في ظل نظام انتقالي غير ثابت أن مشكلة الراحة تعتمد بشكل أساسي على عدد التجاويف وشكلها. كانت النتائج التي تم الحصول عليها باستعمال البرنامج CFD مثيرة للاهتمام خاصة بالنسبة للطوب الأحمر الذي له خصائص حرارية فيزيائية أكثر ملاءمة. كان النهج المتبع يعتمد أساساً على اختيار الموقع والعدد المثاليين للتجاويف.

بعد ذلك ، تم استخدام طريقة "الحرارة الكامنة / المسامية" لنمذجة تخزين الطاقة الحرارية الكامنة وفقاً للظروف البيئية. وفي هذا الصدد تمكنا من التأكيد على أن دمج هذه المواد يبدو أحياناً حلاً واعداً يمكن أن يزيد من الراحة الحرارية وبالتالي تحسين كفاءة استخدام الطاقة في المبنى .

تمت أيضاً دراسة تأثير هذه المواد على الراحة الحرارية للفرد والاقتصاد في الطاقة باستخدام أدوات التقييم (النماذج الحساسة والكامنة) للراحة وكفاءة الطاقة. يجدر الإشارة في هذا الجزء أن التدفئة أخذت القسط الأكبر من الاهتمام. اتضح في ما بعد أن مفهوم المواد "الذكية" يمكن أن يؤدي إلى توفير أكبر للطاقة من خلال الاستفادة من الكسب الشمسي السلبي.

الكلمات المفتاحية

الحجر ، الأجر المجوف ، العطالة الحرارية ، جدار مجوف ، مواد متغيرة المراحل PCM ، درجة الحرارة ، الرطوبة النسبية ، متطلبات الطاقة ، كفاءة الطاقة.

Sommaire

Sommaire.....	1
Nomenclature.....	4
Table des figures.....	8
Liste des tableaux.....	12
0. Introduction générale.....	14
1. Chapitre I : Introduction et rappels sur l'énergétique du bâtiment.....	19
1.1. Introduction.....	20
1.2. Bilan de la consommation énergétique.....	23
1.3. Phénomènes, approches méthodologiques et paramètres caractéristiques de l'enveloppe en physique du bâtiment	26
1.3.1. Capacité thermique	27
1.3.2. Conduction	27
1.3.3. Convection	28
1.3.4. Rayonnement.....	30
1.3.5. L'inertie thermique.....	30
1.4. Techniques de chauffage et de climatisation	33
1.4.1. Climatisation passive des bâtiments	33
1.4.2. Architecture solaire passive	33
1.5. Stockage thermique par changement de phase	35
1.5.1. Base thermodynamique	35
1.5.2. Différents Systèmes de stockage	36
1.6. Applications potentielles du stockage de la chaleur latente avec changement de phase solide-liquide	41
1.6.1. Contrôle de la température	41
1.6.2. Stockage de la chaleur ou du froid avec une densité de stockage élevée	41
1.7. Classification des MCPs	43
1.8. Avantages et inconvénients des MCPs.....	44
1.9. Critères de choix d'un matériau à changement de phase.....	45
1.9.1. Propriétés thermiques.....	45
1.9.2. Propriétés physiques.....	45

1.9.3.	Propriétés cinétiques.....	45
1.9.4.	Propriétés chimiques.....	45
1.9.5.	Aspects économiques.....	46
1.9.6.	Exigences physiques, techniques et économiques.....	46
1.10.	Conclusion.....	47
	Référence.....	48
2.	Chapitre II : Performances thermiques d'une paroi composite opaque.....	50
2.1.	Introduction.....	51
2.2.	Etat de l'art	52
2.3.	Températures et paramètres d'inertie thermique & Cas d'un mur en pierre	56
2.3.1.	Modèle mathématique.....	57
2.3.2.	Résultats et discussions.....	60
2.4.	Températures et paramètres d'inertie thermique & Paroi constituée de briques creuses	66
2.4.1.	Description de la géométrie des briques.....	66
2.4.2.	Formulation mathématique.....	68
2.4.3.	Résultats et discussions.....	70
2.5.	Conclusion.....	76
	Référence.....	77
3.	Chapitre III : Modèles, compréhension et simulations de parois contenant un matériau à changement de phase MCP	80
3.1.	Introduction.....	81
3.2.	Etat de l'art	82
3.3.	Etude numérique de solidification-fusion d'un mélange plâtre-MCP	84
3.3.1.	Validation du Modèle & Cas d'une paroi plane opaque	84
3.3.2.	Résultats de caractérisation thermique de la paroi	90
3.3.3.	Résultats de caractérisation thermique & Autres géométries	93
3.4.	Conclusion.....	101
	Référence.....	102

4.	Chapitre IV: L'apport des matériaux à changement de phase MCPs sur les économies d'énergie et le confort d'hiver	104
4.1.	Introduction.....	105
4.2.	Modèle mathématique	107
4.2.1.	Les hypothèses	108
4.2.2.	Bilans enthalpiques	108
4.2.3.	Bilan massique	110
4.2.4.	Bilan sensible	111
4.2.5.	Bilan latent	111
4.2.6.	Modèle de conduction	112
4.3.	Sollicitations climatiques extérieures	115
4.4.	Cas de notre étude.....	118
4.5.	Simulation numérique : influence des MCPs sur les principaux paramètres du confort thermique	120
4.6.	Amélioration de l'efficacité énergétique par l'intégration des MCPs....	130
2.6.1.	Modèle de bilan énergétique	130
2.4.2.	Efficacité énergétique de l'édifice : cas du mois de Novembre	142
4.7.	Conclusion.....	146
	Référence.....	147
5.	Conclusion générale.....	150

Nomenclature

Chapitre 1

h	: nombre de ménages
p	: nombre de personnes
Q	: quantité de chaleur [J]
m	: masse [kg]
c	: chaleur spécifique [J/kg K]
$\Delta\theta$: différence de température [K]
q''	: densité de flux de chaleur [W]
q	: taux de transfert de chaleur [W/m^2]
T_1	: température de la surface extérieure [K]
T_2	: température de la surface intérieure [K]
λ	: conductivité thermique du matériau [$W\ m^{-1}\ K^{-1}$]
Δx	: épaisseur de la paroi [m]
α	: diffusivité thermique [$m^2\cdot s^{-1}$]
ρ	: masse volumique [kg/m^3]
q_{conv}	: densité de flux de chaleur par convection [W]
T_w	: température entre la surface de la paroi [K]
T_f	: la température moyenne (au loin) du fluide dite température de référence
h_c	: coefficient d'échange convectif [$W\ m^{-2}\ K^{-1}$]
R_{th}	: résistance thermique [$m^2\ K\ W^{-1}$]
S	: surface de la paroi [m^2]
σ	: constant de Stefan Boltzmann [$Wm^{-2}K^{-4}$]
F_{1-2}	: facteur de forme
ΔT	: différence de température neutre [$^{\circ}C$]
T	: température totale [$^{\circ}C$]
R_t	: résistance thermique totale [$m^2\ K\ W^{-1}$]
R	: résistance thermique de la couche [$m^2\ K\ W^{-1}$]
ΔQ	: rapport de chaleur stockée [J]

ΔT : élévation de température [$^{\circ}\text{C}$]

ΔH : différence d'enthalpie [J]

Chapitre 2

ρ : masse volumique [kg/m^3]

c : chaleur spécifique [$\text{J}/\text{kg K}$]

T : température [K]

t : temps [s]

x : l'axe x [m]

y : l'axe y [m]

λ_a : conductivité thermique de l'air [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]

h_e : coefficient d'échange convectif extérieur [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$]

H_i : coefficient d'échange convectif extérieur [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$]

T_{pe} : température de la paroi extérieure [K]

T_{pi} : température de la paroi intérieure [K]

T_p : température de la paroi [K]

T_f : température de l'air ambiant extérieur [K]

T_{ext} : température de l'air extérieur [K]

T_{int} : température de l'air intérieur [K]

L : épaisseur de la paroi [m]

H : hauteur de la paroi [m]

τ : période [s]

ϕ_{max} : déphasage maximal [h]

ϕ_{min} : déphasage minimal [h]

f : facteur de décroissance

u : vitesse selon l'axe x [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

v : vitesse selon l'axe y [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

μ : la viscosité [$\text{Pa}\cdot\text{s}$].

g : accélération de la pesanteur [$9.81 \text{ m}/\text{s}^2$]

: coefficient de la dilatation thermique [K^{-1}]

T_0 : température initiale de la paroi [K]

Chapitre 3

H : enthalpie [J]

λ : conductivité thermique [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]

ρ : densité volumique [kg m^{-3}]

T_f : température de fusion [K]

T_{sol} : température des MCPs dans l'état solide [K]

T_{liq} : température des MCPs dans l'état liquide [K]

L : chaleur latente [J kg^{-1}]

f : fraction liquide

t : temps [s]

Q : quantité de chaleur stockée [J]

T_p : température de la paroi [$^{\circ}\text{C}$]

T_0 : température initiale de la paroi [$^{\circ}\text{C}$]

Chapitre 4

$H^{\text{entr}}(i)$: enthalpie de la masse d'air humide entrant dans la zone i [J]

$H^{\text{sort}}(i)$: enthalpie de la masse d'air humide quittant le zone i [J]

P_s, P_L : puissances sensibles et latentes fournies par la climatisation [W]

CI_s, CI_L : puissances sensibles et latentes internes dues aux appareils, aux occupants, à l'éclairage...etc. [W]

$Q_{\text{mas}}^{\text{trans}}(n,i)$: débit massique de transition de l'air de la zone n à la zone i [kg/s]

$T_{\text{air}}(n)$: température de l'air de la zone n = température de l'air entrant dans la zone i [K]

C_{mas} : capacité calorifique de la masse d'air [$\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]

$r_s(n)$: humidité spécifique ou teneur en eau de l'air de la zone n = humidité de l'air entrant dans la zone i

L_v : chaleur latente de vaporisation de l'eau [J Kg^{-1}]

C_v : capacité thermique à volume constant [$\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]

$Q_{mas}^{trans}(i, n)$: débit massique de transition de l'air de la zone i à la zone n [kg/s]
 Q_{ij} : expression des flux convectifs échangés
 $T_{s_{ij}}(i)$: température de surface j dans la zone i [K]
 S_i : surface [m²]
 m : nombre total des surfaces intérieures (murs, portes et fenêtres) dans la zone i
 Gr : nombre de Grashof
 Pr : nombre de Prandtl
 L : longueur caractéristique [m]
 T : différence de température [K]
 H_{sens} : enthalpie sensible [J]
 H_{lat} : enthalpie latent [J]
 m_{as} : masse d'air sensible [kg]
 r_s : humidité spécifique [kg_{eau}/kg_{air hum}]
 ρ_{as} : masse volumique de l'air [kgm⁻³]
 $V(i)$: volume de la zone i [m³]
 $V_s(i)$: Volume spécifique de l'air humide dans la zone i [m³]
 H_r : humidité relative (%)
 P_{sat} : pression de vapeur saturante [Pa]
 b_i : coefficient de réduction des déperditions thermiques
 U_i : coefficient de transmission thermique par degré de différence entre l'intérieur et l'extérieur [W/m² K]
 R_A : résistance de la couche A [m² K/W]
 R_B : résistance de la couche B [m² K/W]
 n : nombre de la couche
 e : épaisseur de la couche [m]
 λ : conductivité thermique de la couche [W K⁻¹ m⁻¹]
 C_A, C_B, C_M : capacités thermiques [JK⁻¹]
 U : coefficient de transmission thermique [Wm⁻²k⁻¹]

Table des figures

Chapitre 1

- Figure 1.1 : Évolution des températures dans des bâtiments au cours de l'année, sans effet des installations techniques de chauffage ou climatisation
- Figure 1.2 : Consommation énergétique totale dans les secteurs de bâtiment résidentiels et commercial
- Figure 1.3 : Les émissions de gaz à effet de serre (GES) du secteur du bâtiment
- Figure 1.4 : Consommation totale d'énergie mondiale
- Figure 1.5 : Utilisation de l'énergie pour le chauffage et la climatisation dans le monde
- Figure 1.6 : Utilisation de l'énergie pour le chauffage et la climatisation dans l'Afrique de Nord et Moyen-Orient
- Figure 1.7 : Conduction thermique unidimensionnelle à travers une paroi plane
- Figure 1.8 : Déphasage et amortissement d'une onde de chaleur à travers un matériau homogène
- Figure 1.9 : Méthode de Glaser pour les gradients de température à l'état d'équilibre dans un mur composite multicouche
- Figure 1.10 : Classification des stratégies passives pour le bâtiment proposé par Geetha et al
- Figure 1.11 : Les cinq éléments de la conception de chauffage passif
- Figure 1.12 : Méthodes possibles de stockage réversible de la chaleur et du froid
- Figure 1.13 : Stockage de chaleur sensible
- Figure 1.14 : Stockage de chaleur sous forme de chaleur latente dans le cas d'un changement de phase solide-liquide
- Figure 1.15 : Champs d'application potentielles du MCP: contrôle de la température (à gauche) et stockage et fourniture de chaleur ou de froid avec de faibles variations de température (à droite)
- Figure 1.16 : Classification des matériaux à changement de phase
- Figure 1.17 : Classes de matériaux à changement de phase MCPs et leurs plages typiques de température de fusion et d'enthalpie de fusion
- Figure 1.18 : Variation schématique de la température lors du chauffage (fusion) et du refroidissement (solidification) d'un PCM avec sous-refroidissement

Chapitre 2

- Figure 2.1 : Configurations de la paroi multicouches étudiées avec des conditions aux limites
- Figure 2.2 : Confrontation des températures d'une paroi sous un régime transitoire
- Figure 2.3 : Température des différentes couches : configuratiior (1)
- Figure 2.4 : Température des différentes couches : configuratiior (2)
- Figure 2.5 : Température des différentes couches : configuratiior (3)
- Figure 2.6 : Température des différentes couches : configuratiior (4)
- Figure 2.7 : Variation de la température moyenne des différentes configurations
- Figure 2.8 : Déphasage minimal τ_{\min} exprimé en heures
- Figure 2.9 : Déphasage maximal τ_{\max} exprimé en heures
- Figure 2.10 : Facteur de décrémentation f
- Figure 2.11 : Répartitions et configurations des cavités d'air
- Figure 2.12 : Dimensions générales des parois et des cavités de la brique
- Figure 2.13 : Températures équivalentes d'une brique creuse verticale en fonction du nombre de cavités
- Figure 2.14 : Températures équivalentes d'une brique creuse horizontale en fonction du nombre de cavités
- Figure 2.15 : Les profils des températures calculées le long de la direction du transfert de chaleur x au sein d'une brique creuse verticale en fonction du nombre de cavités
- Figure 2.16 : Les profils des températures calculées le long de la direction du transfert de chaleur x au sein d'une brique creuse horizontale en fonction du nombre de cavités
- Figure 2.17 : Déphasage maximal et minimal (en heures), cas d'une brique creuse en position verticale
- Figure 2.18 : Déphasage maximal et minimal (en heures), cas d'une brique creuse en position horizontale
- Figure 2.19 : Variation du facteur de décrémentation f pour des briques en position verticale
- Figure 2.20 : Variation du facteur de décrémentation f pour des briques en position horizontale

Chapitre 3

- Figure 3.1 : Conditions aux limites du modèle étudié
- Figure 3.2 : Variation de la température et du flux de chaleur, phase solide (17 °C - 23 °C)
- Figure 3.3 : Variation de la température et du flux de chaleur, phase liquide (30 °C - 38 °C)
- Figure 3.4 : Variation des températures superficielles à l'extérieur (a) et à l'intérieur (b) de la paroi
- Figure 3.5 : Variation des flux de chaleur superficiels à l'extérieur (a) et à l'intérieur (b) de la paroi
- Figure 3.6 : Configurations à étudier : (a) cavité de section carrée, (b) cavité de section cylindrique
- Figure 3.7 : Evolution temporaire de la température pour différentes épaisseurs: (a) une cavité de section carrée, (b) une cavité de section cylindrique
- Figure 3.8 : Evolution temporaire de la température au centre de la cavité d'air: (a) une cavité de section carrée, (b) une cavité de section cylindrique
- Figure 3.9 : Géométries des briques creuses, (a) : sans MCP, (b) : avec MCP
- Figure 3.10 : Variation de température pour une période de trois jours
- Figure 3.11 : Scenario et répartition des températures au sein d'une brique creuse en MCP pendant 24 heures et avec un pas de 2 heures

Chapitre 4

- Figure 4.1 : Modèle de conduction pour une paroi opaque
- Figure 4.2 : Température ambiante, Ghardaïa les 05 - 17 novembre 2016
- Figure 4.3 : Eclairement solaire horizontal, Ghardaïa les 05 - 17 novembre 2016
- Figure 4.4 : Taux de couverture nuageuse et irradiation journalière mesurée incidente sur un plan horizontale, Ghardaïa les 05 - 17 novembre 2016
- Figure 4.5 : Humidité relative, Ghardaïa les 05 - 17 novembre 2016
- Figure 4.6 : Vitesse du vent, Ghardaïa les 05 - 17 novembre 2016
- Figure 4.7 : Plans descriptifs du studio
- Figure 4.8 : Températures sur les faces intérieure (a) et extérieure (b) du toit
- Figure 4.9 : Températures sur les faces intérieure (a) et extérieure (b) du mur sud

- Figure 4.10 : Températures sur les faces intérieure (a) et extérieure (b) du mur nord
- Figure 4.11 : Températures sur les faces intérieure (a) et extérieure (b) du mur est
- Figure 4.12 : Températures sur les faces intérieure (a) et extérieure (b) du mur ouest
- Figure 4.13 : Température de l'air pour une teneur en eau fixée à $3 \cdot 10^{-3} \text{ Kg}_{\text{eau}}/\text{Kg}_{\text{air-sec}}$
- Figure 4.14 : Humidité relative de l'air pour une teneur en eau $3 \cdot 10^{-3} \text{ Kg}_{\text{eau}}/\text{Kg}_{\text{air-sec}}$
- Figure 4.15 : Température de l'air pour une teneur en eau fixée à $3 \cdot 10^{-3} \text{ Kg}_{\text{eau}}/\text{Kg}_{\text{air-sec}}$
- Figure 4.16 : Economie en énergie due à l'enveloppe issue du gain solaire en fonction de l'épaisseur des MCPs.
- Figure 4.17 : Économies en besoins énergétiques dus à l'enveloppe en fonction de l'épaisseur des MCPs.
- Figure 4.18 : Économies en énergie totale due au gain solaire en fonction de l'épaisseur des MCPs.

Liste des tableaux

Chapitre 1

- Tableau 1.1 : Comparaison des densités de stockage typiques de différentes méthodes de stockage d'énergie (3,6 MJ = 1 kWh)
- Tableau 1.2 : Avantages et inconvénients des différentes catégories de MCP

Chapitre 2

- Tableau 2.1 : Propriétés thermo-physiques des matériaux utilisés

Chapitre 3

- Tableau 3.1 : Propriétés thermophysiques de mélange plâtre+MCP
- Tableau 3.2 : Calcul d'erreur et évaluation des incertitudes
- Tableau 3.3 : Principaux indices et influence d'une couche additionnelle du MCP sur les températures des parois
- Tableau 3.4 : Principaux indices et influence d'une couche additionnelle du MCP sur les températures au centre de la cavité d'air
- Tableau 3.5 : Etat récapitulatif sur les valeurs moyennes et les écarts entre ces valeurs moyennes par rapport à l'orientation sud

Chapitre 4

- Tableau 4.1 : Composition de la maçonnerie et propriétés des matériaux de construction
- Tableau 4.2 : Valeurs de la résistance thermique pour les échanges superficiels
- Tableau 4.3 : Gain économisé en température et en amortissement par l'intégration d'un MCP de 1 cm d'épaisseur en surface intérieure du toit
- Tableau 4.4 : Coût du MCP et gain bénéficié en température et en amortissement
- Tableau 4.5 : Valeurs des résistances thermiques superficielles
- Tableau 4.6 : Coefficient de réduction des pertes de chaleur en fonction du coefficient de transmission thermique surfacique et du rapport de surface A_{iu} / A_{ue}
- Tableau 4.7 : Coefficient de réduction des pertes de chaleur en fonction du coefficient de transmission thermique surfacique et du rapport de surface A_{iu} / A_{ue}

- Tableau 4.8 : Valeur de la perméabilité
- Tableau 4.9 : Diffusion de chaleur par personne
- Tableau 4.10 : Diffusion de chaleur par l'éclairage et équipements électriques (cas de notre étude)
- Tableau 4.11 : Consommation moyenne des appareils électriques par jour (cas de notre étude)
- Tableau 4.12 : Facteurs solaires pour les deux types de vitrages les plus courants
- Tableau 4.13 : Besoins énergétiques totaux, l'influence du gain solaire passif (sans MCP)
- Tableau 4.14 : Économies en énergie dues au chauffage solaire passif (gain solaire) et à l'intégration du matériau MCP

Introduction générale

Introduction générale

De nos jours, les professionnels du domaine de l'habitat et de l'urbanisme tentent à réduire la consommation énergétique due aux besoins de chauffage et de climatisation. Un bâtiment réussi est un bâtiment adapté au site et au climat. Généralement, l'occupant désire des autres conditions que celles de son climat ordinaire.

A l'échelle nationale, le bâtiment se manifeste comme secteur prioritaire puisqu'il représente aujourd'hui l'un des principales sources des émissions de gaz à effet de serre. De nombreux efforts de recherche ont porté sur l'efficacité énergétique des bâtiments et plus précisément sur la réduction de leur consommation énergétique. Cette volonté a conduit à deux voies de recherche distinctes.

- Un axe de recherche centré sur l'amélioration de l'efficacité des équipements **[1-2]**.
- Le deuxième porte sur l'amélioration de l'enveloppe du bâtiment **[3-8]**, il s'agit de mettre au point des matériaux ayant un fort pouvoir isolant pour une faible épaisseur

En Algérie, les conditions climatiques des zones arides ne correspondent pas souvent aux zones de confort. On utilise alors différents moyens afin que le climat intérieur se différencie du climat extérieur en vue d'assurer notre confort. Avant de recourir au chauffage et/ou à la climatisation, de nombreuses possibilités sont utilisables pour maintenir l'ambiance intérieure des bâtiments dans la zone du confort thermique. L'avantage d'améliorer les performances thermiques de l'enveloppe du bâtiment est un enjeu majeur pour atteindre cet objectif.

L'ensoleillement du site est de première importance, où en fonction du soleil, le bâtiment s'ouvrira sur l'extérieur ou s'en protégera. Sa régularité aura une influence sur le chauffage. La température de l'air extérieur est tout aussi importante. La durée de la période froide y est étroitement liée à sa valeur moyenne qui dépend de l'importance de l'isolation thermique. En fonction de ses valeurs extrêmes, hivernales

ou estivales, on dimensionnera le chauffage et le rafraîchissement, naturel ou non. La valeur moyenne du coefficient de transmission de chaleur, appelé coefficient k (W/m^2K), caractérise l'enveloppe du bâtiment. Elle néglige la situation du bâtiment (climat) et son utilisation (habitants) et ne tient presque pas en compte des gains solaires. Les deux principales causes de surchauffe des bâtiments sont dues d'une part aux matériaux de construction utilisés et d'autre part à l'absence des protections solaires. C'est un sujet qui nécessite des simulations permettant des calculs parfaitement ciblés en rapport avec des compétences précises qu'il s'agit de mettre en jeu. Nous allons prouver dans cette thèse que le concept majeur de la réhabilitation thermique est basé sur la manière dont est constituée la paroi et plus particulièrement sur le calcul des résistances thermiques des murs. Durant la saison de chauffage, un transfert de chaleur s'effectue de l'ambiance intérieure chaude vers l'extérieur plus froid, à travers des parois. Le but d'intégrer des concepts passifs "comme les matériaux à changement de phase MCPs" dans l'enveloppe du bâtiment est de compenser ces déperditions pour maintenir une température intérieure globalement constante et acceptable. Lorsque le niveau d'isolation augmente, les charges thermiques par transmission diminuent. En d'autres termes, le coefficient de transmission de chaleur U_{moyen} du bâtiment ($W/m^2 K$) s'améliore par l'augmentation de l'épaisseur d'isolant dans les parois externes. L'intégration des MCPs dans la construction des parois, sous certaines conditions, peut entraîner une amélioration des performances thermiques de l'enveloppe.

Le premier chapitre a été consacré à des notions principales sur l'énergétique du bâtiment en mettant l'accent sur certaines lois physiques qui vont être déployées dans différentes applications. Il a apporté aussi des éléments du contexte énergétique y compris la consommation énergétique dans le secteur du bâtiment. Une description des systèmes de stockage qui contribuent étroitement à la quantification des phénomènes a été présentée.

Nous avons présenté ensuite (deuxième chapitre) des modèles mathématiques traduisant ainsi des échanges thermiques dans le corps du bâtiment et les conditions

climatiques de l'environnement. Nous allons étudier les performances thermiques de deux types de parois : une paroi composite opaque en pierre lourde et une autre en brique creuse. Les résultats seront traités en fonction du nombre de cavités et leurs formes géométriques. Une discussion approfondie et une analyse vont être apportées sur l'effet de nombre d'alvéolaires (cavités d'air) en se basant sur certains indices d'inertie thermique (déphasage et décrétement thermique).

Le chapitre 3 présente essentiellement l'application des MCPs qui permettent d'améliorer le confort et répondent à une architecture assez simple et énergétique. La méthode "enthalpie-porosité" a été utilisée pour la modélisation du stockage d'énergie par chaleur latente avec des conditions environnementales variables. La discussion s'est focalisée sur le processus de solidification-fusion. Une étude numérique sera effectuée pour évaluer le comportement thermique d'un mélange MCP-plâtre en utilisant un code de calcul CFD.

Le dernier chapitre est consacré à l'utilisation d'outils (modèles) d'évaluation du confort et d'efficacité énergétique. Le chauffage a eu un intérêt prépondérant. L'intégration des matériaux à changement de phase MCP dans l'enveloppe de bâtiment, son apport en termes d'efficacité énergétique, son influence sur le confort thermique d'un studio, ainsi que l'effet du stockage de l'énergie par chaleur latente sur la régulation des températures et d'humidités relatives de l'air, ont pris un intérêt important. Nous nous intéressons beaucoup plus à l'application des mécanismes de chauffage par voie passif qui permettent de contrôler la température et l'humidité de l'air intérieur et voir plus particulièrement l'influence des MCPs sur les économies potentielles sous un climat chaud.

La conclusion générale propose enfin une synthèse des résultats ainsi obtenus qui vont servir à proposer des solutions pour maîtriser les variabilités climatiques saisonnières de quelques problèmes physiques en thermique du bâtiment. Ceci mène souvent à la proposition des pistes aux futures réalisations et recherches.

Références

1. H. Ma, N. Du, S. Yu, W. Lu, Z. Zhang, N. Deng, C. Li, Analysis of typical public building energy consumption in northern China, *Energy and Buildings* 136 (2017) 139–150.
2. X. Lü, T. Lu, C. J. Kibert, M. Viljanen, Modeling and forecasting energy consumption for heterogeneous buildings using a physical - statistical approach, *Applied Energy* 144 (2015) 261–275.
3. S. Semahi, Contribution méthodologique à la conception des logements à haute performance énergétique (HPE) en Algérie, Développement d'une approche de conception dans les zones arides et semi-arides, Mémoire de Magister, École Polytechniques d'Architecture et d'Urbanisme EPAU, Alger, 2013.
4. Leroy, L'architecture écologique: développement durable, Faculté des sciences, Université de La Rochelle 2004-2005.
5. L. Chesné, Vers une nouvelle méthodologie de conception des bâtiments basée sur leurs performances bioclimatiques, thèse de doctorat, Centre de Thermique de Lyon, 2012.
6. Y. He, N. Li, L. Zhou, K. Wang, W. Zhang, Thermal comfort and energy consumption in cold environment with retrofitted Huotong (warm-barrel), *Building and Environment* 112 (2017) 285-295.
7. F. Ali-Toudert, J. Weidhaus, Numerical assessment and optimization of a low-energy residential building for Mediterranean and Saharan climates using a pilot project in Algeria, *Renewable Energy* 101 (2017) 327-346.
8. I. Tibermacine, L'impact de la typologie des habitats collectifs sur les conditions thermiques intérieures et l'efficacité énergétique, Cas de climat chaud et sec, Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider Biskra, 2016.

Introduction et rappels sur l'énergétique du bâtiment

Introduction et rappels sur l'énergétique du bâtiment

Ce chapitre est consacré à certains rappels sur l'énergétique de bâtiments en mettant en lumière les aspects essentiels de transfert thermique et les techniques de chauffage et de climatisation par voie passive. Ensuite, nous allons discuter et expliquer d'une manière convenable les lois fondamentales et les processus qui s'appliquent aux matériaux à changement de phase et leurs applications dans l'enveloppe du bâtiment. La discussion se poursuit ensuite à différentes méthodes de stockage telles que, le stockage sensible, latente et chimique.

1.1. Introduction

En Algérie, le secteur du bâtiment représente plus de 42% de la consommation totale d'énergie finale [1], ce dernier représente le quart des émissions de gaz à effet de serre GES. En ces dernières années, cette consommation a pris des augmentations énormes, et a associé des émissions indésirables dans l'atmosphère. Ces augmentations ont été causées principalement par la croissance démographique des citoyens qui provoque une augmentation du nombre de bâtiments, y compris la demande énergétique due à l'accroissement du taux d'équipement. L'amélioration du mode de vie des occupants a joué aussi un rôle prépondérant, la température et l'humidité sont contrôlées par les systèmes de chauffage et de climatisation centrale. Les conditions intérieures dues au gain interne (occupants, éclairages, appareils électriques) représentent une charge thermique importante pour l'enveloppe qui va influencer systématiquement le comportement thermique du bâtiment.

L'intégration des énergies renouvelables favorise une diminution de deux à dix fois les besoins énergétiques de nouveaux bâtiments et de deux à quatre fois les coûts liés aux bâtiments existants. L'efficacité énergétique s'impose comme une solution technique pour réduire la consommation énergétique. À propos, le programme d'efficacité énergétique à l'horizon 2030 s'intéresse au secteur du bâtiment, il vise la réduction de la consommation de 9% [2]. Dans ce cadre, certaines nouvelles technologies qui servent à améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments

neufs et anciens ont été déjà développées. L'une des solutions envisagées consistent à améliorer les performances thermiques de l'enveloppe par des matériaux à forte isolation thermique. L'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments exige d'exploiter de nouvelles méthodes et technologies, de sorte que ces solutions peuvent être rentables à diminuer la consommation énergétique et fournir une ambiance confortable pour les occupants.

Un bâtiment devrait assurer un confort acceptable, s'il est bien conçu et construit, il peut fournir un confort nettement supérieur (courbe A de la figure 1.1). Un tel bâtiment ne surchauffe pas ou peu en été et profite des gains solaires pendant les périodes froides, pour raccourcir la saison de chauffage [3].

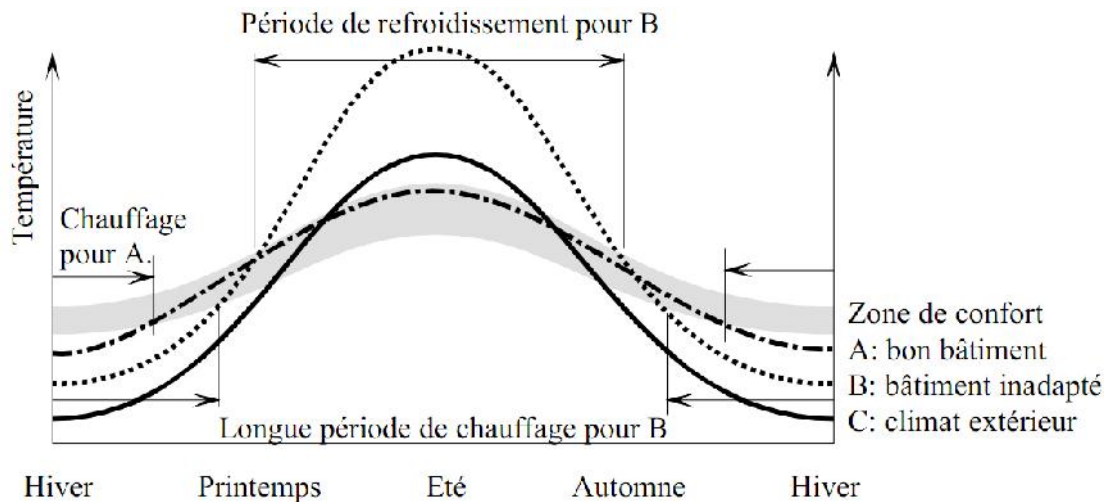


Figure 1.1: Évolution des températures dans des bâtiments au cours de l'année, sans effet des installations techniques de chauffage ou climatisation

La bande grisée représente les exigences de confort. C représente la température extérieure, A un bâtiment bien conçu et B un bâtiment inadapté à son climat. Un bâtiment inadapté à son climat a tendance à surchauffer en saison chaude et à être glacial en saison froide. Ces bâtiments consomment de grandes quantités d'énergie pour assurer un confort acceptable.

Pour limiter la consommation d'énergie à des valeurs raisonnables, il est nécessaire de savoir où agir. Il faut donc pouvoir prédire les flux d'énergie dans le bâtiment, afin d'agir là où les mesures d'économie d'énergie seront les plus efficaces et les mieux à même d'offrir un confort élevé. Cependant, Une démarche architecturale qui met

l'accent sur une conception de qualité de l'enveloppe du bâtiment, de ses volumes et des matériaux utilisés plutôt que sur l'ajout de techniques énergivores est bien sûr exigeante pour les concepteurs mais très bénéfique pour l'environnement mais également l'économie [3].

Les techniques passives ont permis de réduire la consommation énergétique due au système de chauffage et climatisation pendant toute l'année. Ces performances passent par une meilleure isolation thermique de l'enveloppe, ainsi un meilleur stratège de contrôler le stockage des apports solaires. L'intégration des MCPs dans l'enveloppe du bâtiment est l'une des méthodes passives qui peuvent fournir une ambiance confortable pour l'occupant. Les différents éléments de l'enveloppe du bâtiment (toit, parois extérieures, cloison, planché, portes, fenêtres...etc.) caractérisent l'efficacité énergétique du bâtiment, qui est un facteur essentiel de minimiser la consommation d'énergie et apporter un meilleur confort thermique fourni pour l'occupant. L'amélioration des performances thermiques de l'enveloppe est un défi face à la haute consommation énergétique des bâtiments dans les régions sud de l'Algérie. L'enveloppe est l'élément intermédiaire entre l'extérieur et l'ambiance intérieur du bâtiment, il reçoit les flux thermiques et les transmettent de l'extérieur vers l'intérieur par les trois types de transfert thermique (conduction, convection et rayonnement).

Par ailleurs, les bâtiments modernes sont identifiés essentiellement par deux paramètres qui sont : l'efficacité énergétique et le confort thermique. Avec le développement technologique dans le domaine de la thermique du bâtiment et l'avancement des outils de la simulation numérique, l'amélioration des performances thermiques de l'enveloppe du bâtiment représente le sujet majeur qui prend l'intention des chercheurs et les ingénieurs de l'architecture et de génie civil. L'enveloppe de bâtiment représente aussi la barrière qui sépare l'ambiance intérieure et l'environnement extérieur. A l'échelle nationale, les constructeurs utilisent généralement des matériaux lourds comme le parpaing, la pierre et le béton. Ce type de constructions sont inconfortables et consomment beaucoup d'énergie, les

installations des systèmes de chauffage et climatisation prennent beaucoup d'espace et perpètrent beaucoup d'énergie. Aujourd'hui, les constructeurs peuvent appliquer des nouveaux matériaux dans les constructions pour réduire la consommation énergétique et assurer une ambiance confortable à l'intérieur des bâtiments.

1.2. Bilan de la consommation énergétique

La figure 1.2 ci-dessous donne un aperçu sur la consommation énergétique totale dans les secteurs de bâtiment résidentiel et commercial. Dans ce contexte, les experts ont prévisionné dans plusieurs actes des augmentations énormes de la consommation énergétique dans le monde entre 2010 et 2050. Cependant, dans la région méditerranée (nord de l'Afrique), qui englobe des pays en cours de développement enregistrent une augmentation flagrante. Ils se caractérisent par une consommation énergétique très élevée causée par plusieurs paramètres. Généralement, les citoyens dans ces pays utilisent des systèmes de chauffage et climatisation actifs à un coût d'exploitation très élevé. L'enveloppe des bâtiments résidentiels dans la région méditerranée est construite par des matériaux à faible isolation thermique qui provoque des pertes thermiques à travers les parois extérieures. Alors, le rendement de l'exploitation de gain calorifique dans les bâtiments dû aux parois opaques et aux ouvertures est faible par rapport à des bâtiments modernes, où l'isolation thermique et les ouvertures ont été bien étudiées. L'isolation thermique représente une barrière qui sépare l'ambiance intérieure et l'environnement extérieur.

La consommation d'énergie due aux besoins de chauffage et de climatisation dans les bâtiments résidentiels peut être décomposée comme suit :

$$Energie_{résidentiel} = h \frac{p}{h} \frac{Surface}{p} \frac{Energie}{Surface} \quad (1.1)$$

$Energie_{résidentielle}$: par définition la demande de l'énergie thermique totale résidentielle
 h et p/h : les inducteurs d'activité, $[h]$ étant le nombre de ménages, $[p / h]$ est le nombre de personnes (p) vivant dans chaque ménage.

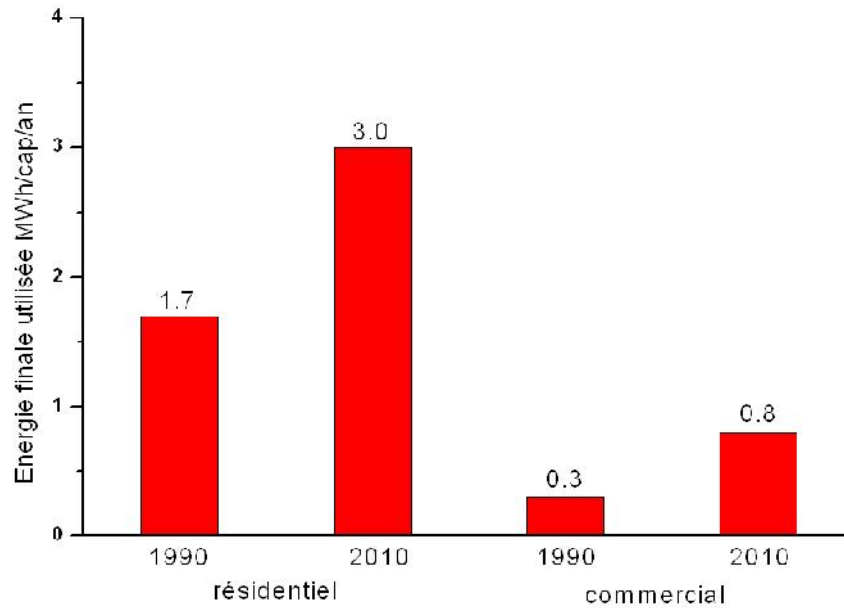


Figure 1.2 : Consommation énergétique totale dans les secteurs de bâtiment résidentiels et commercial [4]

[Surface/p] : le facteur d'intensité d'utilisation, défini comme étant la surface de plancher (généralement en m^2) par personne

Energie/Surface : le facteur d'intensité d'énergie, la consommation annuelle d'énergie thermique (généralement en kWh) par unité de surface de plancher, également appelée consommation énergétique spécifique.

Les émissions de gaz à effet de serre (GES) du secteur du bâtiment ont doublé depuis 1970 pour atteindre 9,18 GtCO₂ eq en 2010. La plupart des émissions de gaz à effet de serre (6,02 Gt) sont des émissions indirectes de CO₂ provenant de la consommation d'électricité dans les bâtiments. Celles-ci ont affiché une croissance dynamique au cours de la période étudiée par rapport aux émissions directes, qui ont à peu près stagné au cours de ces quatre décennies (figure 1.3). Par exemple, les émissions indirectes résidentielles ont été multipliées par cinq et les émissions commerciales par quatre.

En 2010, les bâtiments représentaient 32% (24% pour les logements et 8% pour les commerciales) de la consommation totale finale d'énergie mondiale (IEA, 2013), ou 32,4 PWh, étant l'un des plus grands secteurs d'utilisation finale au monde. Le chauffage des locaux représentait entre 32% et 34% de la consommation d'énergie finale mondiale dans les sous-secteurs des bâtiments résidentiels et commerciaux en

2010 (figure 1.4). De plus, dans le sous-secteur commercial, l'éclairage était très important, tandis que la cuisson et le chauffage de l'eau étaient des utilisations finales importantes dans les bâtiments résidentiels.

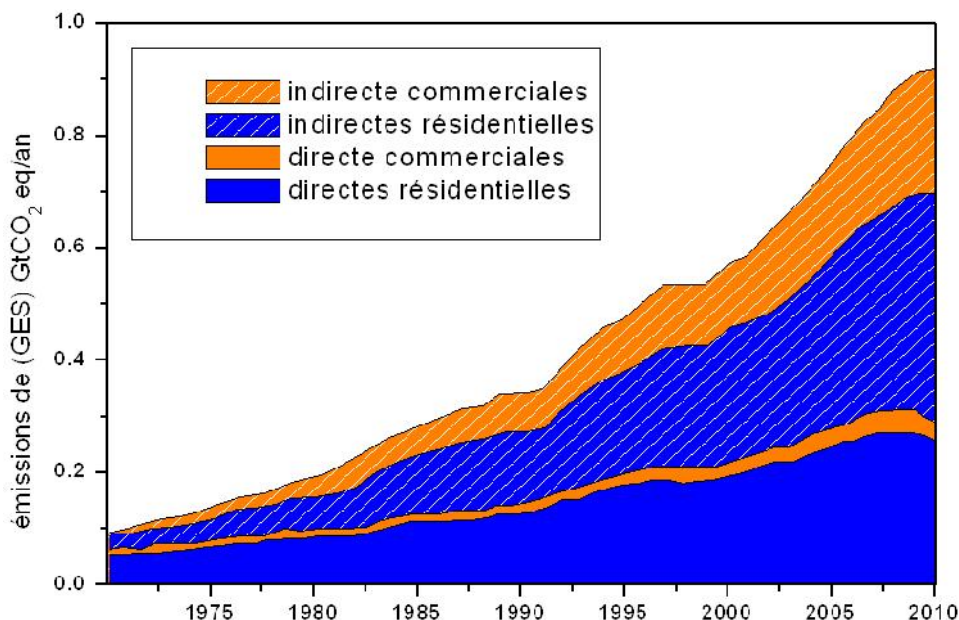


Figure 1.3 : Les émissions de gaz à effet de serre (GES) du secteur du bâtiment [4].

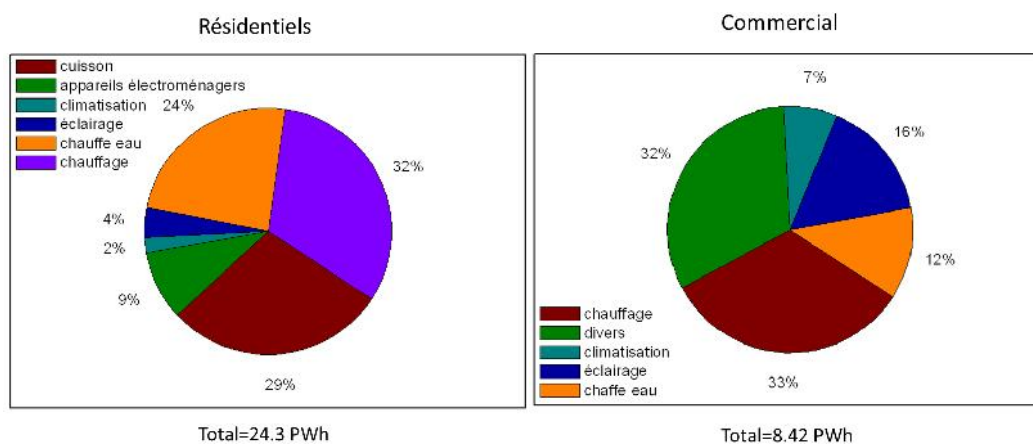


Figure 1.4 : Consommation totale d'énergie mondiale [4].

Les figures 1.5 et 1.6 décrivent les principales tendances en matière d'utilisation de l'énergie pour le chauffage et de la climatisation. La consommation d'énergie de chauffage et de climatisation dans les bâtiments résidentiels devrait augmenter de 79% entre 2010 et 2050 (figure 1.5). Cependant, le nombre d'habitat et la superficie par habitat tendent à augmenter la consommation d'énergie, tandis que la

diminution du nombre de personnes par habitat et de la consommation d'énergie spécifique tend à diminuer la consommation d'énergie.

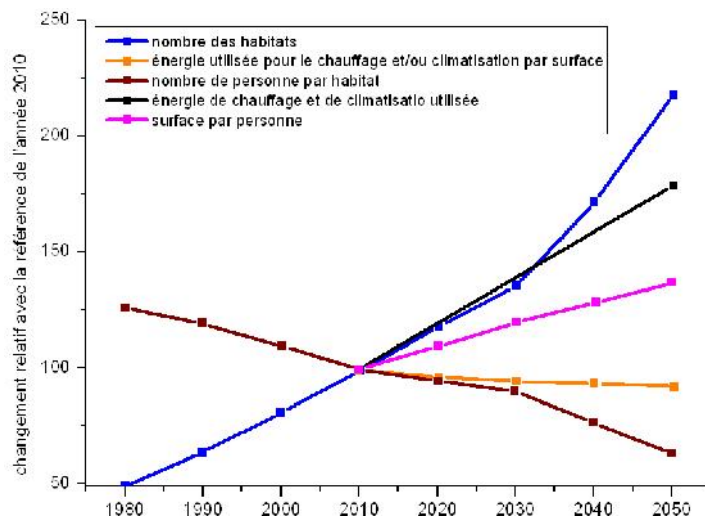


Figure 1.5 : Utilisation de l'énergie pour le chauffage et la climatisation dans le monde [4].

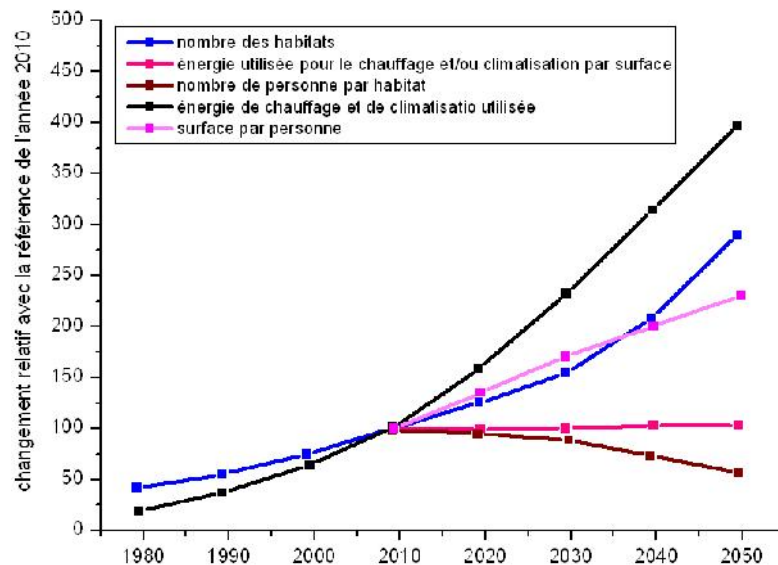


Figure 1.6 : Utilisation de l'énergie pour le chauffage et la climatisation dans l'Afrique de Nord et Moyen-Orient [4].

1.3. Phénomènes, approches méthodologiques et paramètres caractéristiques de l'enveloppe en physique du bâtiment

Cette branche scientifique a connu son émergence durant la seconde moitié du 20^{ème} siècle en parallèle aux préoccupations énergétiques grandissantes, conséquences des deux crises pétrolières des années 70 puis de l'apparition du dérèglement climatique. Cette science se base sur l'évaluation des besoins

énergétiques des bâtiments en intégrant les principes de la mécanique des fluides, des transferts de chaleur, de la science des matériaux ou encore de la météorologie. Elle repose en grande partie sur l'évaluation du comportement thermique du bâtiment [5].

1.3.1. Capacité thermique

La chaleur est l'énergie liée à l'agitation aléatoire des molécules constituant la matière. Cette agitation se mesure par la température, et la chaleur par l'augmentation de température obtenue dans un matériau donné. Pour chauffer une masse m [kg] d'un matériau de chaleur spécifique c [J/kg K], de la différence de température $\Delta\theta$ [K], il faut une quantité de chaleur Q [J] donnée par l'expression ci-dessous:

$$Q = m c \Delta\theta \quad (1.2)$$

1.3.2. Conduction

La conduction est le transfert de chaleur d'un corps à une plus haute température à un autre corps en contact physique avec cela à une température inférieure. Le processus de conduction survient au niveau moléculaire et implique le transfert d'énergie des molécules plus énergiques à ceux avec un niveau d'énergie inférieur (exemple : la chaleur transmise à travers l'enveloppe d'une maison se fait par conduction thermique). Le flux de chaleur par conduction q (W/m^2) est proportionnel au gradient de température et le coefficient de proportionnalité ($W/m K$) est une propriété de transport connue est appelée la conductivité thermique et est une caractéristique de la matière. Le signe moins est une conséquence du fait que le transfert de chaleur d'un endroit de plus haute température, T (K), à un endroit de température inférieure. L'équation 1.3 est la forme unidimensionnelle de la loi de Fourier de conduction de chaleur [6].

$$q'' = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (1.3)$$

En reconnaissant que le flux de chaleur est une quantité vectorielle, nous pouvons écrire une expression plus générale de la loi de Fourier :

$$q'' = \lambda \nabla T \quad (1.4)$$

Si nous estimons qu'un flux de chaleur unidimensionnelle se propage le long de la direction x dans une paroi plane, l'application directe de l'équation 1.4 d'écrire la formule suivante :

$$q = \frac{\lambda S}{\Delta x} (T_2 - T_1) \quad (1.5)$$

Où la conductivité thermique est considérée constante, Δx est l'épaisseur de la paroi et T_1 et T_2 sont les températures des surfaces extérieure et intérieure de la paroi. Notez que $q/A=q''$, où q est le taux de transfert de chaleur par une région A. L'équation 1.5 peut être assimilée comme suit :

$$q = \frac{T_2 - T_1}{\Delta x / \lambda S} = \frac{T_2 - T_1}{R_{th}} \quad (1.6)$$

Dans le traitement des problèmes de conduction, il est souvent commode d'introduire une autre propriété qui est rattachée à la conductivité thermique, à savoir, la diffusivité thermique α ,

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (1.7)$$

Où ρ est la densité et C_p est la chaleur spécifique à la pression constante.

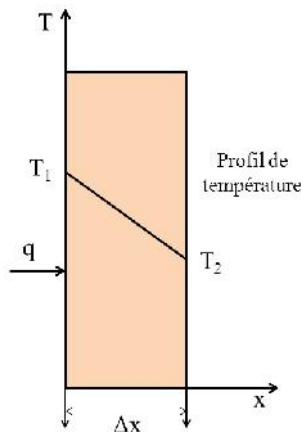


Figure 1.7 : Conduction thermique unidimensionnelle à travers une paroi plane

1.3.3. Convection

La convection, transport de chaleur par transport (naturel ou forcé) de matières chaudes vers une zone froide ou vice versa. La convection se produit par le

mouvement des molécules d'un fluide en présence d'une différence de température. Typiquement, elle est utilisée pour décrire l'échange de chaleur à une surface en raison du mouvement d'air à travers cette surface. Le transfert de chaleur est dit convection forcée si le mouvement de fluide est provoqué par une pompe, un ventilateur ou un appareil semblable. On appelle le transfert de chaleur par convection naturelle si le mouvement de fluide se produit à la suite de la différence de densité produite par la différence de température [7].

Dans les processus de transfert de chaleur convective produit par un fluide qui s'écoule d'un côté d'une paroi à une faible vitesse, il est convenable d'introduire un coefficient de transfert de chaleur h_c , défini par l'équation 1.8, connu par la loi de Newton :

$$q_{conv} = h_c (T_w - T_f) \quad (1.8)$$

Ici T_w est la température de surface et T_f est une température liquide caractéristique. La valeur du coefficient de convection h_c (W/m^2K) dépendra de la géométrie (la forme et l'orientation de surface), les propriétés matérielles (la rugosité de surface), les propriétés liquides (la viscosité), la vitesse de ruisseau libre liquide (la vitesse et la direction) et la température du liquide en gros et de la surface.

La résistance thermique dans le transfert de chaleur par convection est donnée par l'équation 1.9.

$$R_{th} = \frac{1}{h_c S} \quad (1.9)$$

Au mur, la vitesse du fluide est nulle et le transfert de chaleur survient par la conduction. Donc, nous pouvons appliquer la loi de Fourier au fluide à $y = 0$ (où y est l'axe normal à la direction d'écoulement).

$$q'' = -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (1.10)$$

Où λ est la conductivité thermique du fluide. En combinant cette équation avec la loi de Newton, nous obtenons alors :

$$h_c = \frac{q''}{T_w - T_f} = - \frac{\lambda \partial T / \partial y|_{y=0}}{T_w - T_f} \quad (1.11)$$

1.3.4. Rayonnement

L'air est un fluide non-participatif pour le rayonnement. Ceci signifie que le rayonnement (solaire ou interne) traverse l'air sans interagir avec lui. Ce seront donc les parois qui absorberont le rayonnement, ce qui se traduira par une élévation locale de la température de surface. Celle-ci induira une augmentation de la température de l'air à proximité.

Un corps chauffé émet des ondes électromagnétiques (rayonnement thermique) dans toutes les directions. Tous les objets ayant une température au-dessus du zéro absolu (0 K ou -273.18 °C) émettent des rayonnements thermiques dans un intervalle de longueurs d'onde. La quantité d'énergie émise par un corps à n'importe quelle longueur d'onde est décrite par la Loi de Planck, qui peut être écrite comme :

$$q = \sigma S_1 F_{1-2} (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.12)$$

Où σ est le constant de Stefan Boltzmann qui égale $5.669 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$, A est la surface du corps, F_{1-2} est le facteur de forme.

1.3.5. L'inertie thermique

L'enveloppe d'un bâtiment représente une barrière qui sépare l'ambiance intérieure de la fluctuation des conditions climatiques de l'extérieur. Son rôle essentiel est de créer une ambiance confortable pour les occupants. Le respect des réglementations thermiques permet de limiter les pertes thermiques des bâtiments et économiser de 20 à 30 % de la consommation énergétique due au système de chauffage et de climatisation [8]. Le comportement thermique d'un bâtiment en particulier au niveau de l'enveloppe est caractérisé par plusieurs paramètres qui sont : les facteurs architecturaux (le design du bâtiment, l'orientation, les matériaux de construction), et les conditions climatiques de l'environnement extérieur (le rayonnement solaire, la température, le vent et l'humidité). En d'autres termes, pour caractériser l'enveloppe du bâtiment, on peut étudier les paramètres qui dépendent

aux conditions de l'environnement (fixées ou fluctuantes) et à la structure des parois (matériau de construction et géométrie).

Régime transitoire

En régime transitoire, la caractérisation de l'enveloppe sera basée sur l'étude de deux paramètres essentiels : le déphasage (τ) et le facteur de décrémentation ou facteur de réduction thermique (f). Ces phénomènes ont permis d'introduire le retard et l'amortissement que subit une onde thermique dans une paroi pénétrant à l'intérieur du bâtiment. Le déphasage thermique (τ) est le temps qu'il faut à la chaleur pour pénétrer à l'intérieur du bâtiment, il est défini comme étant la différence entre le maximum de température extérieure et le maximum de la température intérieure. Ce déphasage dépend également du produit (ρC_p), qui se considère comme indice du stockage d'énergie provenant du rayonnement solaire. Le facteur de décrémentation (f) est utilisé pour représenter la réduction du gradient de température à travers une paroi à la suite du stockage de chaleur dans cette paroi. Cependant, ces paramètres sont liés aux propriétés thermo physiques de l'enveloppe qui sont : la conductivité thermique, la chaleur spécifique et la masse volumique.

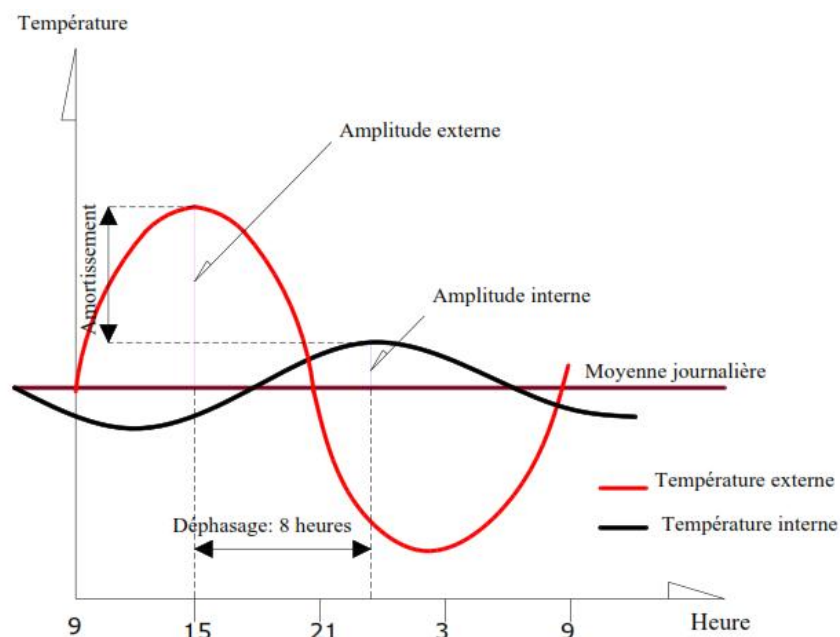


Figure 1.8 : Déphasage et amortissement d'une onde de chaleur à travers un matériau homogène [9]

Régime permanent

Le rapport de variation de température à travers une couche est proportionnel au rapport de résistances thermiques telles que:

$$\frac{\Delta T}{T_T} = \frac{R}{R_T} \quad (1.13)$$

Où ΔT différence de température à travers une couche, T_T température totale à travers la paroi, R résistance de cette couche et de R_T résistance totale de la paroi. Une simple technique est appelée la méthode de Glaser qui s'est utilisée pour donner la différence de température à travers chaque couche (figure 1.9). Pour diminuer la température à l'intérieur du bâtiment il faut diminuer la différence de température totale à travers la paroi, ceci minimise la quantité de chaleur transmise de l'extérieur vers l'ambiance intérieure du bâtiment. Donc, il est nécessaire d'utiliser les matériaux à forte isolation thermique comme (les briques creuses, les fibres, les mousses...etc.)

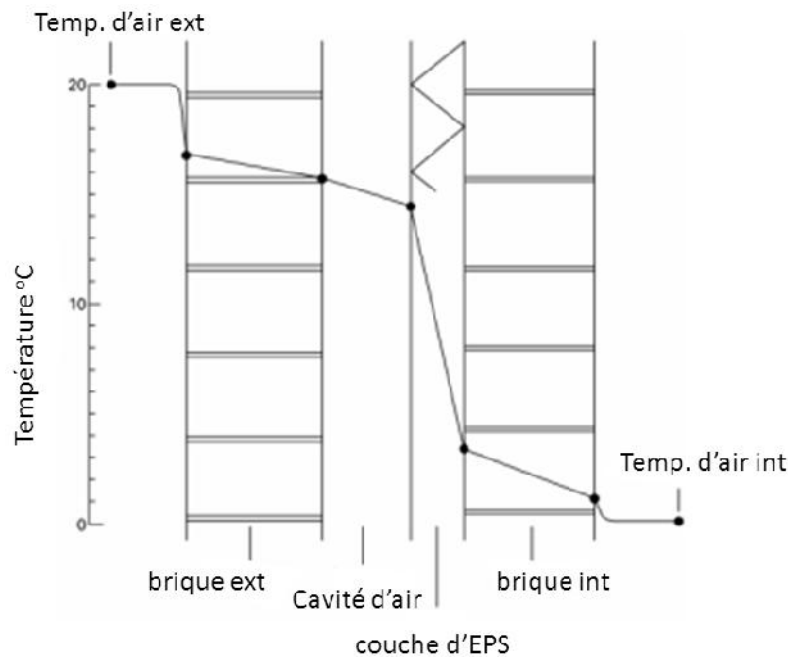


Figure 1.9: Méthode de Glaser pour les gradients de température à l'état d'équilibre dans un mur composite multicouche [10].

La figure 1.9 décrit une paroi extérieure d'une enveloppe constituée de deux couches de briques, se situant à l'intérieure et à l'extérieure, isolée par une couche d'EPS et une lame d'air. Les points représentent les températures sur la paroi.

1.4. Techniques de chauffage et de climatisation

Les techniques passives mises en place qui assurent une ambiance confortable à l'intérieur du bâtiment exploitent l'énergie solaire comme source de chaleur. Cependant, les éléments de l'enveloppe jouent un rôle important pour contrôler et gérer le cycle d'exploitation des rayonnements solaires. Généralement, les techniques de chauffage et de climatisation passifs ont pour objectif de maintenir l'ambiance intérieure de bâtiment dans la zone de confort thermique avec une consommation d'énergie minimum. On peut spécifier les avantages de chauffage et de climatisation passifs par faible coût d'exploitation et de maintenance.

Les techniques passives sont des méthodes basées sur l'architecture qui améliore les performances thermiques du bâtiment telles que l'orientation du bâtiment, l'utilisation de l'isolation thermique de l'enveloppe, l'amélioration de l'inertie thermique des éléments de l'enveloppe par l'utilisation de nouveaux matériaux, les protections solaires par l'utilisation des masques solaires, la récupération des apports internes et solaires gratuits, l'utilisation de la technique de chauffage solaire et le refroidissement passif.

Les techniques actives sont des méthodes qui utilisent des appareils fonctionnant par l'énergie pour maintenir le confort thermique à l'intérieur du bâtiment, tels que les systèmes de chauffage et climatisation mécaniques.

1.4.1. Climatisation passive des bâtiments

En raison de l'augmentation de coût de la consommation énergétique due au système de la climatisation mécanique, le climat de l'ambiance intérieure du bâtiment peut être contrôlé par des voies passives. La figure 1.10 représente la classification des stratégies passives pour le bâtiment proposé par Geetha et al. [11].

1.4.2. Architecture solaire passive

L'architecture solaire passive permet les bâtiments d'exploiter les conditions climatiques de son environnement tels que les rayonnements solaires, tout en minimisant les effets fatals du climat (tels que les basses températures nocturnes) sur

le niveau de confort du bâtiment. Le chauffage solaire passif permet de réduire l'énergie nécessaire pour maintenir les bâtiments à un meilleur niveau de confort thermique, en remplaçant une partie de la chaleur provenant de la biomasse ou des combustibles fossiles par une chaleur provenant de l'énergie solaire [12].

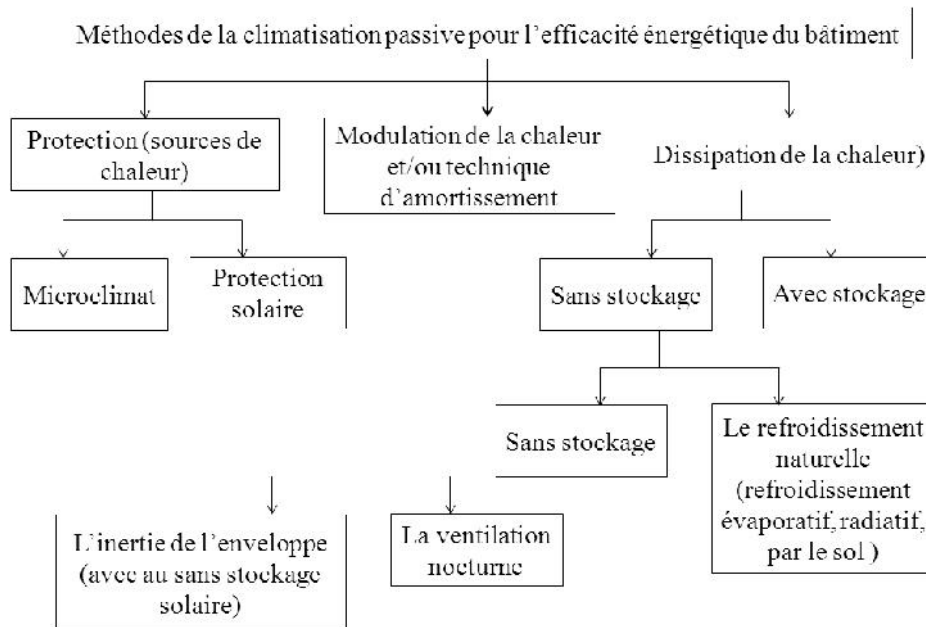


Figure 1.10 : Classification des stratégies passives pour le bâtiment proposé par Geetha et al [12].

La conception solaire passive

La conception solaire passive pour l'objectif d'exploiter l'énergie solaire pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments par exposition au soleil. Lorsque les rayonnements solaires captés par l'enveloppe du bâtiment, les matériaux de construction peuvent réfléchir, transmettre ou absorber ces rayonnements solaires. Cependant, la chaleur produite par le soleil provoque un mouvement de l'air prévisible dans les bâtiments. Ces réponses de base à l'énergie solaire conduisent à des éléments de conception, des choix de matériaux et des emplacements pouvant générer des effets de chauffage et de climatisation dans une maison.

Les principes d'un chauffage solaire passif

La conception solaire passive pour le chauffage d'un bâtiment basé sur cinq éléments (figure 1.11).

Ouverture / Collecteur : La grande surface vitrée à travers laquelle les rayonnements solaires pénètrent dans le bâtiment à travers les fenêtres. Là où les ouvertures doivent être orientées d'une façon adéquate pour capter le maximum des rayons solaires.

Absorbeur: Les murs sont l'élément essentiel du stockage. La surface des murs absorbe les rayons solaires puis les stocke sous forme de chaleur durant toute la journée.

Masse thermique : L'utilisation des matériaux de bonnes caractéristiques thermophysiques permet de stocker le maximum des rayons solaires. Les démarches visent aussi à contrôler les fluctuations des températures de l'air intérieur.

Distribution : C'est la partie pour laquelle la chaleur solaire circule dans le corps du bâtiment par les différents modes de transfert thermique.

Contrôle: La conception de l'enveloppe est utilisée pour protéger la zone d'ouverture pendant les mois d'été par son toit. Les autres éléments contrôlent la température de l'air intérieur par des détecteurs électroniques [13].

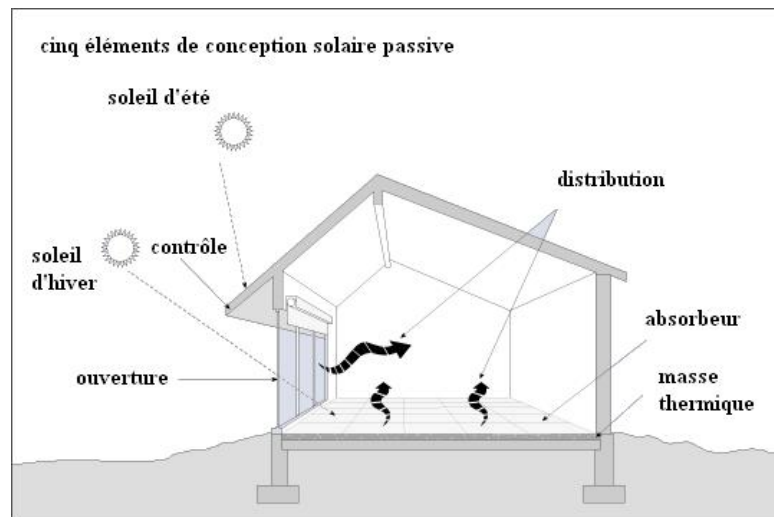


Figure 1.11 : Les cinq éléments de la conception de chauffage passif [13].

1.5. Stockage thermique par changement de phase

1.5.1. Base thermodynamique

Les matériaux à changement de phase (MCP) désignent les matériaux ayant une aptitude de changer son état à une température de fusion ou de solidification. Cette

caractéristique permet aux MCPs d'absorber et de libérer (stockage et déstockage) une quantité de chaleur à une température presque constante pendant le processus de changement de phase solidification-fusion. Le passage de l'état liquide à l'état solide des MCPs (la solidification) permet de libérer une grande quantité de chaleur de manière presque isothermique, ainsi lorsqu'ils fondent, ils absorbent la même quantité de chaleur, là encore avec de faibles variations de température. Cette propriété de changement de phase permet aux MCPs de jouer un rôle d'un réservoir de chaleur, car ils peuvent stocker de 4 à 14 fois ce que peut gérer une méthode de stockage de chaleur sensible [14]. Ce type de matériaux a attiré l'attention au cours des dernières années en tant que matériaux de stockage thermique à chaleur latente.

1.5.2. Différents systèmes de stockage

Cette partie introduit des systèmes de stockage de l'énergie thermique sous toutes leurs formes : thermochimique, sensible et latente. Pour pouvoir utiliser la chaleur ou le froid après un certain temps, la méthode de stockage doit être réversible. La figure 1.12 montre quelques méthodes possibles; elles peuvent être divisées en deux processus physiques et chimiques [15].

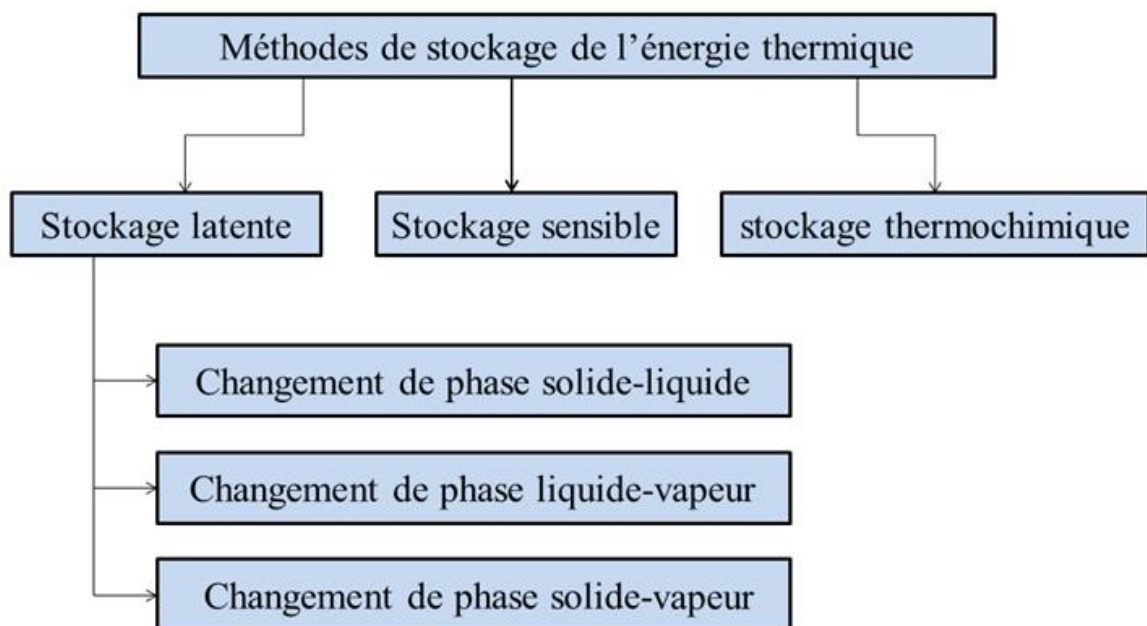


Figure 1.12: Méthodes possibles de stockage réversible de la chaleur et du froid [15].

Pour comprendre les différents avantages de chaque méthode, et particulièrement du stockage de chaleur latente, il est nécessaire de faire une définition des différentes méthodes de stockage d'énergie thermique.

Systèmes de stockage par chaleur sensible

Pendant plusieurs années, la manière de stockage thermique la plus utilisée est le stockage par chaleur sensible. La figure 1.13 montre que l'augmentation de stockage de la chaleur provoque une augmentation de la température du matériau stockeur soit dans l'état solide ou liquide pure. Un capteur peut détecter cette augmentation de la température et la chaleur stockée s'appelle ainsi la chaleur sensible.

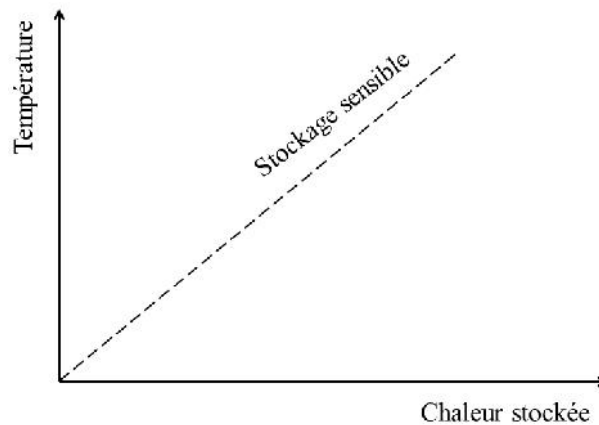


Figure 1.13: Stockage de chaleur sensible

Les systèmes de stockage de chaleur sensible sont ceux qui profitent de leur chaleur spécifique élevée c_p , pour fonctionner en tant que matériau stockeur de chaleur sensible. Ainsi, grâce à la valeur élevée de la densité d'énergie, ils sont capables de stocker des quantités de chaleur plus élevées que d'autres matériaux, avec des gradients de température plus faibles et un gain de place réduit. D'ailleurs, le rapport entre la chaleur stockée Q et l'élévation de température T est la capacité thermique C du moyen de stockage. La chaleur sensible est définie comme suit:

$$\Delta Q = m c_p \Delta T = C \Delta T \quad (1.14)$$

Souvent, la capacité thermique est donnée en fonction de la quantité de matière, du volume ou de la masse. On parle alors de capacité thermique spécifique molaire,

volumétrique ou spécifique à la masse et on la note C . L'équation 1.14 montre le cas de la capacité thermique spécifique à la masse où m est la masse du matériau de stockage. Le stockage de chaleur sensible est souvent utilisé avec des solides comme la pierre ou la brique, ou des liquides comme l'eau. Les gaz ont des capacités calorifiques volumétriques très faibles et ne sont donc pas utilisés pour le stockage de chaleur ou de froid sensibles [15].

Systèmes de stockage par chaleur latente

Si la chaleur est stockée sous forme de chaleur latente, un changement de phase du matériau de stockage est utilisé. Il y a plusieurs options avec des avantages et des inconvénients distincts. Le changement de phase solide-liquide par fusion et solidification peut stocker de grandes quantités de chaleur ou de froid si un matériau approprié est sélectionné. La fusion est caractérisée par un petit changement de volume, généralement moins de 10%. Si un récipient peut s'adapter à la phase avec le plus grand volume, généralement le liquide, la pression n'est pas modifiée de manière significative et par conséquent, la fusion et la solidification du matériau de stockage se poursuivent à une température constante si le matériau est pur. Lors de la fusion, pendant que la chaleur est transférée au matériau de stockage, le matériau pur conserve toujours sa température constante à la température de fusion (température de changement de phase) (figure 1.14). Si la fusion est terminée, un transfert de chaleur supplémentaire entraîne à nouveau un stockage de chaleur sensible. Le stockage de la chaleur de fusion ne peut pas être détecté à partir de la température, car la fusion se poursuit à une température constante. La chaleur fournie lors de la fusion est donc appelée chaleur latente, et processus de stockage de la chaleur latente. En raison du faible changement de volume, la chaleur stockée est égale à la différence d'enthalpie

$$\Delta Q = \Delta H = m \Delta h \quad (1.15)$$

La chaleur latente, c'est-à-dire la chaleur stockée pendant le processus de changement de phase, est ensuite calculée à partir de la différence d'enthalpie H entre la phase solide et la phase liquide. Dans le cas d'un changement de phase

solide-liquide, on parle d'enthalpie de changement de phase solide-liquide, d'enthalpie de fusion ou de chaleur de fusion. Les matériaux à changement de phase solide-liquide, qui conviennent au stockage de chaleur ou de froid, sont communément appelés matériaux de stockage de chaleur latente ou simplement matériau à changement de phase (MCP). Le changement de l'état initial stable à l'état liquide final stable se fait en trois étapes conformément à la figure la figure 1.14.

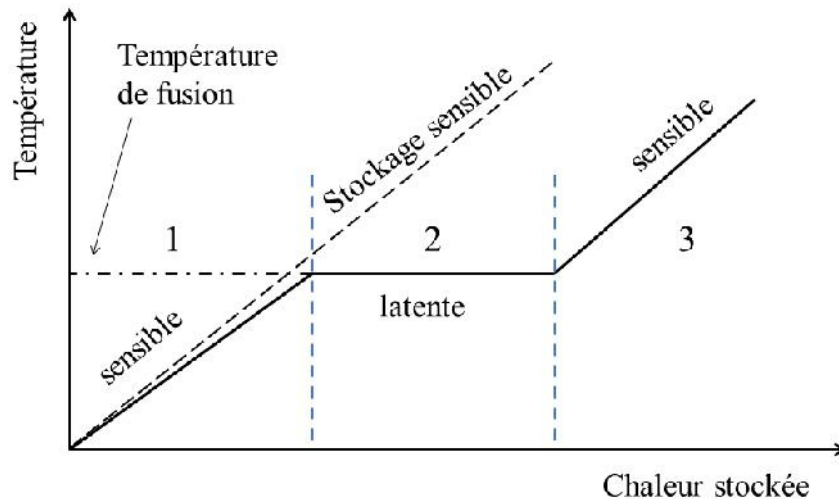


Figure 1.14: Stockage de chaleur sous forme de chaleur latente dans le cas d'un changement de phase solide-liquide [15].

Premièrement, le passage de l'état initial solide à l'état liquide (zone 1) par un écart de température $T_s = T_f - T_1$, cet écart permet au matériau d'absorber une quantité de chaleur dite sensible $Q_1 = m C_s (T_f - T_1)$ qui provoque la fusion des MCPs. L'état intermédiaire (zone 2) qui correspond au changement de phase à température constante T_f est une étape où le matériau stocke une quantité de chaleur dite latente $Q_2 = m H$. L'état finale provoqué par un écart de température $T_f = T_2 - T_f$ correspond au stockage de chaleur sensible à l'état liquide pur $Q_3 = m C_l (T_2 - T_f)$ [14].

Système de stockage thermochimique

Lorsqu'une réaction chimique a lieu, il y a une différence entre l'enthalpie des substances présentes à la fin de la réaction et l'enthalpie des substances au début de la réaction. Cette différence d'enthalpie est appelée chaleur de réaction. Si la réaction est endothermique, la chaleur s'est absorbée pendant son déroulement; si la

réaction est exothermique, elle dégagera cette chaleur. Toute réaction chimique avec une chaleur de réaction élevée peut être utilisée pour le stockage de l'énergie thermique si les produits de la réaction peuvent être stockés et si la chaleur stockée pendant la réaction peut être libérée lorsque la réaction inverse a lieu. Si tous les composants impliqués dans la réaction chimique sont solides ou liquides, l'espace de stockage nécessaire est comparativement réduit. Si l'un des composants est un gaz, les mêmes restrictions s'appliquent à celles relatives au changement de phase vapeur-liquide. Une solution possible consiste à utiliser l'oxydation et la réduction de produits chimiques avec de l'oxygène O_2 , l'oxygène étant facilement disponible dans l'air ambiant.

Comme l'énergie de liaison dans une réaction chimique est généralement importante, la température nécessaire pour détruire le lien est généralement haute. Il y a deux types de réactions dans le stockage thermochimique: les réactions chimiques endothermiques réversibles et les réactions de sorption.

- Réactions chimiques endothermiques réversibles

La réaction endothermique est réversible et va permettre de stocker de la chaleur, cette chaleur sera dégagée lorsque la réaction est exothermique. Soient A, B et C trois composés chimiques distincts et Q une quantité d'énergie thermique, la réaction s'écrit :



- Réactions de sorption

La sorption comprend l'adsorption (en surface) et l'absorption (dans le volume) qui vont consommer de l'énergie. La transformation inverse, la désorption, résulte en la libération des molécules précédemment sorbées. Alors que la désorption est endothermique (stockage), la sorption est exothermique (déstockage). De la comparaison entre les différents types de système de stockage on peut conclure que : l'ordre de grandeur de la densité énergétique des systèmes thermochimiques est cinq fois plus important que les systèmes par changement de phase qui ont eux-

mêmes une densité de stockage de deux à trois fois plus élevé que les systèmes sensibles [16].

1.6. Applications potentielles du stockage de la chaleur latente avec changement de phase solide-liquide

Les champs d'applications potentielles du MCP peuvent être trouvés directement à partir des différences de base. La différence entre le stockage de la chaleur sensible et latente est indiquée sur la figure 1.15.

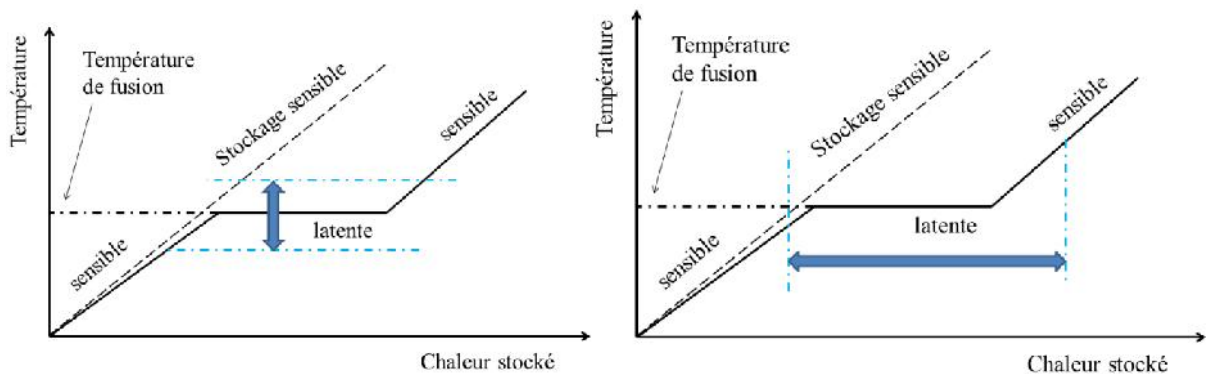


Figure 1.15: Champs d'application potentielles du MCP: contrôle de la température (à gauche) et stockage et fourniture de chaleur ou de froid avec de faibles variations de température (à droite)

1.6.1. Contrôle de la température

Comme indiqué à gauche dans la figure 1.15, la chaleur peut être fournie à un matériau à changement de phase ou extraite de celui-ci sans changement significatif de sa température. Par conséquent, les MCPs peuvent être utilisés pour stabiliser la température dans une application (comme la stabilisation de la température intérieure dans un bâtiment).

1.6.2. Stockage de la chaleur ou du froid avec une densité de stockage élevée

D'un autre point de vue, la courbe illustrée à droite, les MCPs sont également capables de stocker de grandes quantités de chaleur ou de froid lors de changements de température relativement faibles. Une comparaison des densités de stockage d'énergie obtenues avec différentes méthodes est indiquée sur le tableau 1.1.

Tableau 1.1 : Comparaison des densités de stockage typiques de différentes méthodes de stockage d'énergie (3,6 MJ = 1 kWh) [15].

	MJ / m ³	KJ / kg	Domaine de validité
Chaleur sensible			
Granite	50	17	T = 20 °C
Eau	84	84	T = 20 °C
Chaleur latente de la fusion			
Eau	306	330	T _f = 0 °C
Paraffine	180	200	5 °C < T _f < 130 °C
Hydrates de sel	300	200	5 °C < T _f < 130 °C
Sels	600 - 1500	300 - 700	300 °C < T _f < 800 °C
Chaleur latent de vaporisation			
Eau	2452	2450	Conditions ambiantes
Chaleur de réaction chimique			
H ₂ gaz (oxydation)	11	120000	300 K, 1 bar
H ₂ gaz (oxydation)	2160	120000	300 K, 200 bars
H ₂ liquide (oxydation)	8400	120000	20 K, 1 bar
Gaz fossile	32	-	300 K, 1 bar
Gasoil (pétrole)	33000	43200	-
Energie électrique			
Pile Zinc/oxyde de manganèse	-	180	-
Batterie au plomb	-	70 - 180	-

Selon le tableau 1.1, le MCP peut stocker environ 3 à 4 fois plus de chaleur par volume que la chaleur sensible stockée dans des solides ou des liquides dans un intervalle de température de 20 °C. Cela peut constituer un avantage important dans de nombreuses applications, comme le chauffage domestique. Le stockage d'énergie chimique dans le pétrole montre cependant une densité de stockage à environ 100 fois supérieure à celle du MCP. Aujourd'hui une grande partie de l'énergie est fournie à l'utilisateur final sous forme d'électricité, une comparaison avec le stockage de l'énergie électrique est également intéressante. Les batteries présentent des densités de stockage plus petites ou comparables à celles du stockage de chaleur latente. Si la demande finale concerne la chaleur, il est donc souvent possible de stocker la chaleur dans un MCP au lieu de stocker de l'énergie électrique et de convertir l'énergie électrique en chaleur à la demande [15].

1.7. Classification des MCP

Les matériaux à changements de phases sont nombreux et disponibles dans n'importe quelle gamme de température souhaitée. Les MCPs peuvent être classés selon leur nature chimique, en trois catégories (organiques, inorganiques et eutectiques) (figure 1.16). Un grand nombre de matières chimiques organiques et inorganiques peut être identifié comme MCP en termes de température et chaleur latente de changement de phase. En revanche, le point de transition de phase dans une plage de fonctionnement pour la majorité d'entre eux, ne permet pas de satisfaire aux critères requis pour un support de stockage adéquat. Afin de pallier ces inconvénients, des solutions seront proposées après avoir passé en revue les différentes familles de matériaux à changements de phase.

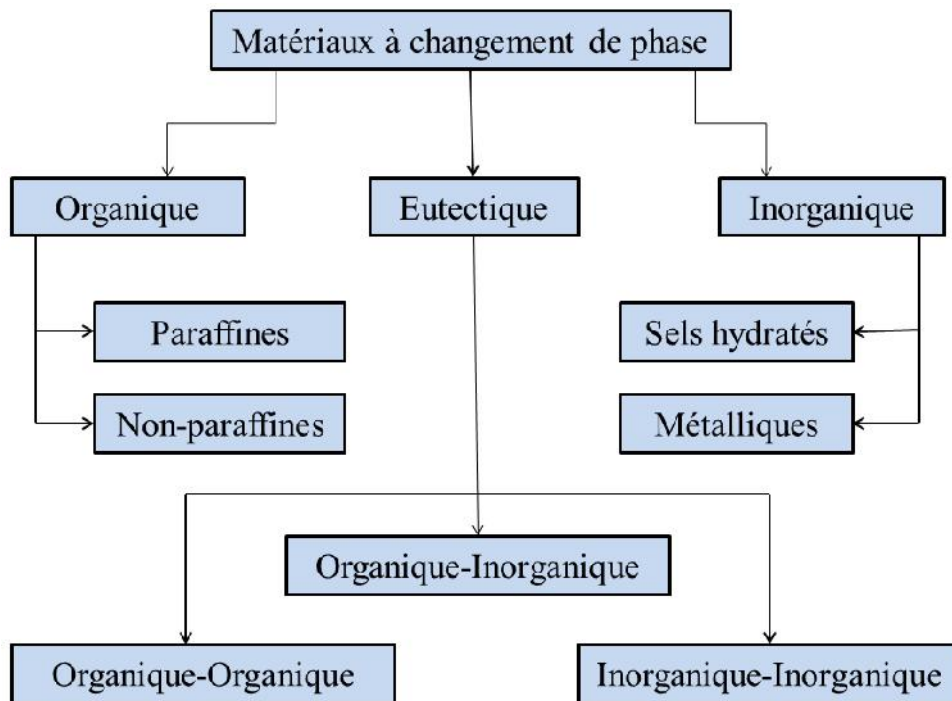


Figure 1.16 : Classification des matériaux à changement de phase

Étant donné que les deux critères les plus importants, la température de fusion et l'enthalpie de fusion, dépendent d'effets moléculaires, il n'est pas étonnant que les matériaux d'une classe de matériaux se comportent de manière similaire. La figure 1.17 montre la plage typique d'enthalpie de fusion et de température de fusion de classes de matériaux courantes utilisées comme MCP.

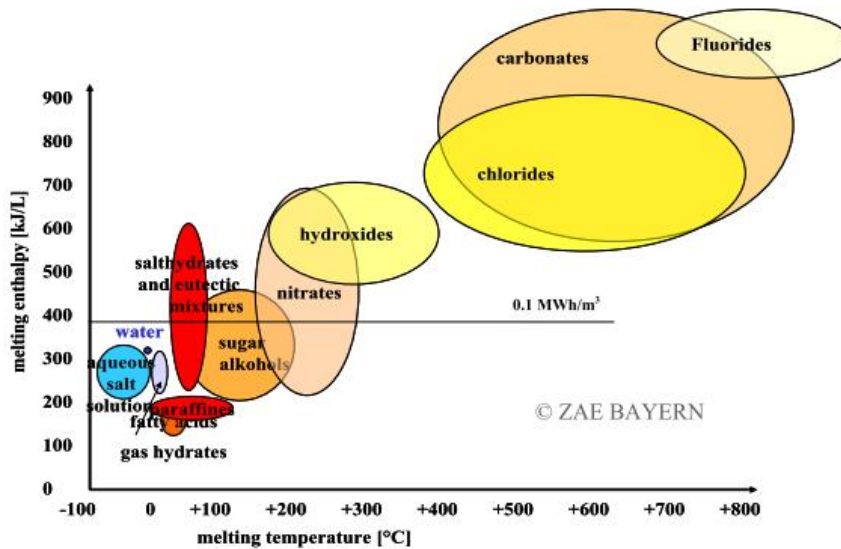


Figure 1.17: Classes de matériaux à changement de phase MCPs et leurs plages typiques de température de fusion et d'enthalpie de fusion [15].

1.8. Avantages et inconvénients des MCPs

Les principaux avantages et inconvénients des MCPs sont résumés dans le tableau 1.2.

Tableau 1.2 : Avantages et inconvénients des différentes catégories de MCP [17]

Avantages		
Organique	Eutectique	Inorganique
<ul style="list-style-type: none"> - Disponibles dans une large gamme de température - Pas de ségrégation - Chimiquement stables - Haute énergie de fusion - Non corrosifs - Recyclables 	<ul style="list-style-type: none"> - Chaleur latente élevée - Disponibles en grande quantité - Faible coût - Point de fusion net - Inflammables - Forte conductivité thermique - Chaleur spécifique massique élevée 	<ul style="list-style-type: none"> - Point de fusion net similaire à une substance pure - Chaleur latente légèrement supérieure à celle des composés organiques
Inconvénients		
Organique	Eutectique	Inorganique
<ul style="list-style-type: none"> - Faible conductivité thermique - Chaleur latente faible - Non inflammables - Chaleur spécifique massique faible - Fort coût - Masse faible 	<ul style="list-style-type: none"> - Phénomène de surfusion - Agent de nucléation étranger indispensable - Corrosifs - Vieillessement rapide 	<ul style="list-style-type: none"> - Peu de données disponibles sur les propriétés de ces matériaux - Peu utilisés au niveau des applications industrielles

1.9. Critères de choix d'un matériau à changement de phase

Les principaux critères pour le choix d'un MCP sont regroupés selon les propriétés suivantes :

1.9.1. Propriétés thermiques

- La température de fusion/solidification des MCPs doit être adéquate au domaine d'application (ex application dans le domaine des bâtiments : T_f doit être dans la plage de température de confort thermique).
- Une chaleur latente de transition élevée.
- Une bonne propriété de transfert de chaleur. Par exemple, une conductivité thermique élevée améliorerait le processus de stockage – déstockage de l'énergie thermique.

1.9.2. Propriétés physiques

- Une densité importante du corps permettra un volume de stockage très faible et donc un réservoir de stockage petit. Durant le processus du changement de phase, il faudra étudier la variation de la densité (exemple : les MCPs aqueux).
- Pour diminuer les contraintes mécaniques dans le matériau stockeur, la tension en vapeur doit être faible et l'expansion volumique petite.
- Un équilibre de la phase adéquate pour le stockage et le déstockage de la chaleur.

1.9.3. Propriétés cinétiques

- La surfusion doit être diminuée, nécessité d'utiliser des matériaux additifs.
- Un taux de cristallisation important.

1.9.4. Propriétés chimiques

- Une stabilité chimique à long terme des cycles de fusion/solidification.
- La compatibilité avec les matériaux de construction.
- L'étude de la dangerosité du produit (toxicité, inflammabilité, explosion,...) passant par les réglementations et normalisations en vigueur. La dangerosité du produit doit être minimisée.

- Recyclable.

1.9.5. Aspects économiques

Le coût est un critère également très important. Celui-ci sera différent selon les utilisations. Par exemple, les utilisations domestiques demandent quelques kilogrammes alors que les utilisations industrielles quelques tonnes.

1.9.6. Exigences physiques, techniques et économiques

Une température de changement de phase appropriée et une grande enthalpie de fusion sont deux exigences évidentes pour un matériau à changement de phase. Ils doivent être remplis pour pouvoir stocker et libérer de la chaleur. Cependant, il existe davantage d'exigences pour la plupart des applications, mais pas pour toutes. Ces exigences peuvent être regroupées en exigences physiques, techniques et économiques.

Conditions physiques requises pour le stockage et le dégagement de chaleur:

- La température de changement de phase appropriée pour assurer le stockage et la libération de chaleur dans une application à des températures données pour la source de chaleur et le dissipateur de chaleur.
- Enthalpie de changement de phase important pour atteindre une densité de stockage élevée par rapport au stockage de chaleur sensible.
- Changement de phase reproductible, également appelé stabilité du cyclisme \Rightarrow utiliser le vieillissement du matériau autant de fois pour le stockage et le dégagement de chaleur requis par une application.
- Le nombre de cycles varie d'un seul, lorsque le PCM est utilisé pour le chauffage protection en cas d'incendie, à plusieurs milliers de cycles lorsqu'il est utilisé pour chauffage ou refroidissement de bâtiments. L'un des principaux problèmes de stabilité du cyclisme est la séparation de phase. Lorsqu'un PCM est composé de plusieurs composants, des phases avec des compositions différentes peuvent se former lors du cycle. La séparation de phase est l'effet par lequel les phases de composition différente sont séparées les unes des autres de manière

macroscopique. Les phases de composition différente de la composition initiale correcte optimisée pour le stockage de la chaleur montrent alors une capacité nettement inférieure à stocker de la chaleur.

- Peu de sous-refroidissement pour assurer que la fusion et la solidification puissent se dérouler dans une plage de température étroite.
- Le sous-refroidissement (également appelé surfusion) est l'effet qu'une température bien inférieure à la température de fusion doit être atteinte, jusqu'à ce qu'un matériau commence à se solidifier et libère de la chaleur (figure 1.18). Si cette température n'est pas atteinte, le PCM ne se solidifiera pas du tout et ne stockera donc que de la chaleur sensible.

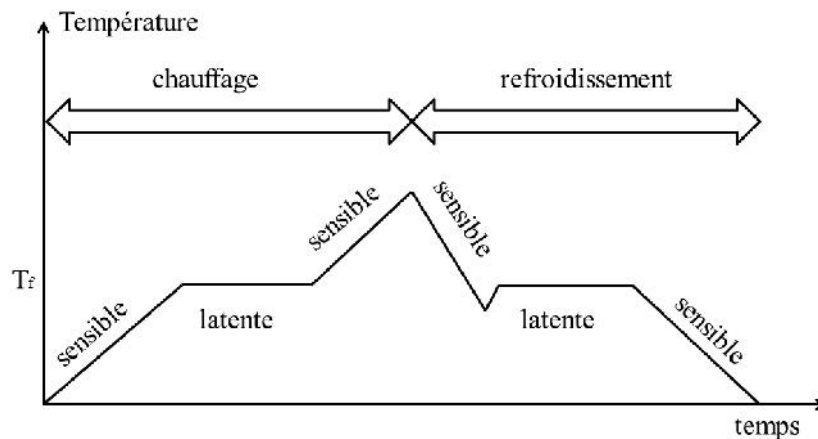


Figure 1.18 : Variation schématique de la température lors du chauffage (fusion) et du refroidissement (solidification) d'un PCM avec sous-refroidissement.

1.10. Conclusion

En conclusion, la conception de l'enveloppe du bâtiment doit prendre en considération l'échange thermique dans le corps du bâtiment, les conditions climatiques de l'environnement et le mode de vie des occupants. Ensuite, on a pu introduire les différents modes de transfert thermique et l'inertie thermique, qui sont les facteurs essentiels pour évaluer le comportement thermique d'un bâtiment. Bien que l'utilisation de la technique de chauffage et de climatisation passive puisse être une solution adéquate pour réduire la consommation énergétique, ainsi que pour retenir le confort thermique. Cela nécessite d'intégrer les matériaux à changement de phase de l'enveloppe du bâtiment, où le processus de solidification-fusion des

MCPs aide l'enveloppe du bâtiment à contrôler sa température par l'exploitation efficace de l'énergie solaire.

Références

1. APRUE. (2015) "Isolation thermique des bâtiments." <http://www.aprue.org.dz/>
2. APRUE. (2015) "Programme de développement de l'efficacité énergétique à l'horizon 2030." <http://www.aprue.org.dz/>
3. Nicolas Morel et Edgard Gnansounou, Energétique du bâtiment, Nouvelle édition du cours, Section de Génie Civil, 4^{ème}/5^{ème} année, Faculté d'environnement naturel, architectural et construit, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Septembre 2008
4. Viola Polesello & Katie Johnson, ICCG, Energy-efficient buildings for low-carbon cities, Energy-efficient buildings for low-carbon cities ICCG Reflection Paper 47/ March 2016.
5. Mathieu Barbason, La simulation thermo-aérodynamique du bâtiment, Validation et développement d'une approche couplée CFD-Multizone pour l'étude de la modélisation du phénomène de surchauffe estivale en Belgique, Dissertation présentée en vue de l'obtention du titre de Docteur en Sciences de l'Ingénieur, Faculté des Sciences Appliquées, université de Liège, Année Académique 2014-2015
6. W. M. Rohsenow, J. R. Hartnett, Y. I. Cho, Handbook of heat transfer, 3rd edition, MCGRAW-HILL (1998) 4-1 to 4-80.
7. G.D. Raithby, K.G.T. Hollands, Natural Convection in The Handbook of Heat Transfer, 3rd Edition, W.M. Rohsenow, J.P. Hartnett, and Y.I. Cho eds., McGraw-Hill, New York, (1998).
8. D.T.R. C 3-2, Réglementation thermique des bâtiments, Règles de calcul des déperditions calorifiques, Fascicule 1, Document Technique Réglementaire.
9. Boulfani, W., les ambiances thermiques d'été dans l'habitat de la période coloniale à Patio, Mémoire de Magister, Université de Biskra, Algérie, (2010)
10. D.H.C. Chow, Materials for energy efficiency and thermal comfort in buildings, Woodhead Publishing Series in Energy, 2010, Pages 562-588.
11. N.B. Geetha, R. Velraj, Passive cooling methods for energy efficient buildings with and without thermal energy storage – A review, Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research 2012 Volume (issues) 29(2): 913-946.
12. V. Stauffer, D. Hooper, Passive Solar Architecture In Ladakh, Training document, lib.icimod.org/record/10558/files/1156.pdf

13. Williams » Sustainability » Green Building Basics » Passive Solar Design. <https://sustainability.williams.edu/green-building-basics/passive-solar-design>
14. J.P.A Lopez, Méthodologie de conception des matériaux architecturés pour le stockage latent dans le domaine du bâtiment, thèse de doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2013.
15. Mehling, Harald, Cabeza, F. Luisa, Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications, Heat and Mass Transfer, 2008, ISSN: 1860-4846, ISBN 978-3-540-68557-9.
16. M. Martinelli, Stockage d'énergie thermique par changement de phase – Application aux réseaux de chaleur, thèse de doctorat, Université Grenoble alpes, 2006.
17. S. Guichard, Contribution à l'Etude des Parois Complexes intégrant des Matériaux 'a Changement de Phase: Modélisation, Expérimentation et Evaluation de la performance énergétique globale, thèse de doctorat, Université de La Réunion, 2013.

Performances thermiques d'une paroi composite opaque

Performances thermiques d'une paroi composite opaque

Ce chapitre est consacré à l'étude des échanges thermiques entre l'extérieur et l'intérieur, et aux charges thermiques agissantes sur l'enveloppe du bâtiment. On s'intéresse à des modèles qui utilisent les différentes conditions climatiques. Il est certainement recommandé d'utiliser des données d'entrée telles que les propriétés thermo-physiques des matériaux et les conditions aux limites environnementales. L'évolution des températures sur les interfaces interne et externe d'une paroi opaque soumise aux différentes sollicitations montre un intérêt capital pour les spécialistes du domaine. En effet, ces températures permettent d'identifier le niveau d'inertie thermique en fonction des différents matériaux et aussi de déterminer les performances thermiques d'une paroi d'enveloppe composite opaque en termes de consommation énergétique.

2.1. Introduction

Dans un climat chaud et sec, la conception et la construction des bâtiments impliquent l'adoption d'une combinaison entre la conception de l'enveloppe du bâtiment et les matériaux de construction. Une adaptation inadéquate de la conception du bâtiment et de son environnement intérieur peut augmenter le besoin énergétique dû au système de chauffage et de climatisation. Cette partie a pour objectif d'améliorer les performances thermiques de l'enveloppe du bâtiment afin de réduire la consommation énergétique due aux systèmes de chauffage et climatisation pendant le cycle (hiver-été).

D'ailleurs, le secteur du bâtiment représente de 30 à 40 % de la consommation énergétique due à la croissance de la population et d'urbanisation. L'amélioration de l'efficacité énergétique actuelle en matière de technologie permet la construction des nouveaux bâtiments. D'autre part, la réhabilitation des bâtiments anciens a favorisé des économies d'énergie importantes, au fur à mesure le rendement des bâtiments à très basse consommation et à consommation d'énergie réduite permet de réduire la consommation énergétique totale de 50 à 90% [1].

L'amélioration du niveau d'isolation thermique et l'intégration des nouveaux matériaux de construction conduit à :

- Réduire la consommation d'énergie due aux systèmes de chauffage et de climatisation.
- Amélioration des performances thermiques de l'enveloppe
- Fournir des températures dans la plage qu'assure le confort thermique à l'intérieur du bâtiment
- Assurer une ambiance intérieure confortable pour les occupants

Le comportement thermique de nos bâtiments du point de vue énergétique et la fonction entre la consommation d'énergie et le confort thermique peuvent décrire l'équilibre thermique en se basant sur des bilans énergétiques. La fonction du bâtiment face aux changements climatiques de l'environnement extérieur (hiver-été) exige les constructeurs à améliorer les caractéristiques thermiques de l'enveloppe. En outre, l'importance du choix des matériaux de construction peut contribuer de manière significative pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. Au fur à mesure les nouvelles technologies utilisées dans le secteur des bâtiments permettent de construire des bâtiments modernes à base consommation énergétique, elles permettent aussi des rénover les anciens bâtiments.

Un fort besoin énergétique s'est observé notamment durant la période estivale où la consommation de l'électricité augmente. Évidemment, il est indispensable de protéger les ressources énergétiques par l'exploration des énergies renouvelables (soleil, vent, géothermique, biogaz, etc.). En effet, toutes les émissions de carbone dues à la consommation énergétique des bâtiments sont contribuant au réchauffement de la terre.

2.2. Etat de l'art

L'enveloppe du bâtiment est un facteur essentiel car elle protège les occupants et joue un rôle important dans la réduction de la consommation d'énergie et maintenir la température de l'ambiance intérieure dans la zone du confort thermique pendant la journée. La géométrie et les propriétés thermo-physiques des matériaux

utilisés dans la conception et la construction de murs extérieurs identifient ces comportements thermiques. Les performances thermiques de l'enveloppe du bâtiment réduisent le transfert de chaleur à travers les murs en assurant une isolation thermique fiable. La performance thermique de l'enveloppe du bâtiment peut contribuer de manière significative à la réduction de l'énergie nécessaire. Donc, il est important d'isoler l'enveloppe du bâtiment [2]. La détermination de la température des murs constituant l'enveloppe du bâtiment peut être considérée comme un élément essentiel d'une conception efficace du bâtiment. La performance thermique d'un mur opaque dépend de la manière dont ses matériaux lui transfèrent le flux de chaleur et des conditions météorologiques [3]. Les enveloppes de bâtiment proposent un élément essentiel entre les espaces de bâtiment occupés et les conditions météorologiques. L'isolation thermique des murs est souvent conçue pour une performance statique basée sur sa résistance thermique [4]. A cet effet, les efforts ont été souvent consacrés au développement de modèles numériques qui aident à prédire les évolutions de la température et d'humidité dans la conception des enveloppes (les murs, les toits et les sous-sols). La variation du comportement hygrothermique de bâtiments traditionnels et modernes en appliquant des modèles numériques est devenue actuellement un axe de recherche majeure [5].

Des recherches importantes ont été basées sur le transfert thermique à travers l'enveloppe du bâtiment, en particulier l'échange thermique à travers les parois extérieures. Cependant l'importance du matériel de construction utilisé dans les parois extérieures de l'enveloppe et la géométrie des briques utilisées. La minimisation des pertes thermique à travers l'enveloppe du bâtiment devient la solution majeure pour réduire la consommation énergétique des bâtiments. Karlsson et al. [6] ont montré que l'énergie utilisée pour maintenir des températures intérieures confortables dépend de la capacité de stockage thermique des murs en contact avec l'air à intérieur. Ensuite, ils ont étudié les effets de l'augmentation de la capacité de stockage thermique des matériaux de construction. L'inertie thermique des bâtiments peut aider à réduire cette consommation, améliorer le confort et

même remplacer les systèmes HVAC (chauffage, ventilation et climatisation). Cette inertie thermique est généralement associée à la construction de murs lourds, mais en réalité, il existe d'autres paramètres qui peuvent affecter de manière significative cette propriété [7]. De nombreux chercheurs se sont intéressés aux transferts de chaleur dans les murs multicouches. Tamene et al. [8] ont étudié numériquement le transfert thermique à travers un mur multicouche extérieur d'une maison soumise à des conditions climatiques réelles. De plus, Ibrahim et al. [9] ont examiné le comportement thermique des structures de murs extérieurs multicouches des bâtiments. Le but de cette étude est de trouver la meilleure structure de mur et le nombre et la position des couches d'isolation dans les murs extérieurs dans le cas de présence ou absence de chauffage pour certains matériaux de construction couramment utilisés. Généralement, l'inertie thermique est un caractère utilisé pour modéliser les transferts de chaleur et il s'agit d'une propriété du matériau liée à la masse, à la conductivité thermique et à la capacité de chaleur volumétrique. L'inertie thermique est responsable de la réduction des pics de température de l'air à l'intérieur et du délai entre l'accumulation d'énergie et son rejet. Cela dépend également de deux facteurs, à savoir le déphasage (ϕ) et le facteur de décrémentation (f), qui sont influencés les propriétés thermo-physiques du matériau, l'épaisseur et la position de la paroi [9-10]. Kontoleon et al. [11] ont analysé en détail l'impact des variations de la densité et de la conductivité du béton sur le facteur de décrémentation (f) et le déphasage (ϕ) sur six murs isolés. Mavromatidis et al. [12] ont développé un modèle numérique d'un mur multicouche, et ils ont utilisé le facteur de décrémentation et déphasage pour un mur de bâtiment, y compris différentes configurations d'isolant thermique multicouche. Autrement, les structures des parois constituées par des cavités partitionnées offrent une solution fondamentale pour réduire le transfert de chaleur à travers l'enveloppe par une isolation optimale et une bonne capacité thermique qui améliore l'inertie thermique du bâtiment [13].

L'utilisation de blocs de briques creuses en cavités d'air constituant l'une des meilleures solutions pour réduire la consommation énergétique du bâtiment. Les

conceptions de ces éléments consistent à offrir une grande inertie thermique et amortir les fluctuations intérieures de la température de l'air [14]. L'estimation de la température des éléments de l'enveloppe du bâtiment peut être considérée comme une mesure importante d'une conception de bâtiment efficace. Les performances thermiques des éléments qui constituent l'enveloppe dépendent de la propagation du flux de chaleur à travers leurs matériaux de construction et des conditions climatiques [15]. Plusieurs recherches ont porté sur l'étude numérique et expérimentale du transfert de chaleur dans les briques creuses, en tenant compte des effets du nombre de cloisons, des géométries et des conditions climatiques aux limites. Ces études visaient principalement à coupler le transfert de chaleur dans des cavités verticales bidimensionnelles à filtre d'air imposant des températures différentes sur deux surfaces verticales tandis que les surfaces horizontales de la brique creuse sont adiabatiques [16-17]. Al-Hazmy [18] a étudié le transfert de chaleur à travers des briques creuses avec des cavités d'air en couplant les modes de transfert thermique de conduction et de convection. Il a examiné trois configurations différentes pour les briques creuses. Il a été mentionné que, lorsqu'on utilise l'isolation en polystyrène à l'intérieur des cavités remplies d'air, il est possible de réduire le rendement thermique par les briques creuses par un taux de 36%. Sun et al [19] ont analysé numériquement les performances de transfert de chaleur d'une brique creuse tridimensionnelle présentant 71 configurations différentes. Ils ont utilisé la méthode des volumes finis, et ils ont discuté l'effet des configurations d'enceintes. Leurs résultats ont conclu que la conductivité thermique équivalente diminue avec l'augmentation du nombre des cavités dans la direction parallèle et verticale du transfert de chaleur. Il s'ensuit que Zukowski et al [20] ont recommandé l'utilisation des briques creuses remplies de perlite sans aucune couche isolante supplémentaire. Une méthode semi-analytique a été proposée par Arendt et al [21] pour permettre le calcul des paramètres thermiques des briques creuses. Ils ont étudié l'influence de la concentration dans la cavité d'air, le comportement thermique et dynamique pour réduire l'intensité des échanges thermiques dans les

cavités. Gracia et al [22] ont étudié expérimentalement et théoriquement l'évolution du comportement thermique du système de construction en briques alvéolaires. Ils ont calculé sa valeur U et ont comparé avec des systèmes de construction isolés. Ils ont conclu que le système de construction en briques alvéolaires constituait une bonne solution pour une inertie thermique plus élevée. Jan Ko í et al. [23] ont proposé trois blocs de céramique contemporains à géométrie interne complexe. Ils ont déterminé numériquement la performance thermique en utilisant la modélisation numérique de transfert de chaleur et en se basant sur des études comparatives avec des données issues de deux approches expérimentales. Ait-Taleb et al. [24] ont étudié numériquement une brique creuse qui comporte cinq cavités rectangulaires et uniformes sur la base d'un modèle détaillé de transfert de chaleur. Ils ont conclu que le transfert de chaleur à travers les cavités est très faible. En outre, ils ont constaté que l'étude des blocs creux réduisait le transfert de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. Jan Ko í et al [25] ont déterminé la conductivité thermique équivalente de blocs de briques creuses avec un système complexe de cavités internes remplies. Ils ont utilisé la méthode des éléments finis pour résoudre la conduction thermique en régime permanent 2-D non linéaire. Leur approche est beaucoup plus rapide pour identifier la conductivité thermique équivalente comparativement aux méthodes expérimentales. Sun et Fang [26] ont prouvé que l'augmentation du nombre de cavités dans la direction horizontale représente une meilleure solution pour réduire la conductivité thermique équivalente.

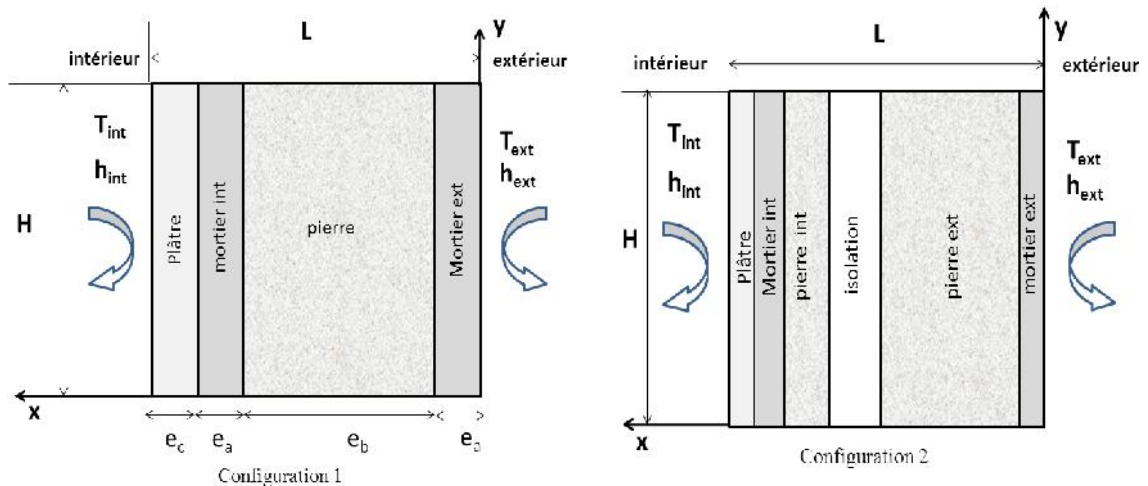
2.3. Températures et paramètres d'inertie thermique & Cas d'un mur en pierre

Les outils de simulation numériques sont largement utilisés dans le domaine de thermique du bâtiment. Ces outils sont exploités pour prédire les comportements thermiques et la qualité d'air à l'intérieur des bâtiments. Les modèles mathématiques sont des approches basées sur des hypothèses. La contribution de simulation numérique est de faire des études pendant une courte durée. Dans cette section, l'étude a été effectuée en utilisant le code de calcul CFD (Computational Fluid Dynamics). Ce code a été utilisé aussi pour simuler la température en 2D en régime

instationnaire d'un mur multicouche. Nous avons proposé quatre configurations possibles. L'objectif principal est d'identifier l'inertie thermique d'un mur de bâtiment sous un climat chaud et sec.

2.3.1. Modèle mathématique

Un modèle mathématique pour un mur sud multicouche d'un bâtiment soumis à des conditions extérieures correspondant au climat de Ghardaïa est proposé dans cette étude. Ce modèle ne concerne que les échanges thermiques. La paroi est constituée de deux couches de ciment mortier, une couche en pierre et une couche de plâtre. Les conditions climatiques sont variables, les valeurs des coefficients de transfert convectif intérieur et extérieur retenus s'élèvent à 9 et 17 W/m² °C respectivement. Les hypothèses imposées n'ayant pas une influence sur la création et l'utilisation de ce modèle. On suppose que les transferts thermiques à travers les parois sont supposés unidirectionnels et perpendiculaire à ces parois. La distribution de la température sur les surfaces extérieure et intérieure de la paroi est supposée uniforme (principe de la méthode nodale). On suppose aussi que les propriétés thermo-physiques de ce mur sont constantes. Les matériaux considérés sont généralement des matériaux locaux, leurs propriétés thermo-physiques sont présentées dans le tableau 2.1. Pour ce faire, considérons un mur multicouche d'épaisseur L sans source interne et en équilibre thermique à l'instant initial à la température T₀. Ce mur soumis à des conditions aux limites de Dirichlet (T(0,t) et T(L,t)) est schématisé par la figure 2.1.



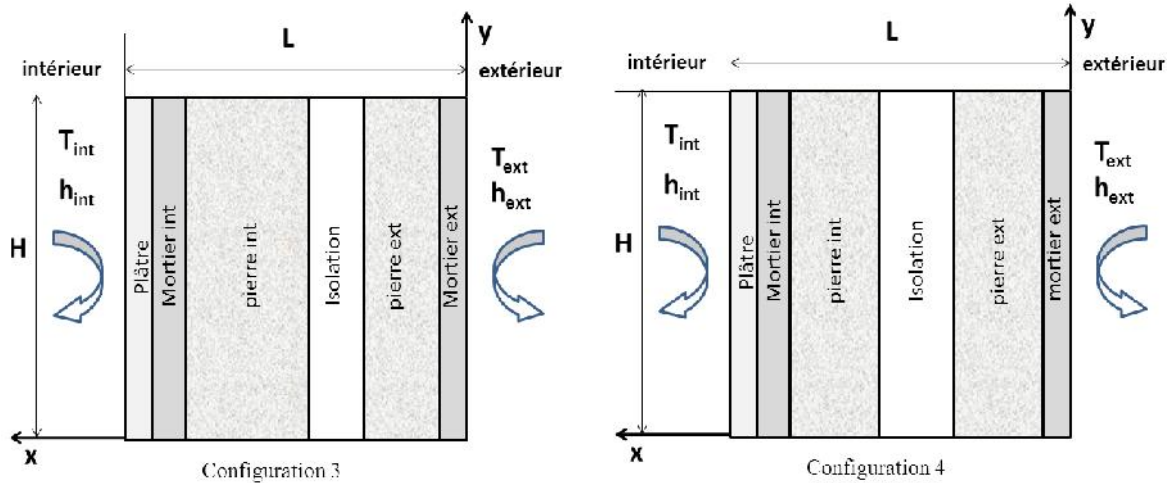


Figure 2.1 : Configurations de la paroi multicouches étudiées avec des conditions aux limites.

Tableau 2.1: Propriétés thermo-physiques des matériaux utilisés.

	[W/m.K]	[kg/m ³]	Cp [J/kg.K]
Mortier	1.15	1900	864
Pierre	2.8	2600	702
Plâtre	0.4	1440	840
Isolant thermique	0.0234	1.17	1006

Compte tenu de ces hypothèses, les équations de bilan thermique s'écrivent :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (2.1)$$

Conditions aux limites:

$$-\lambda_a \frac{\partial T}{\partial x^2} = h_e (T_f - T_{pe}), \quad x = 0 \quad (2.2)$$

$$-\lambda_c \frac{\partial T}{\partial x^2} = h_{int} (T_{pi} - T_f), \quad x = L \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad y = H \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad y = 0 \quad (2.5)$$

Conditions initiales :

$$T_p = T_0 \text{ à } t = 0, \quad 0 \leq x \leq L \quad (2.6)$$

$$T_{\text{ext}}(t) = T_1 + \Delta T_1 \sin(\omega t) \quad (2.7)$$

$$T_{\text{int}}(t) = T_2 + \Delta T_2 \sin(\omega t) \quad (2.8)$$

Où

$$\omega = \frac{2\pi}{\tau}, \tau = 86400 \text{ s}, T_1 = 38.5 \text{ }^\circ\text{C}, T_2 = 38 \text{ }^\circ\text{C}, \Delta T_1 = 8 \text{ }^\circ\text{C}, \Delta T_2 = 2 \text{ }^\circ\text{C} \quad (2.8)$$

: masse volumique [kgm^{-3}].

c : chaleur spécifique [kJ/kg K].

T : Température [$^\circ\text{K}$].

t : Temps [s].

x : axe x [m].

y : axe y [m].

a : conductivité thermique de l'air [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$].

h_e : coefficient d'échange thermique extérieur [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$].

h_{int} : coefficient d'échange thermique intérieur [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$].

T_f : température de fluide [$^\circ\text{K}$].

T_{pe} : température de la paroi extérieure [$^\circ\text{K}$].

T_{pi} : température de la paroi intérieure [$^\circ\text{K}$].

T_p : température de la paroi [$^\circ\text{K}$].

L: épaisseur de la paroi [m].

H: hauteur de la paroi [m].

: l'impulsion

: la période [s].

T_{ext} : température de l'air extérieur [$^\circ\text{K}$].

T_{int} : température de l'air intérieur [$^\circ\text{K}$].

2.3.2. Résultats et discussions

Les résultats illustrés de la figure 2.2 sont obtenus sous des conditions environnementales variables. Certaines courbes présentent la variation des températures sur les surfaces verticales extérieure et intérieure. Cependant, on utilise avec les conditions aux limites déjà énoncées des fonctions sinusoïdales qui montrent des fluctuations périodiques allant du maximum au minimum des températures moyennes journalières. Cette approche nous a permis de simuler ce phénomène en utilisant un code de calcul CFD. On suppose que les propriétés thermo-physiques de la paroi sont constantes. Les fluctuations des températures sont en fonction de l'épaisseur de la paroi, sa conductivité thermique, la chaleur spécifique, et sa masse volumique. Cependant, le transfert de chaleur de l'extérieur vers l'ambiance intérieure à travers les différentes couches se produit par conduction. Les deux paramètres importants dans cet élément sont le déphasage et le facteur de décrémentation ou (facteur de réduction thermique), l'inertie thermique contribue à stocker l'énergie sous forme de chaleur sensible pendant la journée pour la resituer ensuite la nuit.

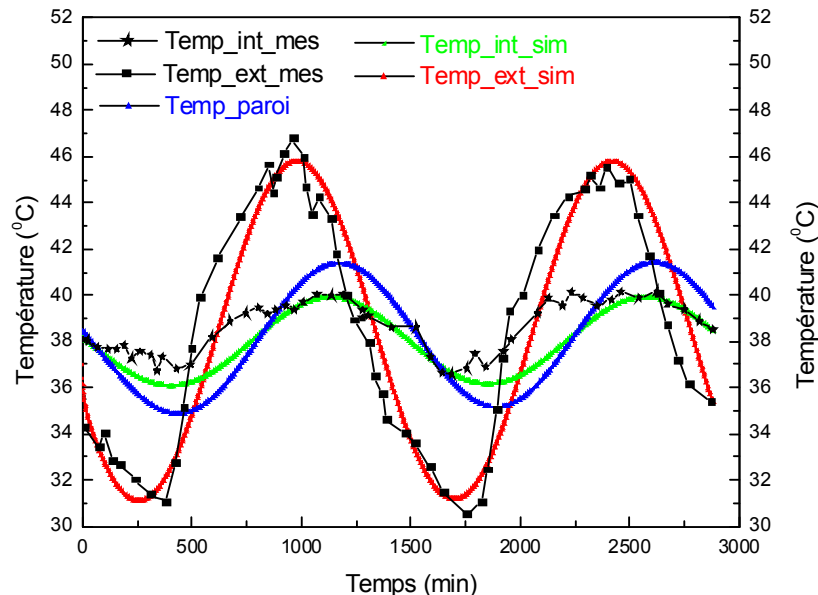


Figure 2.2 : Confrontation des températures d'une paroi sous un régime transitoire

La figure 2.2 donne les résultats obtenus pour deux jours de la période étudiée en considérant le climat de la ville de Ghardaïa le (20-21 Juillet 2008). En analysant la

variation de la température en fonction du temps, on remarque que cette dernière varie conformément à une forme qui se rapproche à la forme périodique. Pour la journée du 20 Juillet, la température minimale calculée de la surface extérieure de la paroi est de 31.10 °C, sa valeur minimale mesurée est de 31.07 °C. Les valeurs maximales calculée et mesurée sont respectivement 45.70 °C et 46.79 °C. Par ailleurs, la température superficielle intérieure de la paroi, notamment sa valeur minimale est calculée à 36.08 °C tandis que sa valeur minimale mesurée est de 36.90 °C. La valeur maximale calculée s'est fixée à 39.90 °C, la valeur maximale mesurée est de 40.10°C. L'ensemble des données mesurées s'est révélé en bon accord avec les données simulées, on peut constater une satisfaisante cohérence entre les résultats obtenus par les deux méthodes. Les résultats obtenus permettent de conclure que les modèles mathématiques dans ce cas sont assez bons pour prédire le comportement thermique effectif du bâtiment, plus particulièrement les parois de l'enveloppe, dans des conditions météorologiques réelles.

Les figures énumérées ci-dessus (2.3-2.7) représentent la variation des températures des différentes couches pour les quatre configurations. On remarque que les amplitudes des températures ont tendance de diminuer de l'extérieur vers l'intérieur de manière périodique. Ainsi, un déphasage horaire s'effectue entre les températures maximales de chaque couche. Cependant, ces différences de température sont dues aux propriétés thermo-physiques de chaque matériau. Il est clair que l'effet de l'inertie thermique peut réduire la propagation de flux de chaleur reçu de la couche extérieure. Alors, d'après l'analyse de ces résultats, on peut dire qu'il y a une nette influence de l'inertie thermique sur la propagation de la chaleur dans les différentes configurations.

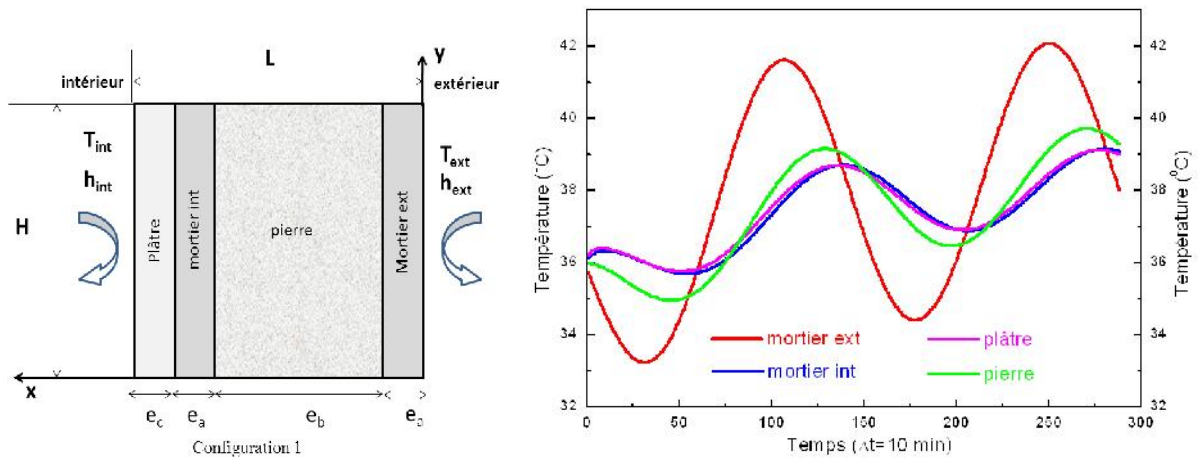


Figure 2.3 : Température des différentes couches : configurator (1)

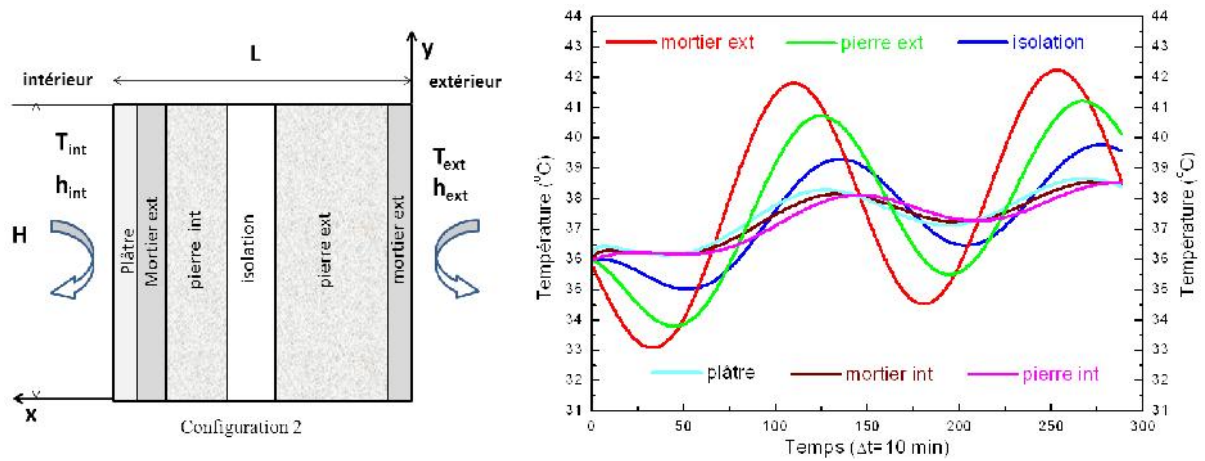


Figure 2.4 : Température des différentes couches : configuration (2)

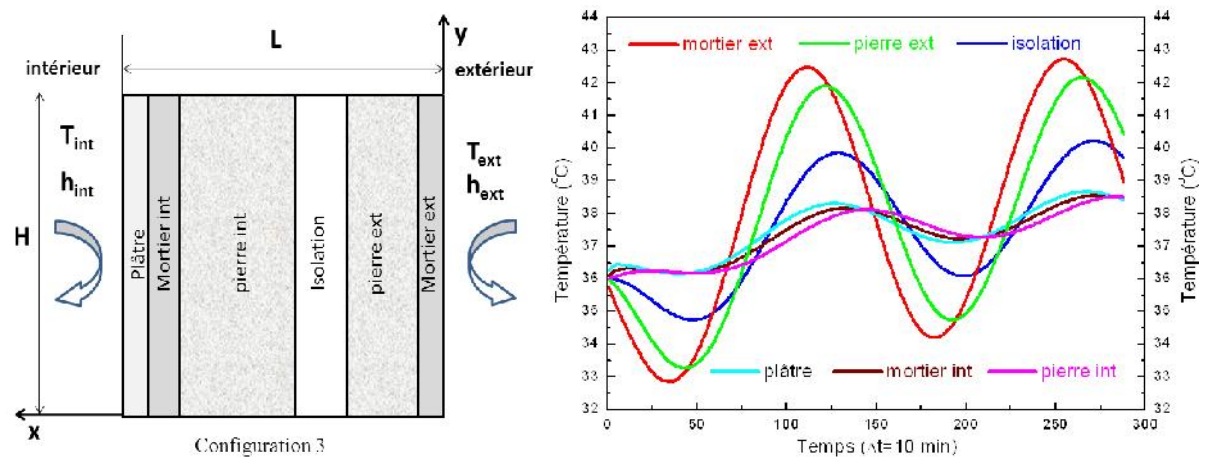


Figure 2.5 : Température des différentes couches : configurator (3)

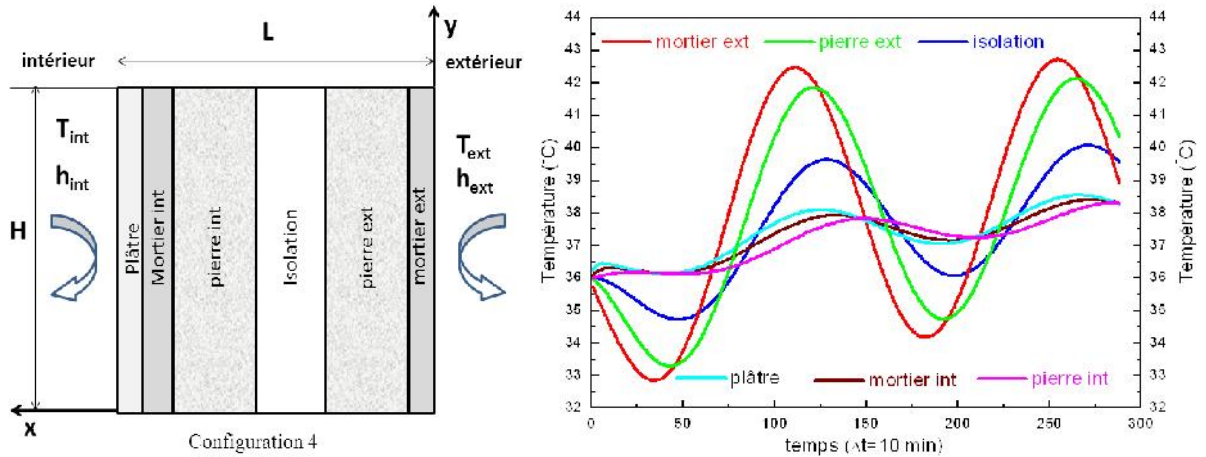


Figure 2.6 : Température des différentes couches : configurator (4)

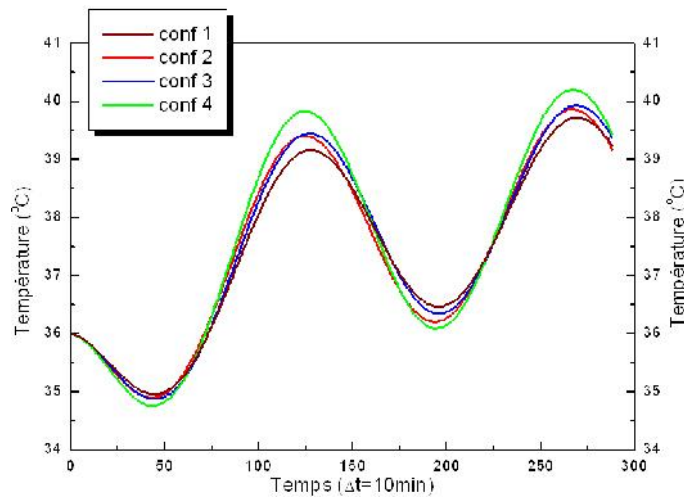


Figure 2.7: Variation de la température moyenne des différentes configurations

L'inertie thermique dépend de l'effusivité thermique des matériaux, elle caractérise principalement la vitesse de circulation d'un apport de chaleur. Elle est définie aussi par son aptitude à retenir la chaleur en la restituant de manière lente et homogène. Ce phénomène appelé "déphasage" est utilisé dans le bâtiment pour retarder et amortir les variations de température. Ce dernier est caractérisé aussi par la capacité à accumuler la chaleur ou ce qu'on appelle la capacité calorifique du matériau.

Le déphasage thermique (τ) est donc le temps qu'il faut à la chaleur pour pénétrer à l'intérieur de l'habitat. Ce déphasage est notamment utile en été pour empêcher la pénétration de l'énergie du rayonnement solaire le jour et la rejeter la

Le déphasage (ϕ) et le facteur de décrémentation (f), définis par Asan et Sancaktar [27] sont données par les équations suivantes:

$$\phi_{\min} = t_{T_{\text{int},\min}} - t_{T_{\text{ext},\min}} \quad (2.9)$$

$$\phi_{\max} = t_{T_{\text{int},\max}} - t_{T_{\text{ext},\max}} \quad (2.10)$$

$$f = \frac{T_{\text{int},\max} - T_{\text{int},\min}}{T_{\text{ext},\max} - T_{\text{ext},\min}} \quad (2.11)$$

$t_{T_{\text{ext},\min}}$, $t_{T_{\text{int},\min}}$, $t_{T_{\text{ext},\max}}$, et $t_{T_{\text{int},\max}}$ sont les moments où les températures des surfaces intérieure et extérieure atteignent les valeurs minimales et maximales.

$T_{\text{ext},\min}$, $T_{\text{int},\min}$, $T_{\text{ext},\max}$, et $T_{\text{int},\max}$ sont respectivement les températures minimales et maximales des surfaces intérieures et extérieures.

La figure 2.2 montre que pour la configuration 1, t_{\min} est autour de 2h 48mn, avec un t_{\max} autour de 2h 56mn. Le facteur de décrémentation résultant de la simulation numérique f est de 0.2301. En analysant la variation temporaire des températures, on remarque qu'un mur épais en pierre lourd n'isole pas dans ces conditions, mais, il freine et ensuite ralentit l'entrée de la chaleur par son inertie. Ces murs épais possèdent un fort déphasage permettant de faire entrer la fraîcheur à la nuit dans le mur puis la restituer dans la journée. Pour ce faire, la pierre peut devenir parfois un matériau apte et conductible pour favoriser le stockage à condition qu'il existe des nuits suffisamment fraîches. Effectivement, cet aspect est très courant dans les régions arides et chaudes: en été, les températures ambiantes extérieures restent presque tout le temps élevées même durant la nuit. L'inertie thermique consiste alors à une accumulation que de la chaleur dans l'enveloppe pour une restitution intérieure par radiation. Le flux de chaleur à travers l'enveloppe provoque une élévation successive de la température des matériaux ce qui permet d'augmenter en même temps la température de l'air ambiant de l'habitat.

En intégrant une couche isolante, le décalage temporel ϕ et le facteur de décrémentation f calculés pour les différentes configurations seront décrits selon les figures 2.8-2.10 ci-dessous.

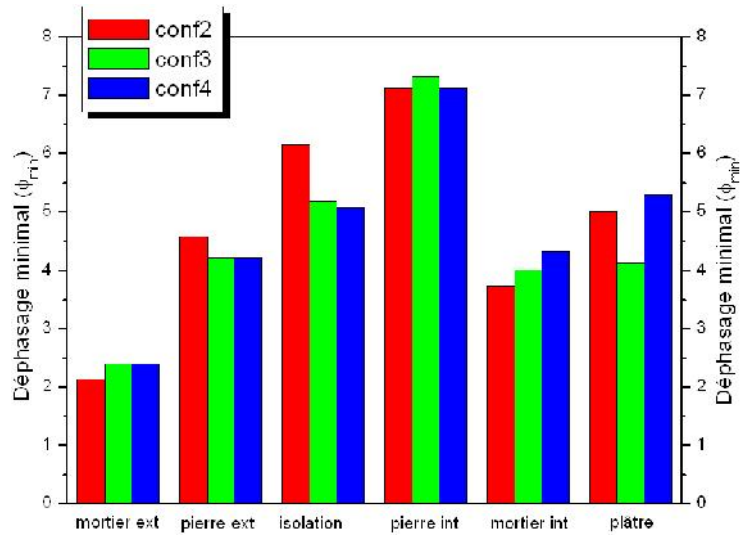


Figure 2.8: Déphasage minimal ϕ_{\min} exprimé en heures

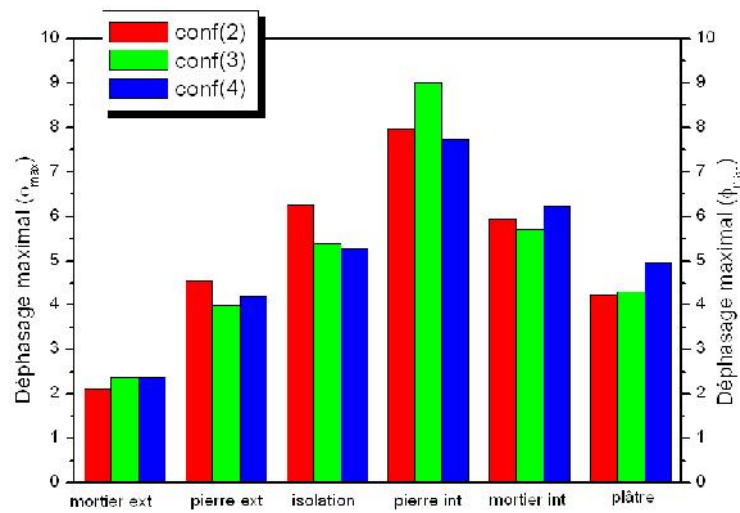


Figure 2.9: Déphasage maximal ϕ_{\max} exprimé en heures

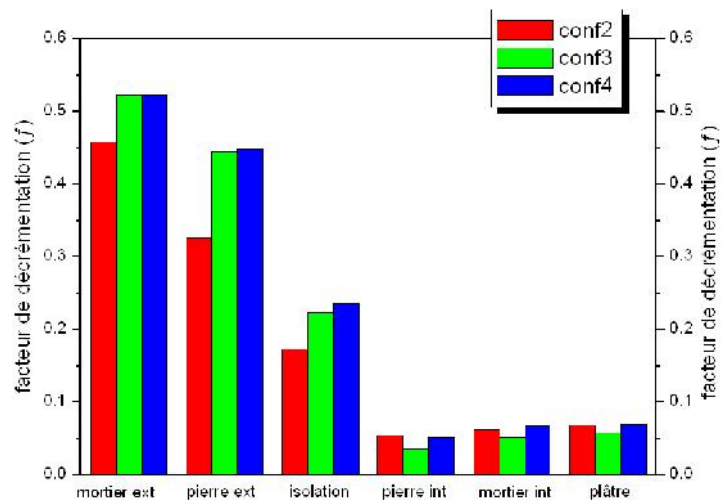


Figure 2.10 : Facteur de décrémentation f

Les surfaces intérieures de parois exposées à l'air et constituées de matériaux lourds comme la pierre ont une importante capacité à stocker les flux énergétiques périodiques. Leurs admittances sont alors élevées et en conséquence, les fluctuations de la température dans les pièces sont réduites.

2.4. **Températures et paramètres d'inertie thermique & Paroi constituée de briques creuses**

2.4.1. Description de la géométrie des briques

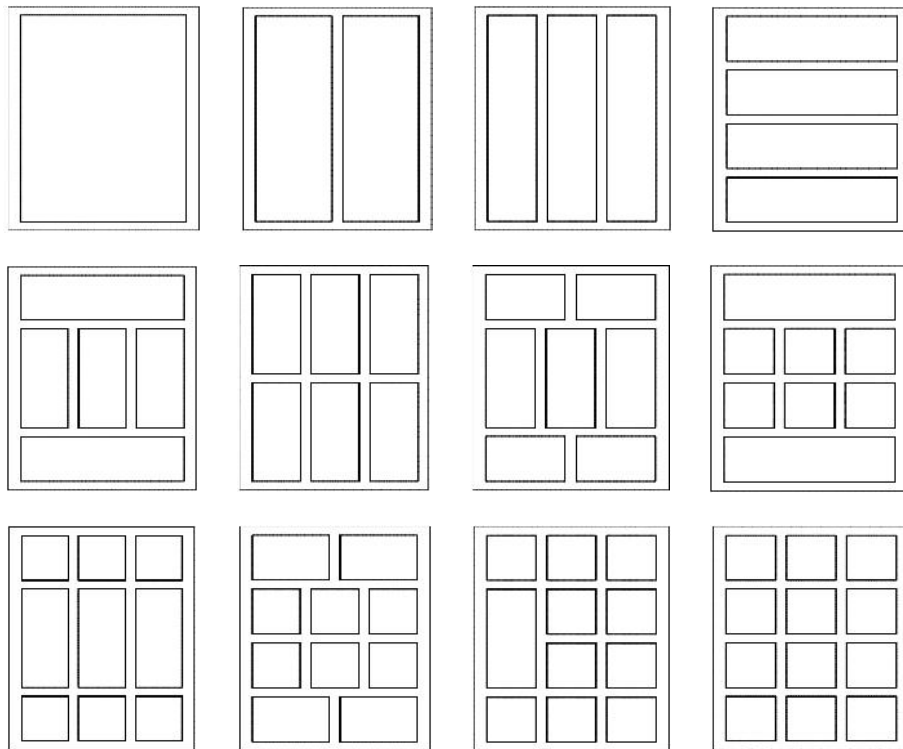
Dans une construction en pierre, l'enveloppe se chauffe et se refroidit lentement en raison de la forte inertie thermique qui provoque une différence de température importante. Par contre, dans une construction en parpaing, l'enveloppe se chauffe et se refroidit plus rapidement en raison de la faible inertie thermique du parpaing. Dans ce cas, la différence de température entre l'extérieur et l'intérieur du bâtiment est faible. A l'échelle national, la brique creuse est utilisée en force, il se peut qu'elle est renforcée par une couche d'isolation (air ou polystyrène), dans cette situation, l'ambiance intérieure devient plus confortable par rapport aux autres types de constructions.

Par ailleurs, la variation de température doit être contrôlée par l'amélioration des performances thermiques de l'enveloppe ou par l'installation des systèmes mécaniques de chauffage et climatisation pour assurer une ambiance intérieure confortable pour les occupants. Malheureusement, il est connu que les systèmes mécaniques consomment beaucoup d'énergie et génèrent des bruits qui gênent les occupants. En plus de ça, les frais de maintenance sont coûteux et les facteurs environnementaux de ces systèmes contribuent fortement à la pollution de l'atmosphère (effet de serre).

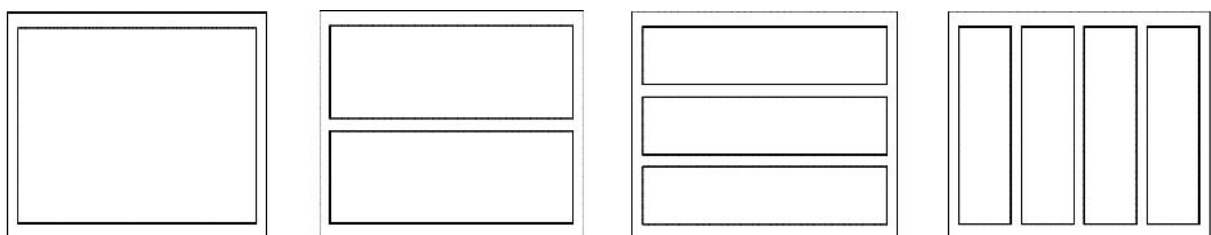
Dans cette section, un modèle mathématique est proposé permettant d'évaluer les performances énergétiques d'une paroi constituée de briques creuses. On propose 24 configurations d'une cavité partitionnée avec les mêmes dimensions extérieures (20cm x 14.7cm). On varie chaque fois le nombre et les dimensions de cavités (1-12) schématisé sur la figure 2.11. La paroi est soumise à des sollicitations

thermiques sinusoïdales, les deux valeurs des coefficients de convection intérieure et extérieure sont respectivement 9 et 17 W/m²C. Certaines hypothèses ont été considérées à savoir :

- les transferts thermiques à travers les parois sont supposés unidirectionnels et perpendiculaire aux façades verticales des briques.
- Le transfert thermique est supposé par conduction dans le corps solide et par convection dans les cavités d'air
- La distribution de la température sur les surfaces extérieure et intérieure de la brique est supposée uniforme (principe de la méthode nodale)
- On suppose aussi que les propriétés thermo-physiques de ces briques sont constantes.



Configurations verticales (L x H)



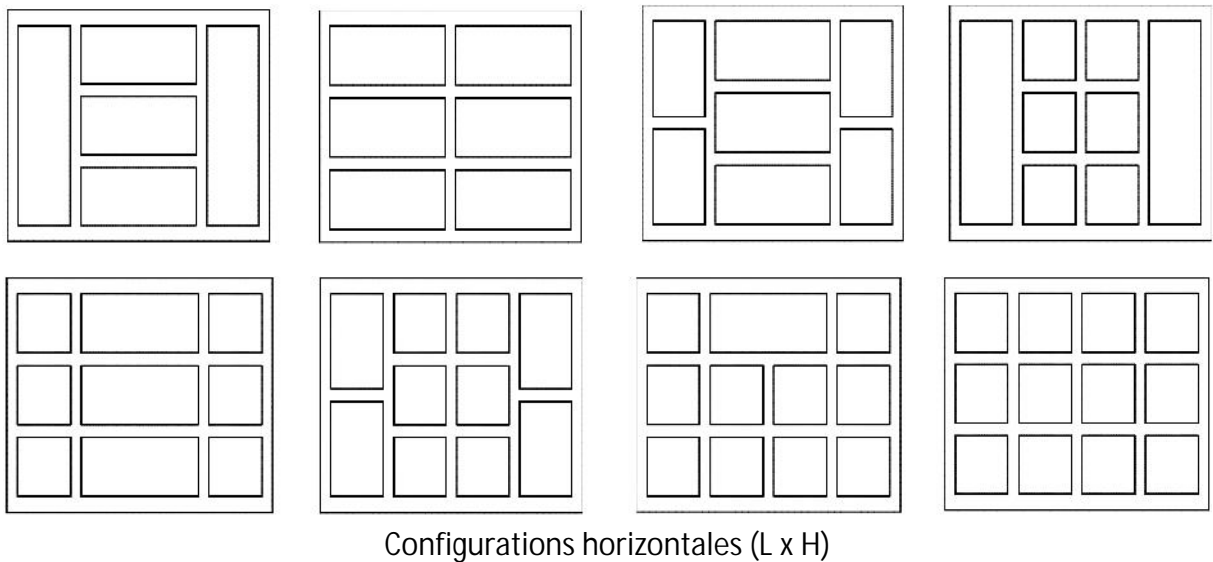


Figure 2.11 : Répartitions et configurations des cavités d'air

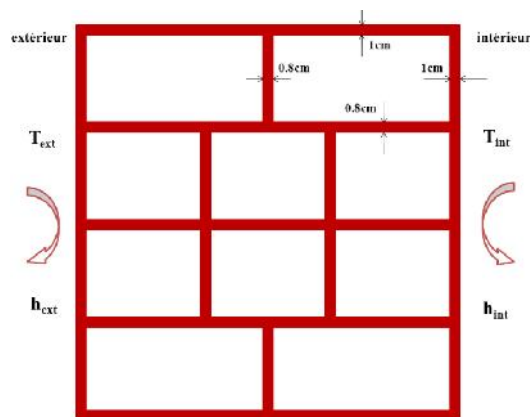


Figure 2.12 : Dimensions générales des parois et des cavités de la brique

2.4.2. Formulation mathématique

Le modèle à étudier s'inscrit dans un cadre numérique bidimensionnel d'une cavité partitionnée. Les équations qui régissent l'écoulement d'air et de transfert de chaleur par convection/conduction sont les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement (Navier-Stokes) et de l'énergie.

Équation de continuité

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (2.11)$$

Équation de conservation de quantité de mouvement

Selon l'axe ox :

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2.12)$$

Selon l'axe oy :

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho g \beta (T - T_c) \quad (2.13)$$

Equation d'énergie :

$$\rho_a C p_a \left[\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right] = \lambda_a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (2.14)$$

L'équation gouvernante de la conduction en deux dimensions en régime variable dans le milieu opaque est écrite comme suit:

$$\rho C p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (2.15)$$

Où, λ est la conductivité thermique, Cp la chaleur spécifique à pression constante, ρ étant la masse volumique du matériau.

Nous avons utilisé les mêmes conditions initiales et aux limites précédentes dans la section 2.3.1.

ρ : masse volumique [kgm^{-3}].

u : vitesse selon l'axe x [m.s^{-1}].

v : vitesse selon l'axe y [m.s^{-1}].

μ : la viscosité [Pa.s].

g : gravitation terrestre [m.s^{-2}].

β : coefficient de dilatation thermique [K^{-1}].

$C p_a$: chaleur spécifique de l'air [kJ/kg K].

λ_a : conductivité thermique de l'air [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$].

T : Température [$^{\circ}\text{K}$].

T_0 : Température initiale [$^{\circ}\text{K}$].

x : axe x [m].

y : axe y [m].

2.4.3. Résultats et discussions

Les variations des températures équivalentes de la brique creuse pour les 12 configurations indiquées précédemment sur la figure 2.13 sont décrites sur la figure 2.14 pour des briques posées verticalement et sur la figure 2.15 si elles sont posée cette fois-ci à plat (horizontalement). La simulation s'est effectuée sur une période de deux jours. Notre raisonnement s'est basé donc sur l'effet du nombre de cavités qui est un facteur déterminant dans ce type de problème.

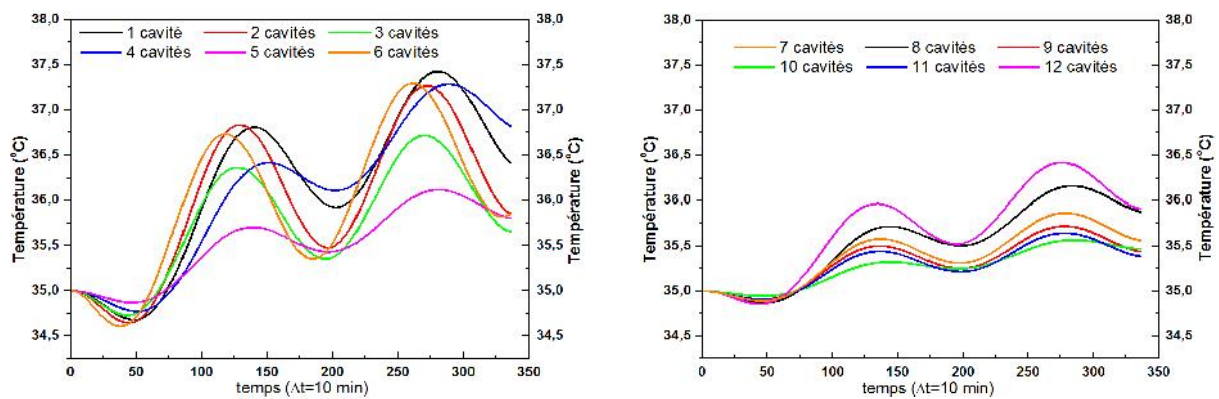


Figure 2.13 : Températures équivalentes d'une brique creuse verticale en fonction du nombre de cavités

Selon les courbes des températures moyennes de la brique toute entière, le nombre de cavités, leurs emplacements et leurs dimensions influent sensiblement sur la température du matériau. Ceci se répercute sur l'attribution des températures dans les surfaces internes, sur son inertie et plus particulièrement sur le niveau de l'isolation thermique. Les conditions initiales et aux limites maintenues sont les mêmes pour toutes les configurations. Il a été noté qu'une brique creuse à dix 10 cavités apporte un bon compromis en terme du confort et d'isolation thermique. Cette configuration génère une meilleure stabilité des températures en raison des fluctuations amorties. Ceci signifie aussi que cet arrangement de cavités favorise une meilleure résistance thermique du matériau. En revanche, une géométrie à une cavité est nettement défavorable par rapport aux autres cas; celle-ci peut être

constatée si on se base sur les températures moyennes des différents profils au cours de ces deux journées consécutives.

La même démarche sera reprise pour une brique posée à plat, les résultats des 12 configurations sont représentés sur la figure 2.14.

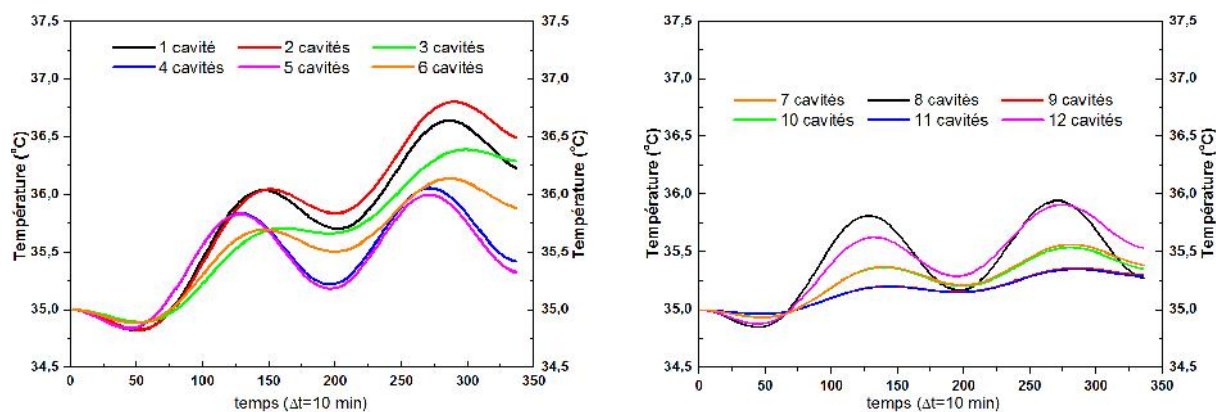


Figure 2.14 : Températures équivalentes d'une brique creuse horizontale en fonction du nombre de cavités

Les courbes tracées prouvent que les configurations correspondantes à neuf 9 et onze 11 cavités favorisent la meilleure solution, les indices de l'inertie thermique indiquent que ces solutions doivent être privilégiées. Les valeurs des températures sont globalement les plus faibles, les fluctuations sont amorties et plus stables en les comparant avec les autres profils. Par contre, on remarque que la température d'une brique à deux cavités est la plus élevée, ceci prouve que la résistance thermique correspondante à cet arrangement est plus faible, nous devons donc l'éviter dans les conceptions des bâtiments.

La compréhension du phénomène de transfert de chaleur au sein des briques nécessite aussi l'identification des températures équivalentes de ces dernières selon l'axe de l'écoulement du flux de chaleur qui est perpendiculaire aux parois. A cet égard, on s'est intéressé à la variation de la température le long de la direction du transfert (figures 2.15 et 2.16). On définit donc x comme étant la position du flux au sein du matériau ou bien la position dont on est besoin pour le calcul des températures conformes à chaque configuration. En conséquence, x varie de 0 au

14.7cm pour une brique verticales et 0 à 20cm pour une brique creuse posée horizontalement.

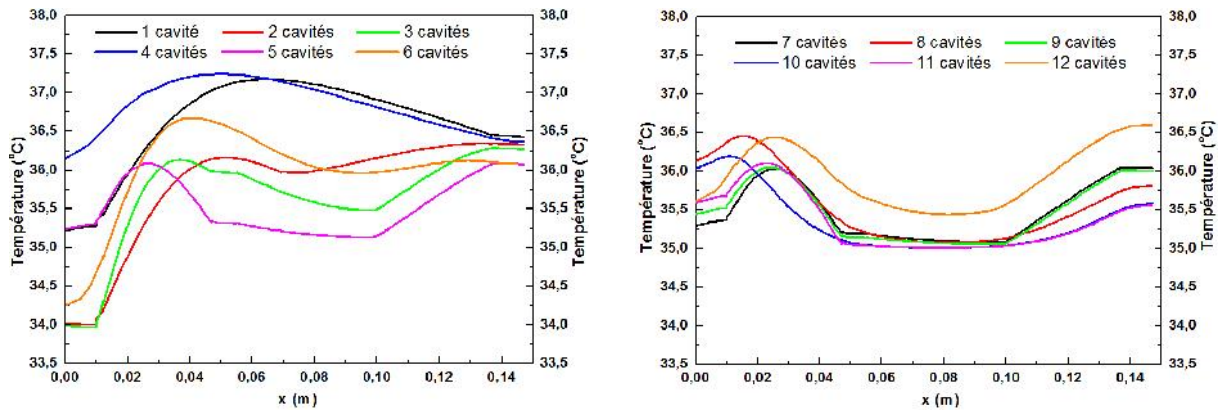


Figure 2.15 : Les profils des températures calculées le long de la direction du transfert de chaleur x au sein d'une brique creuse verticale en fonction du nombre de cavités

Les résultats affichés indiquent tout d'abord que les températures à l'intérieure du matériau sont nettement importantes par rapport à celles calculées sur les surfaces extérieures, c'est-à-dire pour $x= 0$ cm et $x= 14.7$ cm. Les deux configurations qui s coincident avec ces remarques sont celles qui comprennent une 1 cavité et 4 cavités. Cette élévation des températures est incitée par l'accumulation du flux thermique qui traverse les parois de la brique. Ceci traduit la capacité d'emmagasiner ou de stockage que possède la brique.

Ensuite, nous déduisons que certains profils de températures ont tendance de se rapprocher vers un état suffisamment stable notamment entre 5 et 10 cm. Les configurations qui sont concernées sont celles qui comprennent 5, 7, 8, 9, 10 et 11 cavités résultant ainsi de bonnes résistances thermiques. Les valeurs sont dans l'ensemble comprises entre 35.1 et 36.3 °C.

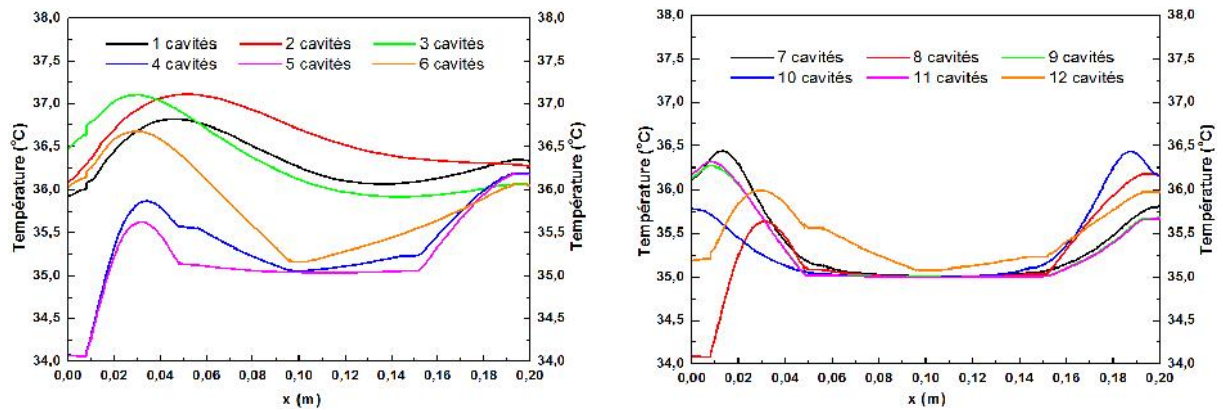


Figure 2.16 : Les profils des températures calculées le long de la direction du transfert de chaleur x au sein d'une brique creuse horizontale en fonction du nombre de cavités

Pour ce cas, le profil des températures sont globalement semblables pour les briques constituant 7 à 11 cavités dans une zone comprise entre 5 et 15 cm. Ceci est dû aux résistances "plus au moins élevées" correspondantes à ces configurations. Alors, dans certaines situations l'ajout de quelques cavités présente parfois une contrainte thermique. Cependant, ces contraintes peuvent générer une inertie thermique qui aura un effet négatif sur le confort des bâtiments.

La partie suivante de ces travaux concerne l'identification des paramètres d'inertie thermique, nous nous intéressons au déphasage et au facteur de décrémentation issus des différents profils de température. Une étude comparative entre les différentes configurations s'est présentée afin d'évaluer l'influence de nombre de cavités. Les valeurs calculées des déphasages pour une brique sont données sur les figures 2.17 et 2.18. Alors que les figures 2.19 et 2.20 montrent la variation du facteur de décrémentation f pour les différentes configurations.

Pour le premier histogramme (figure 2.17), la valeur la plus faible du déphasage minimal τ_{\min} est de 2 heures et 30 minutes. Elle correspond à une brique à six 6 cavités. La valeur maximale est estimée approximativement 6 heures pour une brique contenant quatre 4 cavités. En effet, pour le déphasage maximal τ_{\max} , la valeur minimale atteint exactement 3 heures et 30 minutes pour une brique à six 6 cavités, tandis que sa valeur maximale s'est fixée à 7 heures et 57 minutes pour seulement 4 cavités.

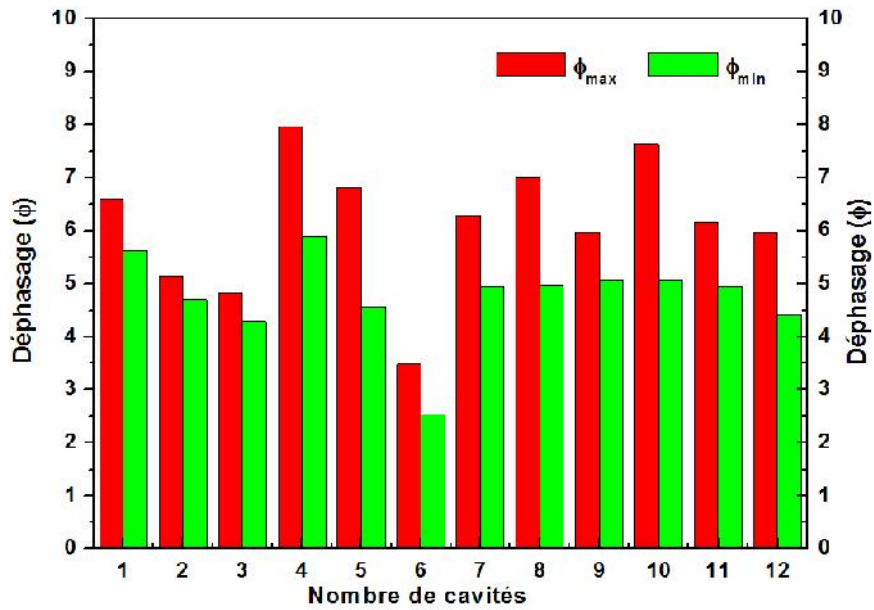


Figure 2.17 : Déphasage maximal et minimal (en heures), cas d'une brique creuse en position verticale

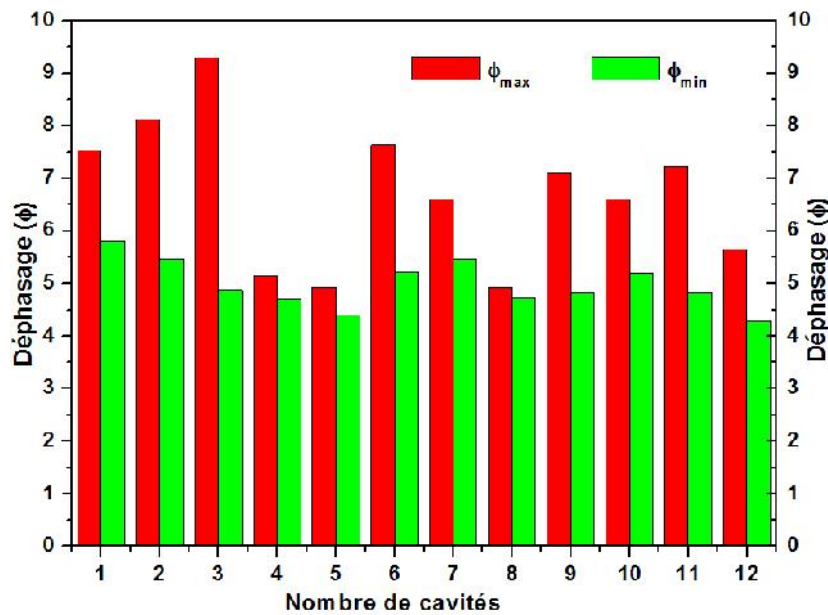


Figure 2.18 : Déphasage maximal et minimal (en heures), cas d'une brique creuse en position horizontale

De même pour la figure 2.18 qui représente le déphasage maximal et minimal en cas d'une brique creuse en position horizontale, les chiffres indiquent une différence entre les valeurs de déphasage qui sont dues à la variation du nombre de cavités. La valeur minimale du déphasage ϕ_{max} s'est arrêtée à 4 heures et 57 minutes pour une brique à cinq 5 cavités. Pour une brique à trois 3 cavités, la valeur la plus élevée de ϕ_{max} s'est fixée à 9 heures 19 minutes.

D'autre part, en traçant les histogrammes du facteur de décrémentation f , nous obtenons les figures 2.19 et 2.20 ci-dessous.

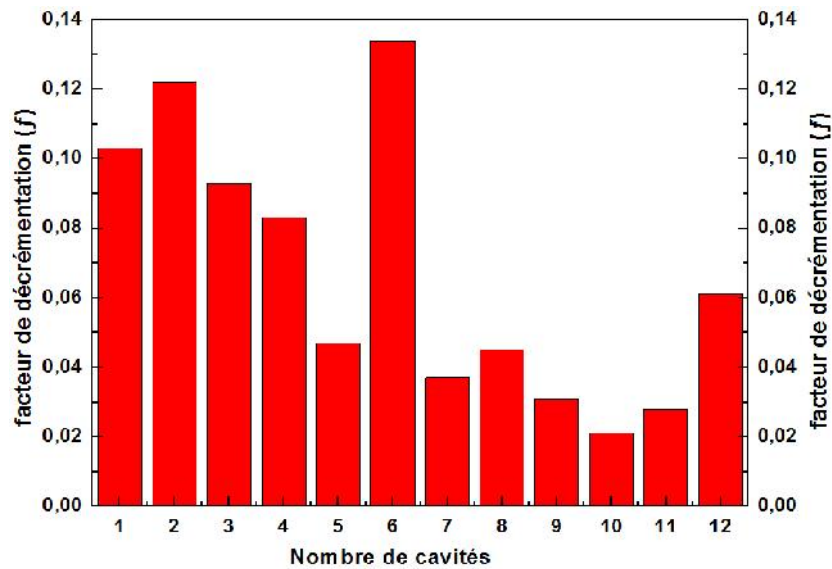


Figure 2.19 : Variation du facteur de décrémentation f pour des briques en position verticale

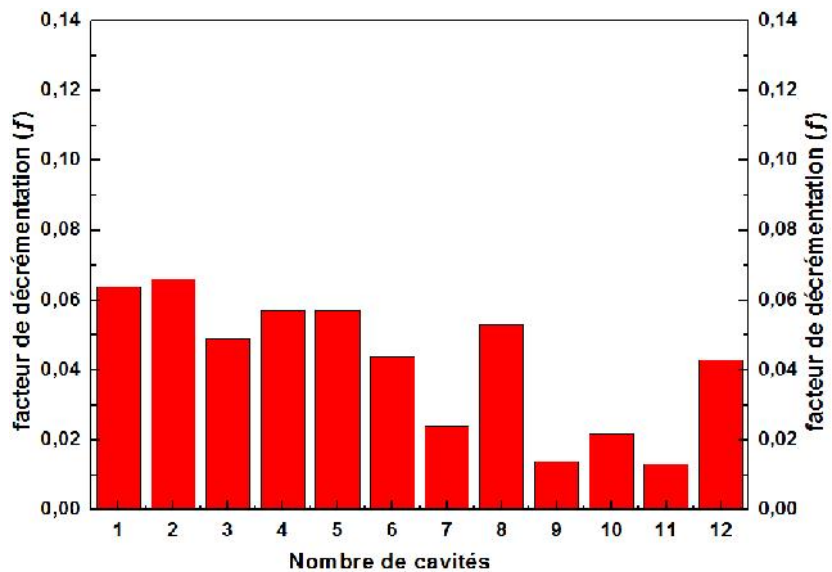


Figure 2.20 : Variation du facteur de décrémentation f pour des briques en position horizontale

Conformément à ces résultats, nous pouvons retenir que le facteur de décrémentation f le plus faible correspond à des briques creuses à dix 10 et 11 cavités pour respectivement des positions verticales et horizontales. Les faibles valeurs traduisent systématiquement un fort amortissement donc une minimisation des fluctuations des températures.

Cependant, l'analyse du phénomène d'inertie thermique en fonction des différentes configurations a mis en évidence des déphasages thermiques atteignant une durée de presque 8 heures pour la journée du 20 Juillet avec un écart de température de l'ordre de 10.58 °C en cas d'une brique à 11 cavités (position horizontale) et de l'ordre de 10.34 °C pour la position verticale. Ces conditions peuvent assurer un confort acceptable. Il est clair que dans ces genres de situations, le nombre de cavités et la géométrie relative à cette configuration joue un rôle important pour minimiser les déperditions thermiques à travers le mur opaque en retardant le transfert de chaleur à l'intérieur du bâtiment et en même temps en amortissant les fluctuations des températures.

2.5. Conclusion

La conception de l'enveloppe du bâtiment doit prendre en considération l'échange thermique dans le corps du bâtiment et les conditions climatiques de l'environnement. En se référant à ces travaux, il est possible de soulever certaines conclusions qui semblent très intéressantes.

Pour les matériaux de construction déphaseurs et lourds comme la pierre, il a été constaté qu'ils ont une importante capacité à emmagasiner les flux de chaleur. Leurs admittances sont alors élevées et en conséquence les fluctuations des températures peuvent être amorties. Parfois, sous des conditions particulières, ils peuvent améliorer le confort thermique intérieur de l'habitat en lissant les variations de température jour - nuit.

En ce qui concerne la brique creuse, le problème du confort dépend principalement du nombre de cavité et sa forme géométrique. Ces facteurs sont des paramètres qui influent sensiblement sur les niveaux d'isolation et d'inertie thermique du mur en question. On peut conclure que les briques creuses possèdent des propriétés thermo-physiques plus intéressantes qui permettront de réduire les déperditions thermiques à travers l'enveloppe et minimiser par conséquence la consommation énergétique quelle que soit la saison. En faisant une synthèse, nous concluons que :

- Une brique creuse verticale à dix 10 cavités apporte un bon compromis en terme du confort et d'isolation thermique tout en favorisant une meilleure résistance thermique.
- Si ce matériau est disposé horizontalement, nous avons trouvé que les configurations correspondantes à neuf 9 et onze 11 cavités favorisent une meilleure solution, les indices de l'inertie thermique indiquent que ces solutions doivent être privilégiées.
- En se focalisant sur l'axe (le long de la direction) du transfert de chaleur, les profils de températures ont une tendance de se rapprocher vers un état globalement stable, plus particulièrement entre 5 et 10 cm. Il s'agit des briques creuse à 5, 7, 8, 9, 10 et 11 cavités. Ces profils sont dans l'ensemble similaires pour les briques creuse horizontales constituant 7 à 11 cavités
- Par ailleurs, le facteur de décrémentation le plus faible correspond à des briques creuses à dix 10 et 11 cavités pour respectivement des positions verticales horizontales. Les faibles valeurs traduisent systématiquement un fort amortissement donc une minimisation des fluctuations des températures.

Références

1. O. Lucon, D. Üрге-Vorsatz, A. Zain Ahmed, H. Akbari, P. Bertoldi, L. F. Cabeza, N. Eyre, A. Gadgil, L. D. D. Harvey, Y. Jiang, E. Liphoto, S. Mirasgedis, S. Murakami, J. Parikh, C. Pyke, and M. V. Vilariño, Buildings. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs- Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlomer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
2. S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M.K. Cherier , M. Hamdani, M.R. Yaiche, N. Benamrane, Influence of the compactness index to increase the internal temperature of a building in Saharan climate, Energy and Buildings 66 (2013) 678 – 687.
3. S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M.K. Cherier, M. Hamdani, R.M. Yaiche, R. Khanniche, Influence of building orientation on internal temperature in Saharan climates, building located in Ghardaïa region (Algeria), thermal science, 2013, Vol. 17, N° 2, pp. 349-364.

4. K.J. Kontoleon, Th.G. Theodosiou, K.G. Tsikaloudaki, The influence of concrete density and conductivity on walls' thermal inertia parameters under a variety of masonry and insulation placements, *Applied Energy* 112 (2013) 325–337.
5. A. Karagiozis, Advanced hygrothermal modeling of building materials using MOISTURE-EXPERT 1.0, In *Proceedings of the international articleboard/composite materials symposium*, Pullman Washington, pp 39-47, 2001.
6. J. Karlsson, L. Wadsö, M. Öberg, A conceptual model that simulates the influence of thermal inertia in building structure, *Energy and Buildings* 60 (2013) 146–151.
7. José A. Orosa, Armando C. Oliveira, Field study on building inertia and its effects on indoor thermal environment, *Renewable Energy* 37 (2012) 89–96.
8. Y. Tamene, S. Abboudi, C. Bougriou, Simulation des transferts thermiques transitoires à travers un mur multicouche soumis à des conditions de flux solaire et de convection, *Revue des énergies renouvelables* vol 12 N° 1 (2009) 117-124.
9. M. Ibrahim, P.H. Biwole, E. Wurtz, P. Achard, A study on the thermal performance of exterior walls covered with a recently patented silica-aerogel-based insulating coating, *Building and Environment* 81 (2014) 112-122.
10. N. Soon-Ching, L. Kaw-Sai, T. Ngee-Heng, Thermal inertia of newspaper sandwiched aerated lightweight concrete wall panels: Experimental study, *Energy and Buildings* 43 (2011) 2956–2960.
11. K.J. Kontoleon, Th.G. Theodosiou, K.G. Tsikaloudaki, The influence of concrete density and conductivity on walls' thermal inertia parameters under a variety of masonry and insulation placements, *Applied Energy* 112 (2013) 325–337.
12. L.E. Mavromatidis, M. EL Mankibi, P. Michel, M. Santamouris, Numerical estimation of time lags and decrement factors for wall complexes including multilayer thermal insulation in two different climatic zones, *Applied Energy* 92 (2012) 480–491.
13. D. Gossard, B. Lartigue, Three-dimensional conjugate heat transfer in partitioned enclosures: Determination of geometrical and thermal properties by an inverse method. *Applied Thermal Engineering* 54(2013): 549-558.
14. F. Mathieu-Potvin, L. Gosselin, Thermal shielding of multilayer walls with phase change materials under different transient boundary conditions, *International Journal of Thermal Sciences* 48 (2009): 1707-1717.
15. KJ. Kontoleon, ThG. Theodosiou, KG. Tsikaloudaki, The influence of concrete density and conductivity on walls' thermal inertia parameters under a variety of masonry and insulation placements, *Applied Energy*. 112(2013): 325-337.
16. D. Liu, FY. Zhao, HQ. Wang, Passive heat and moisture removal from a natural vented enclosure with a massive wall, *Energy* 36 (2011): 2867-2882.

17. MA. Antar, Thermal radiation role in conjugate heat transfer across a multiple-cavity building block, *Energy* 35 (2010): 3508-3516.
18. MM. Al-Hazmy, Analysis of coupled natural convection–conduction effects on the heat transport through hollow building blocks, *Energy and Buildings*, 38 (2006): 515-521.
19. J. Sun, L. Fang, Numerical simulation of concrete hollow bricks by the finite volume method, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 52(2009): 5598-5607.
20. M. Zukowski, G. Haese, Experimental and numerical investigation of a hollow brick filled with perlite insulation, *Energy and Buildings*. 42 (2010): 1402-1408.
21. K. Arendt, M. Krzaczek, J. Florczuk, Numerical analysis by FEM and analytical study of the dynamic thermal behavior of hollow bricks with different cavity concentration, *International Journal of Thermal Sciences* 50 (2011): 1543-1553.
22. A. De Gracia, A. Castell, M. Medrano, LF. Cabeza, Dynamic thermal performance of alveolar brick construction system, *Energy Conversion and Management*. 52 (2011): 2495-2500.
23. J. Kočí, J. Maděra, M. Jerman, Černý R, Computational assessment of thermal performance of contemporary ceramic blocks with complex internal geometry in building envelopes, *Energy and Buildings* 84 (2015): 628-632.
24. T. Ait-Taleb, A. Abdelbaki, Z. Zrikem, Simulation of coupled heat transfers in a hollow tile with two vertical and three horizontal uniform rectangular cavities heated from below or above, *Energy and Buildings* 99 (2014): 61-66.
25. J. Kočí, J. Maděra, R. Černý, A fast computational approach for the determination of thermal properties of hollow bricks in energy-related calculations, *Energy*, 83 (2015): 749-755.
26. J.P. Sun, L. Fang, Numerical simulation of concrete hollow bricks by the finite volume method, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52 (2009): 5598-5607
27. H. Asan, Y.S. Sancaktar, Effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor, *Energy and Buildings* 1998, 28:159–66.

Modèles, compréhension et simulations de parois contenant un matériau à changement de phase MCP

Modèles, compréhension et simulations de parois contenant un matériau à changement de phase MCP

Actuellement, l'intégration des MCPs dans l'enveloppe est largement utilisée dans plusieurs types de bâtiment dans le monde. En Algérie, ce type de matériaux peut être introduit dans les futures constructions. Promouvoir donc des modes constructifs issus des ressources existantes, nécessite une réflexion sur l'intégration et le choix des matériaux employés pour la construction. L'objectif de ce chapitre est d'évaluer de nouvelles techniques d'intégration "mélanges de MCPs" tout en visant l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments et le confort thermique pour les occupants.

Les problèmes physiques ont été étudiés en utilisant le code de calcul CFD (Computational Fluid Dynamics) basé sur la méthode des volumes finis. La méthode enthalpie-porosité a été choisie pour modéliser le stockage de l'énergie par chaleur latente sous des conditions environnementales variables. La paroi en MCP est considérée comme étant un mélange homogène, les propriétés thermiques sont supposées constantes. Nous nous intéressons à l'amélioration du comportement thermique des différents éléments de construction.

En fait, afin d'étudier le processus de changement de phase des MCPs, une analyse numérique des transferts thermiques en régime variable s'est achevée en fonction des configurations des différentes cavités. On s'est intéressé plus particulièrement à des cavités de forme carrée, cylindrique et elliptique pour différentes épaisseurs.

3.1. Introduction

L'amélioration des performances thermiques de l'enveloppe du bâtiment est un domaine de recherche important. Pendant les dernières années, les chercheurs ont développé des nouveaux systèmes de stockage d'énergie qui peuvent être employés pour réduire la consommation énergétique due aux systèmes de chauffage et climatisation. La construction des bâtiments modernes utilise des matériaux légers

qui peuvent fournir une ambiance intérieure confortable pour les occupants. En effet, le marché mondial offre des nouvelles technologies des énergies renouvelables, qui peuvent être intégrées dans les bâtiments pour l'amélioration de l'efficacité énergétique et la lutte contre les changements climatiques. L'utilisation des matériaux à changement de phase MCPs dans l'enveloppe favorise une réduction de la dépendance énergétique. Le processus de solidification/fusion permet d'utiliser le stockage de la chaleur latente pour augmenter l'inertie thermique de l'enveloppe. Les conditions environnementales doivent assurer le cycle de la solidification/fusion des MCPs, la plage de la température de fusion des MCPs doit donc être proche de la température du confort thermique.

3.2. Etat de l'art

Il existe de nombreux types de systèmes de stockage d'énergie thermique. Le stockage d'énergie thermique à chaleur latente est le plus attrayant en raison de sa densité de stockage thermique élevée dans une plage limitée ou à température constante [1]. Parmi ces systèmes, les équipements de bâtiment nécessitant une haute performance thermique, en particulier dans les zones chaudes. Les systèmes MCPs peuvent stocker 5 à 14 fois plus de chaleur par unité de volume par rapport à des matériaux sensibles au stockage de la chaleur tels que la roche ou l'eau [2]. Les systèmes de stockage avec des matériaux à changement de phase offrent un stockage de haute énergie thermique permettant au concepteur de développer plus des nouveaux systèmes avec moins de pertes de chaleur et un rendement élevé. Récemment, certains matériaux à changement de phase MCPs ont été appliqués dans plusieurs applications telles que la construction. L'intégration des MCPs dans les murs de bâtiments peut réduire l'énergie de chauffage et de climatisation et améliorer l'efficacité énergétique. De nombreuses études ont été consacrées à la caractérisation et à la classification des matériaux à changement de phase MCPs, aux systèmes d'optimisation et de conception, aux applications de stockage d'énergie thermique à chaleur latente et à l'amélioration des échanges thermiques [1, 3-7].

L'intégration des MCPs dans l'enveloppe du bâtiment est destinée à augmenter la capacité de stockage de chaleur. L'effet du changement de phase des MCPs (solide-liquide) consiste à réduire les fluctuations de la température de l'ambiance intérieure par l'amortissement et la réduction des flux de chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment [8]. Les travaux ont porté sur les bâtiments durables avec le développement de nouvelles techniques de stockage d'énergie et de sources d'énergie renouvelables. L'intégration des MCPs dans les murs des bâtiments a tendance à utiliser l'énergie solaire [9]. L'intégration des MCPs micro-encapsulés dans l'enveloppe des bâtiments a attiré l'attention de nombreux chercheurs, elle a présenté une nouvelle technologie dans les systèmes de construction. Un travail expérimental et numérique de Lachheb et al. [10] a montré que la capacité de stockage thermique des MCPs micro-encapsulés dans un mélange de plâtre-MCP est fortement améliorée ainsi que les performances thermiques de la paroi. Zalba et al. [11] ont utilisé une simulation numérique dans des conditions d'environnement typiques pour une année, ils ont rapporté les avantages de la méthode enthalpique pour traiter l'équation d'énergie en relation avec le processus solidification-fusion des MCPs. Ils ont résumé quelques simulations et théories du transfert de chaleur des MCPs. Pasupathy et al. [12] ont développé un modèle d'incorporation des MCPs dans un toit. Ils ont analysé l'effet de la variation des conditions environnementales sur le coefficient de transfert de chaleur sur la surface du toit. Khillarkar et al. [13] ont proposé deux configurations différentes d'un tube pour étudier numériquement le processus de fusion d'un matériau à changement de phase. Ils ont constaté que la stratification thermique est obtenue dans la partie supérieure de la cavité. Vyshak et Jilani [14] ont étudié numériquement l'effet de différentes configurations: rectangulaire, cylindrique, coque et tube contenant le même volume et la même surface d'échange de chaleur que le stockage thermique à chaleur latente (LHTS). Les résultats ont montré que l'effet de la géométrie est plus important avec une augmentation de la masse des MCPs et de la géométrie des conteneurs à coque cylindrique, ce qui prend un minimum de temps pour une quantité égale de stockage d'énergie.

3.3. Etude numérique de la solidification-fusion d'un mélange "Plâtre-MCP"

Cette partie de ce chapitre présente une étude numérique du problème de la solidification-fusion d'un mélange plâtre-MCP dans une plage de température qui nous permet de suivre le processus de changement de phase. Pour résoudre ce problème, on utilise la méthode enthalpie-porosité. La zone pâteuse liquide-solide est traitée comme une zone poreuse avec une porosité égale à la fraction liquide (f), qui indique la fraction du volume de la cellule sous forme liquide, est associée à chaque cellule du domaine. La fraction liquide est calculée à chaque itération, sur la base d'un bilan d'enthalpie. La simulation numérique est réalisée en utilisant un code de calcul commercial CFD fluent 6.3 [15], les résultats obtenus sont validés par des données de la littérature.

Pour une analyse détaillée du problème de solidification-fusion des MCPs, une simulation numérique est nécessaire. L'utilisation d'un modèle numérique dans le régime variable doit résoudre le système des équations différentielles en fonction de temps et d'espace. Le but est de décrire les équations utilisées pour modéliser le problème de transfert de chaleur dans un processus de changement de phase. Ce que l'on appelle couramment dans la littérature le problème de Stefan ou les problèmes de type Stefan. Les équations décrites sont conformes à l'approche enthalpie-porosité, qui est l'une des plus populaires pour ce type de problèmes.

3.3.1. Validation du Modèle & Cas d'une paroi plane opaque

Le modèle numérique proposé a été vérifié en comparant les résultats de simulation aux résultats expérimentaux. Dans cette section, nous allons utiliser la méthode d'enthalpie-porosité pour étudier le problème de transfert thermique à changement de phase. Le problème physique et les conditions aux limites et initiales sont décrits par figure 3.1, la température initiale de la paroi est supposée uniforme. La paroi a une épaisseur de $L=2$ cm et une hauteur de $H=25$ cm. Donc, le mur est soumis à une variation de température $T_p(t) = t + T_0$ sur les deux cotés verticaux. Les frontières supérieure et inférieure sont isolées thermiquement. Ainsi, le problème peut être simplifié comme étant un problème de transfert de chaleur par conduction

unidimensionnel à travers le milieu MCP. Les propriétés thermo-physiques sont différentes pour les deux phases solide et liquide tout en étant indépendant de la température. La convection naturelle dans le milieu MCP est négligée en raison des basses dimensions de la paroi. Le mélange MCP/plâtre est supposé homogène et isotrope. La température de fusion du MCP est $T_f = 26 \text{ }^\circ\text{C}$. Les données utilisées pour réaliser ces simulations ont été obtenues à partir de données mesurées par Choi et al. [16]. Compte tenu de ces hypothèses, la formulation d'enthalpie pour la conduction qui contrôle le changement de phase peut être écrite comme suit :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (3.1)$$

Où k est la conductivité thermique, T est la température et $H(T)$ est l'enthalpie.

Comme indiqué ci-dessus, une alternative de l'équation 3.1 peut être obtenue en configurant explicitement les enthalpies sensible et latente:

$$H = h + \rho f L \quad (3.2)$$

Où f est la fraction volumique du liquide, ρ est la densité et L est la chaleur latente. L'enthalpie sensible du MCP peut être donnée en termes de température et de capacité calorifique spécifique par la relation suivante:

$$h = \int_{T_m}^T \rho c dT \quad (3.3)$$

Où T_m est la température de fusion.

Dans le cas d'un changement de phase isotherme, la fraction de phase liquide f est définie par:

$$f = \begin{cases} 1 & \text{si } T \geq T_m \\ 0 & \text{si } T \leq T_m \\ \frac{T - T_{sol}}{T_{liq} - T_{sol}} & \text{si } T_{sol} < T < T_{liq} \end{cases} \quad (3.4)$$

Notons que l'équation 3.1 peut être traitée via des étapes d'itération pour résoudre l'équation d'évolution de la température en raison du terme non linéaire de source de chaleur latente existant dans l'équation d'énergie (équation 3.5). Ainsi, les

formulations d'enthalpies générales, prenant en compte les parties sensibles et latentes, peuvent être données par:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (\alpha \nabla h) - \rho L \frac{\partial f}{\partial t} \quad (3.5)$$

L'équation ci-dessus ainsi que les conditions initiales et aux limites représentent le modèle mathématique régissant le problème de changement de phase isothermique par conduction. Il convient de noter que les formulations mathématiques sont adéquates, car la fraction liquide est considérée comme un terme source. Puisque l'équation 3.5 est non linéaire, le modèle ne peut être résolu que numériquement.

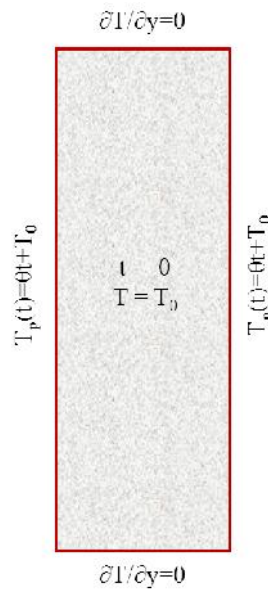


Figure 3.1: Conditions aux limites du modèle étudié

Tableau 3.1: Propriétés thermophysiques de mélange plâtre+MCP [10]

Propriétés thermophysiques	Valeurs
Conductivité thermique phase solide	0.266 Wm ⁻¹ K ⁻¹
Conductivité thermique phase liquide	0.236 Wm ⁻¹ K ⁻¹
Chaleur spécifique phase solide	915 Jkg ⁻¹ K ⁻¹
Chaleur spécifique phase liquide	725 Jkg ⁻¹ K ⁻¹
Chaleur latente	11265 Jkg ⁻¹
Densité	1213 kgm ⁻³

Les résultats numériques comparés à des données expérimentales sont représentés sur les figures 3.2 et 3.3.

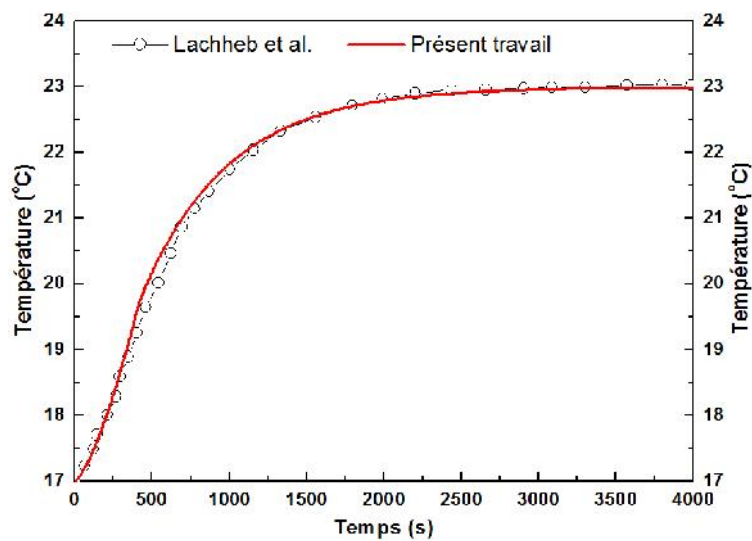
Le flux de chaleur et la température sont les paramètres thermo-physiques utilisés pour la validation du modèle numérique.

La comparaison s'est achevée lorsque le MCP est à l'état solide ($T_{\text{initiale}} = 17 \text{ °C}$, $T_{\text{finale}} = 23 \text{ °C}$) et à l'état liquide ($T_{\text{initiale}} = 30 \text{ °C}$, $T_{\text{finale}} = 38 \text{ °C}$), le choix de ces valeurs dépend de la température de fusion T_f . Les profils de température et du flux de chaleur dans les deux états ont été comparés aux données expérimentales [17]. Il est important de noter que le flux de chaleur à $t = 0 \text{ s}$ (l'état initial) est égal à $Q = 0 \text{ (w/m}^2\text{)}$.

Ainsi, on impose une augmentation de température sur les deux cotés verticaux par l'équation $T_p(t) = t + T_0$ qui induit une évolution thermique du système (stockage) pour rendre l'état d'équilibre plus stable.

La confrontation entre les résultats du présent travail et les résultats de Lachheb et al. [10] est représentée par les courbes suivantes qui traduisent les mêmes profils de température et le flux de chaleur.

La figure 3.2 représente donc l'augmentation de température imposée et le flux de chaleur apporté au mélange MCP/plâtre pendant 4000s (1 heure 6 minutes 40 secondes).



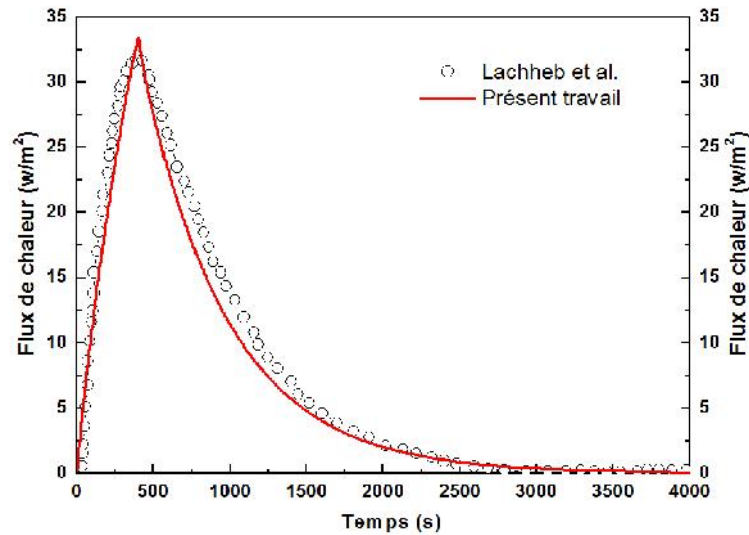


Figure 3.2: Variation de la température et du flux de chaleur, phase solide (17 °C - 23 °C)

Ces figures montrent une bonne concordance entre les résultats de simulation et ceux expérimentaux. On peut observer que la paroi prend sa température d'équilibre après un temps de $t = 2750s$ (45 minutes 50 secondes). Cependant, le choix des valeurs de température ($T_{initiale} = 17 \text{ °C}$, $T_{finale} = 23 \text{ °C}$) est imposé pour étudier le comportement thermique du mélange plâtre/MCP à la suite du stockage de chaleur dans l'état solide. Dans cette situation, on constate qu'il y a une variation de l'énergie interne du mélange. En conséquence, la paroi stocke une quantité de chaleur sensible dans la phase solide calculée par l'équation 3.6 :

$$Q = \frac{1}{\rho e} \int_{t_{in}}^{t_f} \Delta\phi \, dt \quad (3.6)$$

Les variations temporaires des températures et des flux de chaleur sont présentées dans la figure 3.3.

Les valeurs sont calculées sous une température ambiante supérieure à la température de fusion ($T_{initiale} = 30 \text{ °C}$, $T_{finale} = 38 \text{ °C}$).

Les propriétés thermophysiques dans cette phase liquide sont constantes (tableau 3.1).

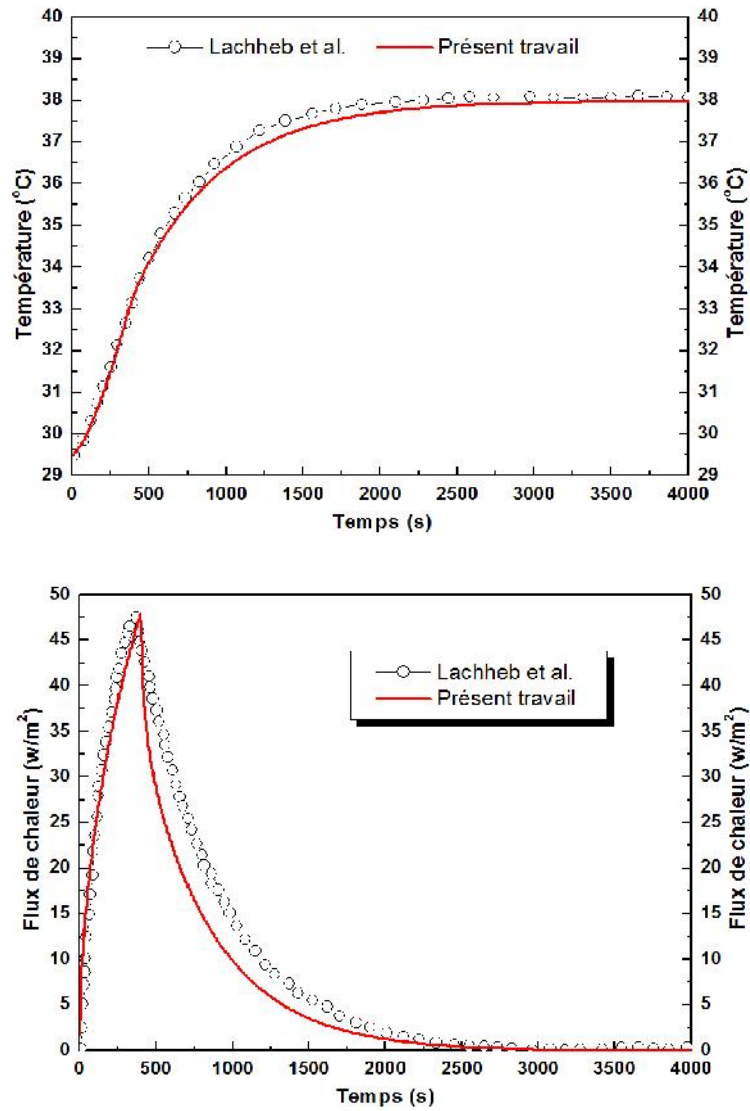


Figure 3.3: Variation de la température et du flux de chaleur, phase liquide (30 °C - 38 °C)

Cependant, la température du mélange "Plâtre+MCP" va s'équilibrer au bout de $t = 2500s$ (41 minutes 40 secondes).

Généralement, la variation (le comportement) de température et le flux de chaleur calculés numériquement et mesurés expérimentalement sont similaires. Donc, les figures montrent une bonne concordance entre les résultats de simulation et expérimentaux. Pour confirmer ces résultats, on se base sur les calculs d'erreurs (tableau 3.2).

La racine carrée de la variance est très proche de l'erreur quadratique moyenne (Root Mean Squared Error en anglais, avec l'acronyme RMSE) qui, pour N observations s'écrit [18] :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (3.7)$$

\hat{y}_i la valeur de référence

y_i la valeur estimée par notre méthode

Cette quantité est l'une des plus utilisées pour évaluer l'intérêt prédictif d'un modèle, l'autre étant l'erreur absolue moyenne (Mean Absolute Error en anglais, avec l'acronyme MAE) [18] :

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\hat{y}_i - y_i| \quad (3.8)$$

Tableau 3.2 : Calcul d'erreur et évaluation des incertitudes

Phases	Grandeurs physiques	MAE	RMSE
Phase solide 17 °C – 23 °C	Température	0.0997	0.1376
	Flux de chaleur	1.0071	1.5522
Phase liquide 30 °C – 38 °C	Température	0.1994	0.2334
	Flux de chaleur	2.1716	3.3579

Nous constatons que les valeurs obtenues sont plus précises dans la phase solide. En plus, les approches semblent plus fiables pour l'estimation des températures résultantes.

3.3.2. Résultats de caractérisation thermique de la paroi

La figure 3.4 montre l'influence d'une variation sinusoïdale de la température extérieure sur les températures intérieure et extérieure de la paroi opaque. Les flux de chaleur superficiels sont également pris en considération dans cette étude (figure 3.5). Les résultats obtenus correspondent aux trois jours consécutifs obéissant à un climat partiellement chaud [10].

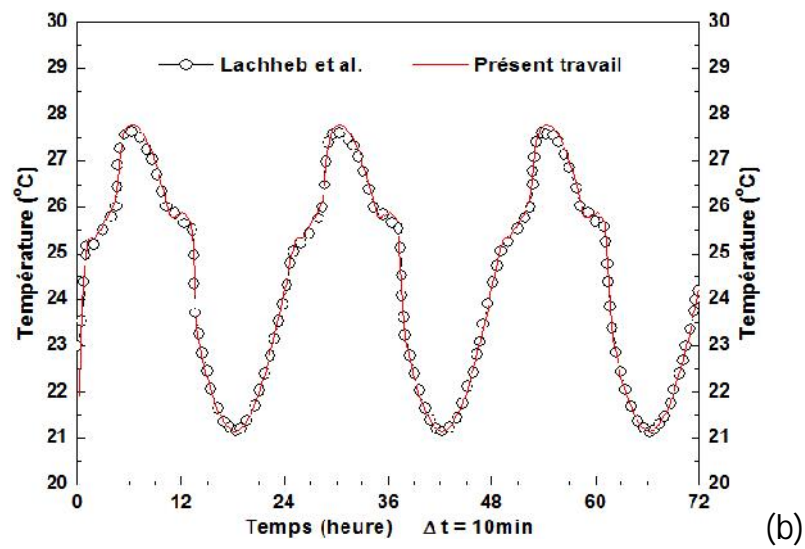
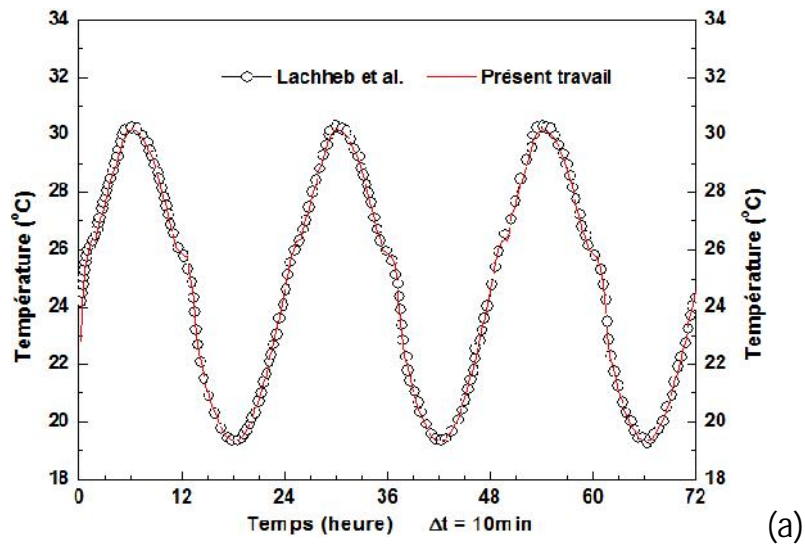
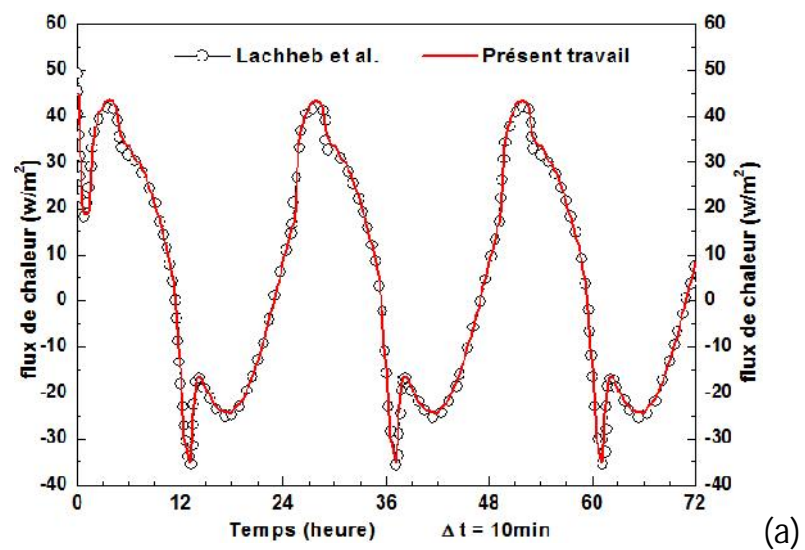


Figure 3.4: Variation des températures superficielles à l'extérieur (a) et à l'intérieur (b) de la paroi



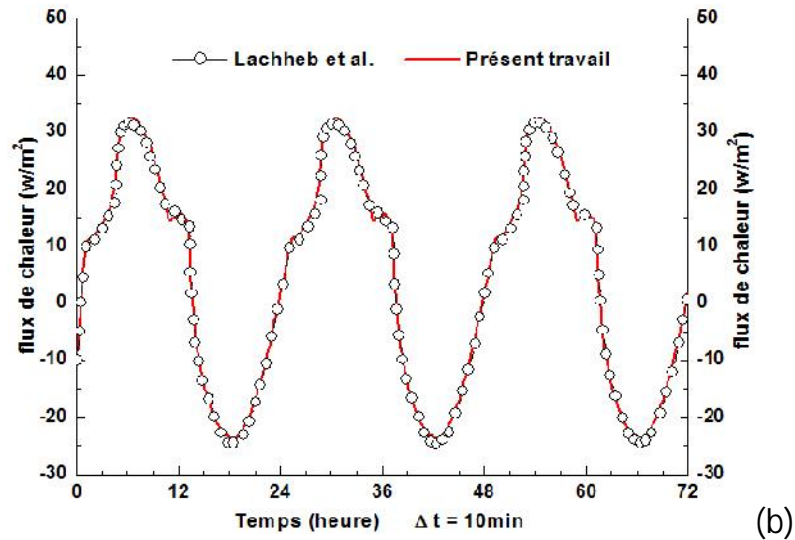


Figure 3.5: Variation des flux de chaleur superficiels à l'extérieur (a) et à l'intérieur (b) de la paroi

En faisant une analyse sur la variation des températures instantanées, on remarque que ces dernières fluctuent entre les valeurs maximales et minimales de façon qui se rapproche d'une forme périodique. Selon la figure 4-a, les valeurs calculées de la température maximale et minimale de la surface extérieure de la paroi atteignent respectivement le 30,3 °C et 19,4 °C. Par ailleurs, les températures de la surface intérieure de la paroi, notamment sa valeur minimale, elle s'est fixée à 21,2 °C, tandis que la valeur maximale est de 27,7 °C.

L'ensemble de ces données simulées s'est révélé en bon accord avec les données de Lachheb et al. [10]. Toutes les courbes ont été fournies pour une période de 72 heures. On peut également constater une très bonne cohérence entre les résultats obtenus par les deux études. Les résultats obtenus montrent un écart intéressant en température entre les valeurs extrêmes (valeurs précédentes : minimales et maximales), il peut atteindre jusqu'à $T = 2.7$ °C. En ce qui concerne le flux de chaleur, l'écart est estimé à $Q = 11$ w/m². Les écarts enregistrés entre les valeurs de l'extérieur et l'intérieur sont dus donc à l'effet marquant du MCP.

Les résultats obtenus permettent alors de conclure que l'intégration des MCPs dans l'enveloppe de bâtiment est importante pour améliorer les performances thermiques effectives du bâtiment dans des conditions météorologiques où la température est

élevée. Ces matériaux intelligents permettent d'amortir les fluctuations des températures et des flux de chaleur, donc favorisent une meilleure stabilité de ces grandeurs physiques.

3.3.3. Résultats de caractérisation thermique & Autres géométries

Cavités d'air de sections carrée et cylindrique

Afin de mener à bien cette étude, et particulièrement consolider nos résultats, deux configurations vont être analysées dans cette partie (figure 3.6). Une section de cavité carrée à dimension interne fixe ($20 \times 20 \text{ mm}^2$) et une section de cavité cylindrique à dimension interne fixe ($D_{\text{int}} = 20 \text{ mm}$).

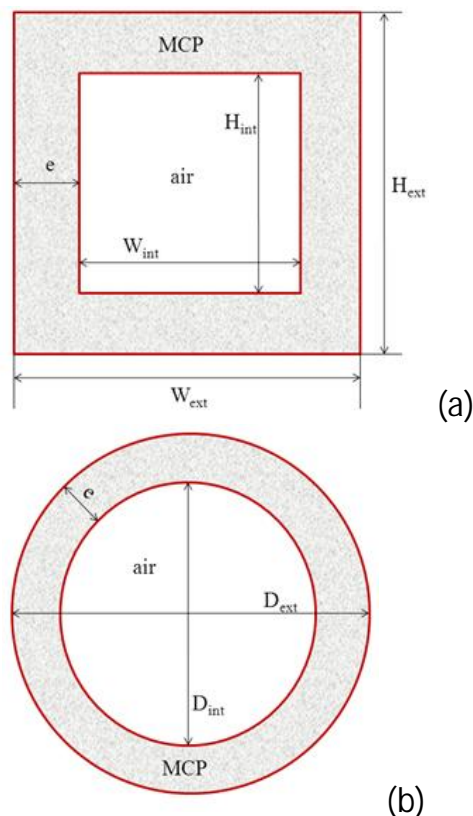


Figure 3.6: Configurations à étudier : (a) cavité de section carrée, (b) cavité de section cylindrique

Les surfaces extérieures des deux configurations sont supposées soumises à une variation de température extérieure sinusoïdale. L'objectif de cette section est d'évaluer l'effet de la configuration de la section de la cavité sur la variation de la température.

$$T_{a,ext} = 25 + 7 \sin(\omega t) \quad (3.9)$$

Où $\omega = 2\pi / \tau$, $\tau = 1440$ min,

Les conditions initiales : $T(x, 0) = T_0 = 20$ °C.

Les conditions aux limites à la surface externe :

$$-k_a \frac{\partial T}{\partial x} = h_{ext} (T_a - T_{w,ext}) \quad (3.10)$$

Où

$h_{ext} = 18,6$ W m⁻² K⁻¹, représente le coefficient de transfert de chaleur par convection avec l'extérieur.

L'influence de l'épaisseur des MCPs sur la variation de la température instantanée dans la cavité de section carrée est donnée par la figure 3.7-a.

En premier lieu, on remarque que le déphasage s'agrandit en élevant l'épaisseur du MCP, cet aspect est nettement plus clair pour les valeurs supérieures à 26 °C (température de fusion). Cette zone (au-delà des valeurs supérieures à la température de fusion "26 °C") se rétrécit de plus en plus en augmentant plus l'épaisseur du MCP. Le même phénomène s'est observé pour les valeurs inférieures à la température de fusion. Donc, systématiquement, il est légitime d'avoir un amortissement proportionnel par rapport à l'épaisseur du MCP. On a pu constater par la suite que la valeur maximale extrême peut diminuer par 2 °C, c'est-à-dire jusqu'à 28.85 °C si l'épaisseur est de 39mm.

La stabilisation de la température est maintenue pour une durée qui est en même temps relative et proportionnelle à l'épaisseur. Elle est en moyenne (durant les trois jours) 5h 31mn par journée pour une épaisseur de 30mm pour une tolérance de 0.2 °C. Ceci est expliqué par le fait que la période de stabilisation est retenue entre 25.8 °C et 26.2 °C. Il est à noter que cette durée dépend aussi de l'épaisseur, elle deviendra en moyenne 8h 30mn et 8h 50mn par journée pour des épaisseurs qui se sont fixées à respectivement 34mm et 39mm.

La figure 3.7-b indique en temps réel le comportement des températures obtenues en fonction de l'épaisseur du MCP relativement à une cavité de section cylindrique.

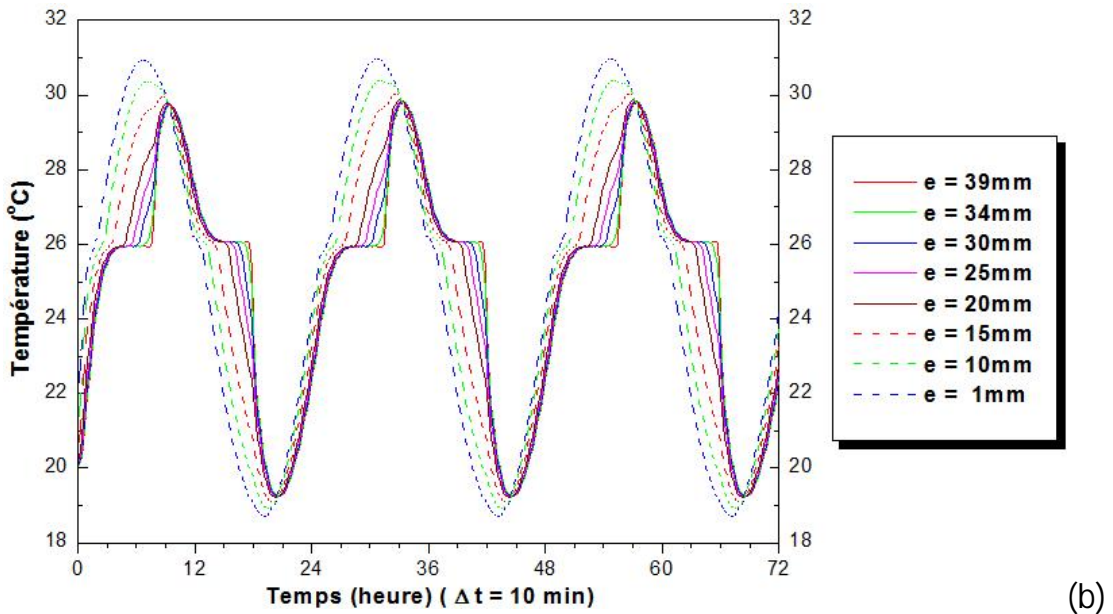
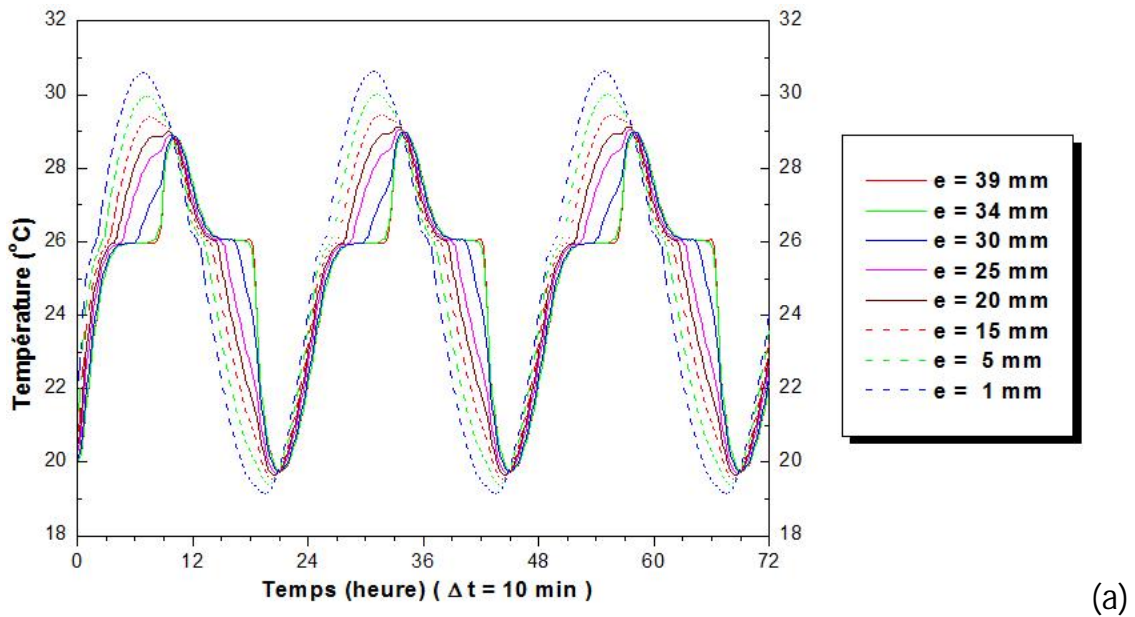


Figure 3.7: Evolution temporelle de la température pour différentes épaisseurs: (a) une cavité de section carrée, (b) une cavité de section cylindrique

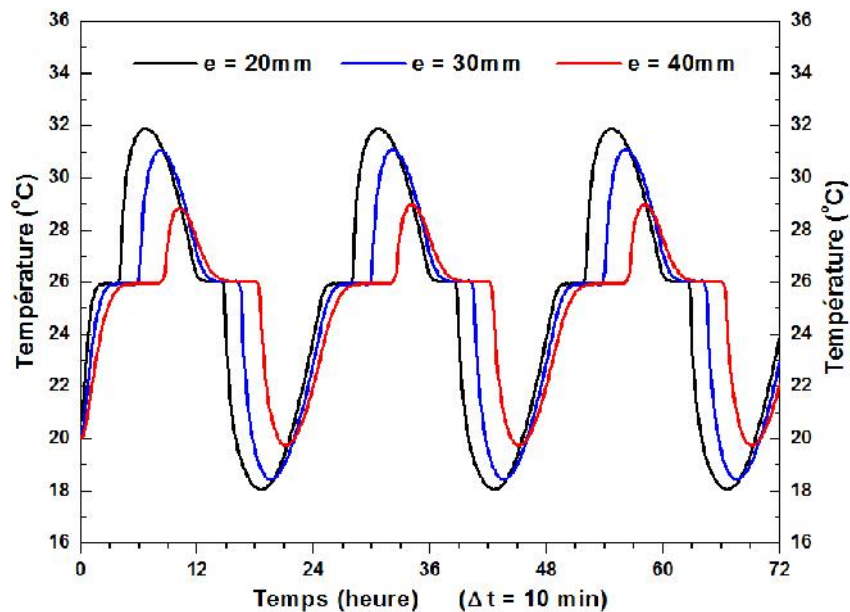
Pour ne pas répéter la rédaction des paragraphes, nous mettons à votre disposition un tableau récapitulatif qui résume quelques résultats qui semblent attrayants et indicatifs pour les deux géométries (tableau 3.3).

Nous tirons par l'intermédiaire de ce tableau que l'intégration du MCP dans une cavité de section carrée de la manière décrite auparavant est plus avantageuse par rapport à une cavité de section cylindrique. La première configuration favorise un meilleur amortissement des fluctuations en température.

Tableau 3.3 : Principaux indices et influence d'une couche additionnelle du MCP sur les températures des parois

Géométrie	L'épaisseur du MCP (mm)	L'écart et diminution en termes de valeur maximale (°C) par rapport à la température pour une épaisseur équivalente à 1 mm	Durée de stabilisation pour une tolérance de 0.2 °C
Cavité de section carrée	15	1.55	2h 17mn
	30	2.09	5h 50mn
	34	2.10	8h 21mn
	39	2.10	8h 44mn
Cavité de section cylindrique	15	1.00	2h 16mn
	30	1.21	5h 50mn
	34	1.22	7h 22mn
	39	1.22	7h 53mn

D'autre part, l'augmentation de l'épaisseur des MCPs a une influence significative sur le stockage d'énergie thermique. Ceci a été prouvé même en traçant la variation de la température au centre de la cavité d'air (figure 3.8). Pour ce faire trois épaisseurs ont été retenues puis testées pour confirmer ces prédictions (20mm 30mm et 40mm). L'analyse et le décryptage des résultats obtenus se résument sur le tableau 3.4.



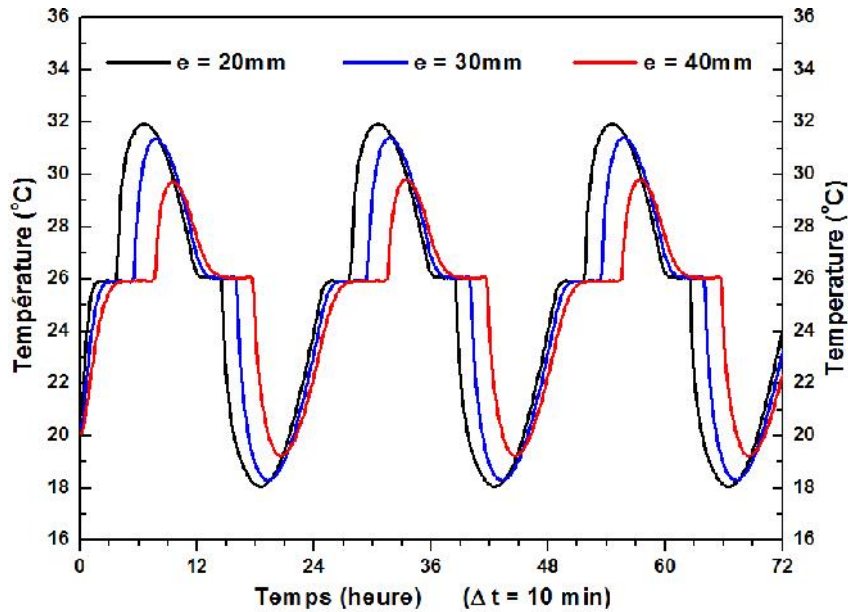


Figure 3.8: Evolution temporelle de la température au centre de la cavité d'air: (a) une cavité de section carrée, (b) une cavité de section cylindrique

Tableau 3.4 : Principaux indices et influence d'une couche additionnelle du MCP sur les températures au centre de la cavité d'air

Géométrie	L'épaisseur du MCP (mm)	L'écart (en termes de valeur maximale) en °C, par rapport à la température de fusion (26 °C)	Durée de stabilisation pour une tolérance de 0.2 °C	Déphasage des températures maximales par rapport au temps initial (t = 0 h)
Cavité de section carrée	20	5.90	4h 52mn	06h 40mn
	30	5.07	6h 53mn	8h 10mn
	40	2.85	8h 40mn	10h 40mn
Cavité de section cylindrique	20	5.92	4h 46mn	06h 30mn
	30	5.37	5h 10mn	07h 40mn
	40	3.72	7h 48mn	09h 30mn

Nous pouvons observer à chaque fois et à chaque cycle une diminution près de la température de fusion. De même, nous confirons par le calcul des températures au centre des cavités que l'intégration du MCP dans une paroi à cavité de section carrée est plus bénéfique par rapport à une cavité de section cylindrique. Elle favorise un meilleur amortissement des fluctuations en température, un fort déphasage et une plus grande stabilité des températures. C'est pourquoi, nous jugeons que ces résultats sont très importants pour envisager plusieurs applications thermiques. En

fait, le processus de fusion/solidification des MCPs est plus important pour maintenir les températures dans la plage de la température de fusion

Brique creuse à 10 cavités

En se basant sur le modèle mathématique proposé précédemment, on a pu évaluer les performances énergétiques d'une paroi en brique creuse. Les deux configurations des parois sont soumises à des conditions climatiques variables, les valeurs des coefficients de convection intérieur et extérieur se sont fixés à $8.7 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ et $18.6 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ respectivement. Il est important à signaler que certaines hypothèses n'affectent pas la fiabilité de notre modèle; notamment le principe de la méthode nodale et la direction du flux de chaleur.

Pour ce faire, nous considérons une brique creuse de dix cavités d'air, d'une largeur de $L_1 = 14.7\text{cm}$ et d'une hauteur de $H = 20\text{cm}$, et une briquette (de mêmes dimensions) en MCP, dont l'épaisseur est de $L_2 = 2\text{cm}$. Le système tout entier est considéré sans source de chaleur interne et en équilibre thermique à l'instant initial ($t = 0\text{s}$) à une température $T_0 = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$. Les conditions aux limites sont exprimées par :

$$T(0,t) = 25 + 7 \sin(\omega t) \quad T(L,t) = 24 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.11)$$

Les propriétés thermo-physiques des parois sont considérées constantes. Les données correspondantes sont illustrées sur la figure 3.9.

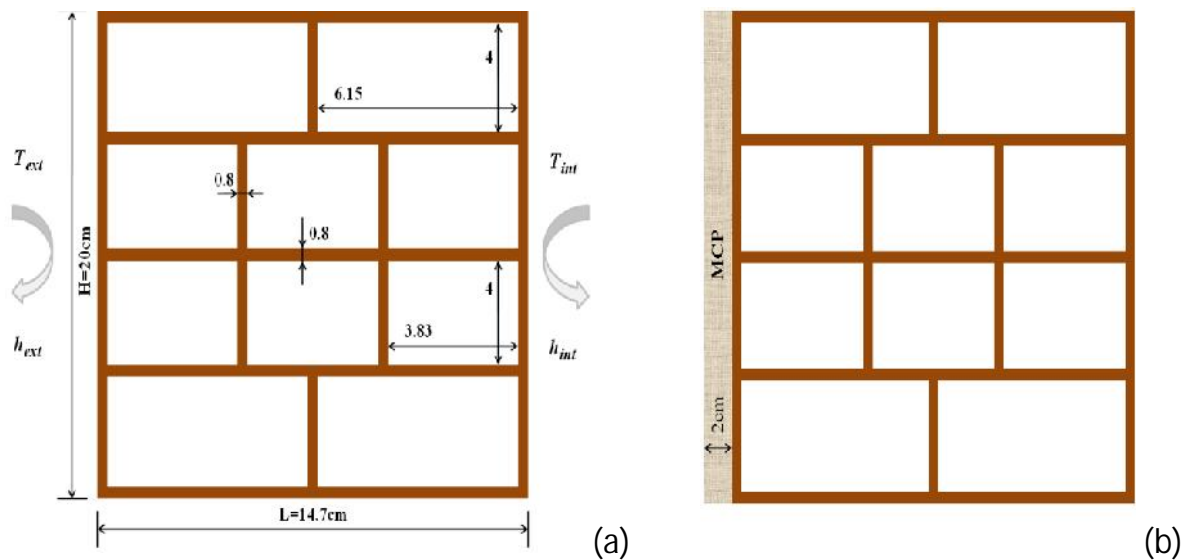


Figure 3.9 : Géométries des briques creuses, (a) : sans MCP, (b) : avec MCP

Nous nous intéressons dans cette étude à déterminer la température de la paroi et le scénario du transfert de chaleur au sein de la brique, en réalisant des simulations unidirectionnelles (1D) et bidimensionnelles (2D) pour les deux configurations.

La figure 3.10 montre en temps réel la variation de la température de la paroi. Les résultats obtenus montrent que la paroi en MCP détient une bonne inertie thermique, ceci est justifié par le profil de la température fortement amorti en raison du stockage thermique par chaleur latente. C'est une propriété thermique que peut l'assurer un matériau à changement de phase MCP. Le processus de fusion/solidification permet à la brique de posséder un fort déphasage permettant de faire entrer la fraîcheur la nuit dans le mur puis de la restituer la journée. L'inertie thermique d'une paroi est par définition sa capacité à stocker et à restituer une quantité d'énergie thermique, elle permet d'améliorer le confort thermique en été par l'amortissement de la variation des températures intérieures du bâtiment.

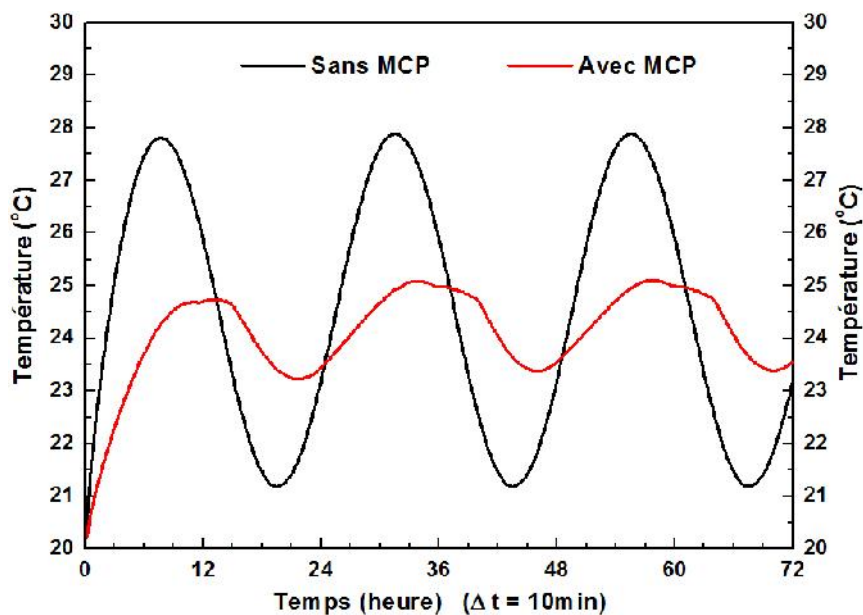
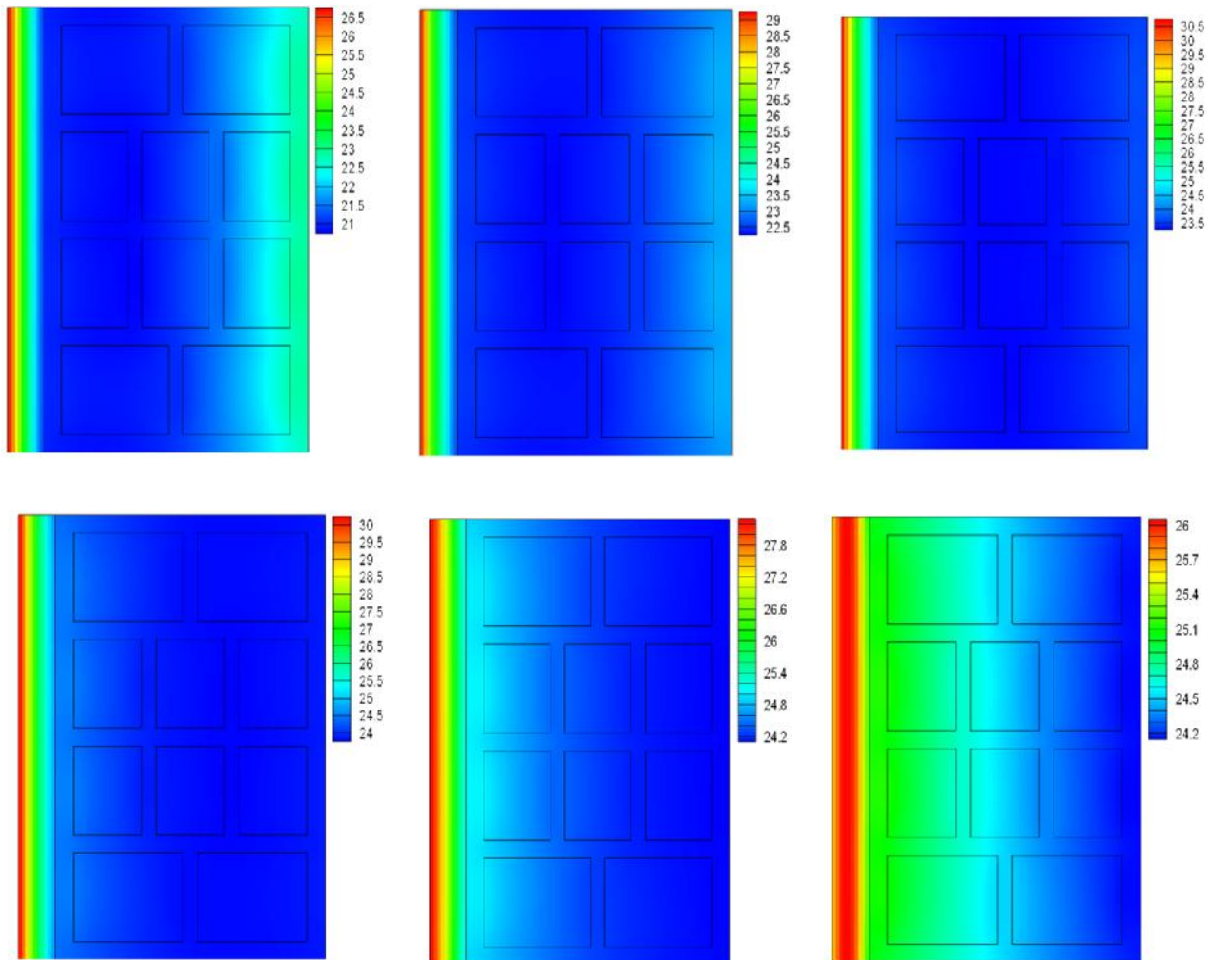


Figure 3.10 : Variation de température pour une période de trois jours

Le phénomène apparu, provenant du processus de fusion/solidification du MCP, deviné par la courbe rouge, justifie parfois l'importance d'utiliser ce type de matériaux au lieu d'utiliser certains matériaux d'isolation thermique de faible

épaisseur. L'écart de la température entre les valeurs extrêmes se réduit moyennement de 6.62 °C au 1.51 °C. En effet, il est connu que la brique creuse est plus isolante que la brique pleine, malheureusement un mur en briques creuses ne permet pas d'atteindre les performances thermiques exigées aujourd'hui. Une isolation complémentaire donc s'impose. La faible inertie de ce matériau ne permet pas d'avoir un bon niveau de confort en été.

Finalement, pour une meilleure compréhension du phénomène de transfert de chaleur, il est possible d'adresser une description générale des contours de température dans une brique creuse en MCP pendant 24 heures, chaque 2 heures et à travers sa section transversale (figure 3.11).



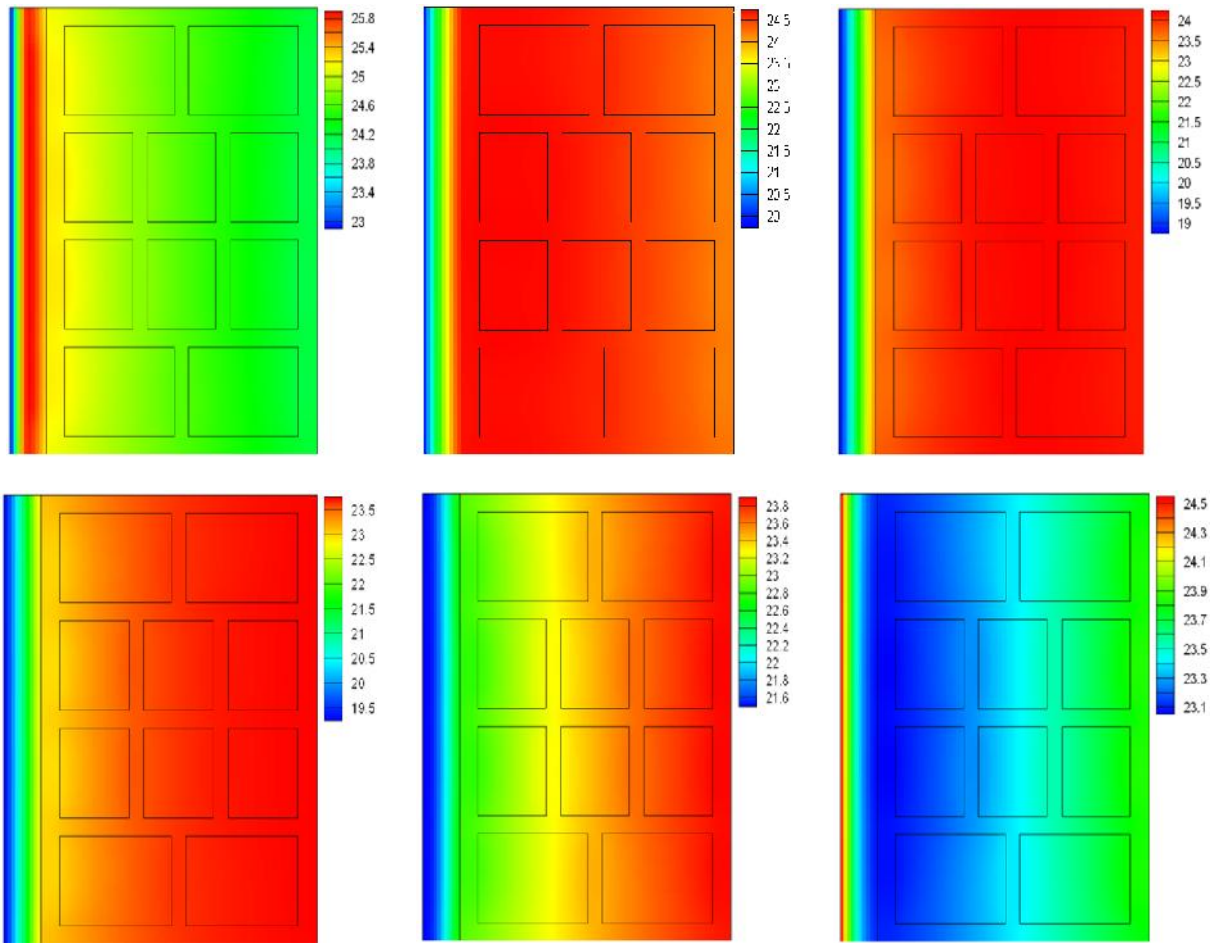


Figure 3.11 : Scénario et répartition des températures au sein d’une brique creuse en MCP pendant 24 heures et avec un pas de 2 heures

En faisant une analyse sur la variation de la température au cours de la journée, nous constatons que la paroi constituée du brique + MCP se caractérise par une bonne isolation thermique. Un écart de température très important entre l’extérieur et l’intérieur de la paroi peut se produire, et s’est enregistré. Nous pouvons aller jusqu’à un T_{\max} équivalent à 7 °C après juste 6 heures. Cet écart correspond à la température maximale de la journée ($T_{\max} = 32$ °C selon l’équation 3.10). Ainsi, l’écart minimal T_{\min} est enregistré après 24 heures, il s’est estimé à 1.4 °C. Ce mécanisme provoque une certaine fraîcheur en été qui devrait être maintenue durant toute la journée grâce à la forte inertie thermique.

3.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pu apporter une piste sur les matériaux à changement de phase dans le but de concevoir des bâtiments peu consommateurs

en énergie. Les MCPs peuvent devenir des matériaux idéaux aptes à stocker et conductibles à favoriser l'emmagasinage de la chaleur latente en vue d'assurer une ambiance confortable à l'intérieur de l'édifice.

Une étude comparative a été réalisée pour évaluer l'effet combiné de la géométrie de la section de la cavité et de l'épaisseur des MCPs des conteneurs. Le processus de fusion/solidification des MCPs semble efficace en raison de son influence sur la température de l'air confiné dans la cavité. A cet effet, l'application de conteneurs des MCPs dans le secteur du bâtiment permettra de maintenir la température de l'air intérieur dans la plage de la température de fusion et de réduire donc la consommation d'énergie.

Dans ces conditions, la simulation numérique a permis d'interpréter le phénomène de stockage/déstockage de la chaleur par l'utilisation des MCPs. Nous voulons montrer, à travers cette étude, que l'intégration des MCPs dans l'enveloppe de bâtiment, plus particulièrement sur la façade extérieure, améliore sensiblement l'inertie thermique. Cette technique provoque un amortissement des fluctuations de températures.

Références

1. A. Abhat, Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials, *Solar Energy*, 30(4), 1983, 313–331.
2. A. Shukla, D. Buddhi, R.L. Sawhney, Solar water heaters with phase change material thermal energy storage medium: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 (8),2009, 2119–2125.
3. F. Agyenim, N. Hewitt, P. Eames, M. Smyth, A review of materials heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2010, 615-628.
4. B. Zalba, J.M. Marin, L.F. Cabeza, H. Mehling, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, *Applied Thermal Engineering*, 23, 2003, 251-283.
5. A. Mills, M.M. Farid, J.R. Selman, S. Al-Hallaj, Thermal conductivity enhancement of phase change materials using a graphite matrix, *Applied Thermal Engineering*, 26 (14-15),2006, 1652-1661.

6. A. De Gracia, E. Oro, M.M. Farid, L.F. Cabeza, Thermal analysis of including phase change material in a domestic hot water cylinder, *Applied Thermal Engineering*, 31 (17-18), 2011, 3938-3945.
7. M. Kenisarin, K. Mahkamov, Solar energy storage using phase change materials, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 2007, 1913-1965.
8. A.V. Sá, M. Azenha, H. de Sousa, A. Samagaio, Thermal enhancement of plastering mortars with Phase Change Materials: Experimental and numerical approach, *Energy and Buildings*, 49, 2012, 16-27.
9. T. Silva, R. Vicente, N. Soares, V. Ferreira, Experimental testing and numerical modelling of masonry wall solution with PCM incorporation: A passive construction solution, *Energy and Buildings*, 49, 2012, 235-245.
10. M. Lachheb, Z. Younsi, H. Naji, M. Karkri, S. Ben Nasrallah, Thermal behavior of a hybrid PCM/plaster: A numerical and experimental investigation, *Applied Thermal Engineering*, 111, 2017, 49-59.
11. B. Zalba, J.M. Marin, L.F. Cabeza, H. Mehling, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, *Applied Thermal Engineering*, 23, 2003, 251-283.
12. A. Pasupathy, L. Athanasius, R. Velraj, R.V. Seeniraj, Experimental investigation and numerical simulation analysis on the thermal performance of a building roof incorporating phase change material (PCM) for thermal management, *Applied Thermal Engineering*, 28, 2008, 556-565.
13. D.B. Khillarkar, Z.X. Gong, A.S. Mujumdar, Melting of a phase change material inconcentric horizontal annuli of arbitrary cross-section, *Applied Thermal Engineering*, 20, 2000, 893-912.
14. N.R. Vyshak, G. Jilani, Numerical analysis of latent heat thermal energy storage system, *Energy Conversion and Management*, 48, 2007, 2161-2168.
15. Tutoriel fluent 6.3. <http://www.fluent.com>
16. I.Y. Choi, S.H. Cho, J.T. Kim, Energy consumption characteristics of high-rise apartment buildings according to building shape and mixed-use development. *Energy and Buildings* 46, 2012, 123-131.
17. J. Kočí, J. Maděra, R. Černý (2015), A fast computational approach for the determination of thermal properties of hollow bricks in energy-related calculations, *Energy* 83, 2015, 749-755.
18. G. Marcou, P. Jost, Cours de Statistique, Chapitre 1 & régressions linéaires, Université Louis Pasteur, Institut de Chimie, 4, Strasbourg, France, juillet 2011.

L'apport des matériaux à changement de phase MCPs sur les économies d'énergie et le confort d'hiver

L'apport des matériaux à changement de phase MCPs sur les économies d'énergie et le confort d'hiver

Une réhabilitation dite "thermique" du secteur de bâtiment résidentiel passe à la fois par l'amélioration du confort thermique et l'efficacité énergétique de l'édifice. Pour faire face, de nombreuses solutions soutenues par une intégration bien menée des énergies renouvelables s'imposent. Dans ce chapitre, notre choix s'est porté sur l'amélioration des performances thermiques de l'enveloppe. Pour ce faire, nous utilisons des parois (mur opaque) à forte isolation thermique en briques en ajoutant une couche d'un matériau à changement de phase MCP.

La simulation s'est achevée en utilisant un programme de calcul basé sur une méthode itérative qui permet de résoudre l'ensemble des équations différentielles d'un modèle mathématique basé sur les bilans des échanges thermiques appliqués à l'air et à son environnement intérieur.

Les principaux résultats ont montré que l'intégration des MCPs dans le toit et le mur nord est le meilleur choix pour maintenir une température plus confortable. De plus, les panneaux intérieurs en MCP ont permis de réduire la consommation d'énergie due aux besoins de chauffage.

4.1. Introduction

La réduction de la consommation d'énergie due au système de chauffage et climatisation du bâtiment devrait être obtenue en améliorant les performances thermiques de l'enveloppe du bâtiment. En fait, une bonne isolation peut réduire considérablement les pertes thermiques. Cependant, plusieurs travaux ont été effectués sur l'isolation des bâtiments. Ils ont également mis au point des techniques innovantes, parmi lesquelles l'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP). En effet, l'intégration du MCP dans l'enveloppe du bâtiment est un concept passif qui contribue à contrôler les températures de l'ambiance intérieure dans des limites acceptables.

De nombreuses études ont montré que la structure de l'enveloppe du bâtiment influe sur la consommation d'énergie [1-3]. Tsikaloudaki et al. [4] ont prouvé que les fenêtres sont responsables d'une part de déperditions thermiques, en particulier les matériaux de construction qui les constituent. Néanmoins, il est possible d'économiser jusqu'à 20% d'énergie en utilisant des toits de peinture blanche qui reflètent donc les rayonnements solaires [5]. Belegherras et al. [6] ont utilisé une nouvelle approche pour prévoir l'énergie solaire nécessaire à la production d'eau chaude en tenant compte du nombre d'occupants. Leurs travaux technico-économiques ont montré que l'isolation extérieure du toit a permis de réduire la consommation d'énergie jusqu'à 56,05%. Bekkouche et al. [7] ont rapporté des statistiques sur les dépenses énergétiques nécessaires pour le chauffage et la climatisation d'un appartement situé à Ghardaïa (Algérie) entre 2012 et 2014. Ils ont conclu que l'intégration de la conception architecturale passive et active joue un rôle significatif sur les performances thermiques des appartements des zones sahariennes. Toutefois, Bekkouche et al. [8] ont développé une autre approche appliquée au modèle de construction d'un bâtiment sous ce climat. En effet, ils ont montré que la température influe légèrement sur l'humidité lorsque la teneur en eau reste globalement constante.

En climats chauds et secs, une adaptation appropriée aux conditions environnementales nécessite une enveloppe de bâtiment à forte inertie thermique. Les conceptions traditionnelles [9-13] sont parfois des modèles de bâtiments efficaces pour l'adaptation à leur climat, combinant plusieurs techniques passives telles que l'énergie solaire et la ventilation naturelle [14-18]. L'utilisation des matériaux à changement de phase MCPs est une stratégie appropriée pour renforcer l'inertie thermique de l'enveloppe du bâtiment. Ils peuvent minimiser les fluctuations de la température intérieure avec un impact minimal sur la conception du bâtiment [19]. Hasnat et al. [20] ont effectué une étude numérique sur un bâtiment résidentiel situé à Melbourne (Australie). Ils ont signalé que l'intégration des MCPs dans la partie supérieure du bâtiment a réduit la température de l'air intérieur de 1,1 °C, ce qui a

permis de rétrécir la période d'inconfort thermique à 34%. De plus, Ling et al. [21] ont confirmé que l'utilisation des MCPs au lieu des matériaux de construction classiques (comme les briques) ont permis de renforcer plus l'inertie thermique des murs entourants. Ils ont également conclu que l'amélioration de l'isolation thermique du mur favorise une meilleure résistance thermique en intégrant aussi des MCPs. Dans le même contexte, Royon et al. [22] ont proposé une nouvelle conception des dalles creuses en introduisant des remplissages en MCPs afin d'améliorer le comportement thermique des bâtiments. Ils ont constaté que la température de la surface supérieure est réduite de 2 °C avec l'utilisation des MCPs au sol.

Finalement, en raison de la large variété des zones climatiques en Algérie, ce chapitre s'est concentré sur le climat de Ghardaïa qui se coïncide au climat aride et semi-aride. Le choix et la pose optimale du MCP s'inscrivent parmi les objectifs à entreprendre. La température de fusion peut contribuer de façon significative à contrôler la température et l'humidité de l'air intérieur. Dans ce chapitre, nous sommes intéressés à étudier l'effet de l'isolation et le stockage d'énergie sous forme de chaleur latente en utilisant des panneaux en MCPs sur le comportement thermique d'un studio. L'efficacité énergétique va être étudiée pour tester la pertinence de cette technique sous des conditions sahariennes compliquées. L'effet de l'épaisseur de la couche des MCPs sur l'économie d'énergie totale est également étudié. Le choix de la température de fusion des MCPs dans cette étude sera choisi dans un intervalle de température apparentant à la zone du confort.

4.2. Modèle mathématique

Pour simuler le transfert thermo-aéraulique, nous utilisons un programme de simulation basé sur le modèle proposé par Rumianowski [23] couplé avec un modèle proposé par Roux [24] qui s'est basé principalement sur les équations des bilans enthalpiques et massiques. La modélisation thermo-aéraulique permet de suivre les échanges thermiques et évaluer le confort thermique à l'intérieur du studio. Les paramètres principaux sont la température et l'humidité qui vont permettre

d'analyser le processus de stockage et déstockage de l'énergie dans les parois de l'enveloppe.

4.2.1. Les hypothèses

Le modèle proposé se base sur des hypothèses qui, globalement, n'influent pas sur les résultats obtenus. Les phénomènes des transferts thermo-aérauliques à l'intérieur de l'espace habitable vont être définis de telle sorte que :

- Le transfert de chaleur est supposé unidirectionnel et perpendiculaire aux parois (opaques et transparentes)
- L'air est considéré comme gaz transparent parfait
- Le transfert convectif de l'air est naturel
- Les propriétés thermo-physiques des matériaux de construction sont constantes et indépendantes des conditions météorologiques.
- La température de l'air à l'intérieur des zones est supposée uniforme (utilisation du principe de la méthode nodale)
- La voûte céleste est assimilée à un corps noir pour les radiations de grandes longueurs d'ondes.
- L'apport énergétique interne dû à l'occupant et/ou d'autres gains internes est négligeable

4.2.2. Bilan enthalpique

En supposant qu'une zone i est en contact avec $N+1$ autres zones, $N=0$ indique la zone extérieure. La variation d'enthalpie par unité de temps pour la zone i est donnée par l'équation suivante [8, 25-28] :

$$\frac{dH(i)}{dt} = \frac{dH^{\text{entr}}(i)}{dt} - \frac{dH^{\text{sort}}(i)}{dt} + Q_{ij} + P_L + P_S + CI_L + CI_S \quad (4.1)$$

$H^{\text{entr}}(i)$: Enthalpie de la masse d'air humide entrant dans la zone i (J),

$H^{\text{sort}}(i)$: Enthalpie de la masse d'air humide quittant le zone i (J),

P_S, P_L : Puissances sensibles et latentes fournies par la climatisation (W),

CI_s, CI_L : Puissances sensibles et latentes internes dues aux appareils, aux occupants, à l'éclairage...etc. (W). Selon les hypothèses, elles sont nulles.

$$H^{entr}(i) = \sum_{n=0}^N Q_{mas}^{trans}(n,i) (T_{air}(n) C_{mas} + r_s(n)) (L_v + C_v T_{air}(n)) \quad (4.2)$$

$Q_{mas}^{trans}(n,i)$: Débit massique de transition de l'air de la zone n à la zone i (kg/s),

$T_{air}(n)$: Température de l'air de la zone n = température de l'air entrant dans la zone i (K),

C_{mas} : Capacité calorifique de la masse d'air ($J Kg^{-1} K^{-1}$),

$r_s(n)$: Humidité spécifique ou teneur en eau de l'air de la zone n = humidité de l'air entrant dans la zone i : par définition la masse de vapeur d'eau contenue dans l'unité de masse d'air sec (kg_{vap}/kg_{mas} ou en %),

L_v : Chaleur latente de vaporisation de l'eau ($J Kg^{-1}$),

C_v : La capacité thermique à volume constant ($J Kg^{-1} K^{-1}$).

$$H^{sort}(i) = \sum_{n=0}^N Q_{mas}^{trans}(i,n) (T_{air}(i) C_{mas} + r_s(i)) (L_v + C_v T_{air}(i)) \quad (4.3)$$

$Q_{mas}^{trans}(i,n)$: Débit massique de transition de l'air de la zone i à la zone n (kg/s),

Q_{ij} : Expression des flux convectifs échangés entre les surfaces j de température $T_{s_{ij}}$ de la zone i et l'air de cette zone de température T_{air} (W).

$$Q_{ij} = \sum_{j=1}^{j=m} S_j h_{cij} (T_{air}(i) - T_{s_{ij}}(i)) \quad (4.4)$$

$T_{s_{ij}}(i)$: Température de surface j dans la zone i (K), elle peut être calculée en établissant le bilan thermique des murs.

S_j : Surface incluses dans la zone i (m^2),

m: Nombre total des surfaces intérieures (murs, portes et fenêtres) dans la zone i.

Les coefficients de transfert convectif utilisés dus aux échanges thermiques entre l'air ambiant et les parois intérieures sont donnés comme suit:

- **Pour une paroi verticale [8, 29]**

Si le régime d'écoulement est laminaire, c'est à dire $10^4 < Gr Pr < 10^9$

$$h_{Conv} = 1.42 (\Delta T/L)^{1/4} \quad (4.5)$$

En cas d'un régime turbulent : $Gr Pr > 10^9$,

$$h_{Conv} = 1.31 (\Delta T/L)^{1/3} \quad (4.6)$$

- **Pour une surface supérieure d'une plaque horizontale chaude ou une surface inférieure d'une plaque froide [8, 29]**

Si le régime d'écoulement est laminaire, c'est à dire $10^4 < Gr Pr < 10^9$

$$h_{Conv} = 1.32 (\Delta T/L)^{1/4} \quad (4.7)$$

En cas d'un régime turbulent : $Gr Pr > 10^9$,

$$h_{Conv} = 1.52 (\Delta T/L)^{1/3} \quad (4.8)$$

- **Pour une surface inférieure d'une plaque chaude ou une surface supérieure d'une plaque froide et pour les deux régimes d'écoulement [8, 29]**

$$h_{Conv} = 1.59 (\Delta T/L)^{1/4} \quad (4.9)$$

4.2.3. Bilan massique

En thermique du bâtiment, les variations de la masse d'air dm_{as}/dt représentent des quantités faibles, ce qui nous permet de simplifier l'équation de conservation de la masse d'air dans la zone i selon la relation suivante:

$$\sum_{n=0}^N Q_{mas}^{trans}(n, i) - Q_{mas}^{trans}(i, n) = \frac{dm_{as}}{dt} \approx 0 \Rightarrow \sum_{n=0}^N Q_{mas}^{trans}(n, i) = \sum_{n=0}^N Q_{mas}^{trans}(i, n) \quad (4.10)$$

La somme des débits massiques d'air sec entrant dans la zone i égale à la somme des débits sortant de la zone i. Cette équation permet de simplifier les bilans enthalpiques [24, 30]. L'équation du bilan enthalpique s'écrit par l'équation 4.11:

$$H(i) = H_{Sens}(i) + H_{Lat}(i) = m_{as} C_{as} T_{air}(i) + m_{as} r_s(i) (L_v + C_v T_{air}(i)) \quad (4.11)$$

Le terme $m_{as} r_s(i) C_v T_{air}(i)$ est très faible par rapport à la quantité $m_{as} r_s(i) L_v$, $L_v = 2500 \text{ kJ/kg}$ et $C_v = 1.96 \text{ kJ/kgK}$, ceci dit que les expressions des enthalpies sensible et latente vont être rapprochées par respectivement les équations 4.12 et 4.13:

$$H_{Sens}(i) \approx m_{as} C_{as} T_{air}(i) \quad (4.12)$$

$$H_{Lat}(i) \approx m_{as} r_s(i) L_v \quad (4.13)$$

4.2.4. Bilan sensible

Faisant suite à ces approches, la variation d'enthalpie peut donc être assimilée à une variation des températures [24, 30]:

$$\frac{dH_{Sens}(i)}{dt} = \frac{d(m_{as} C_{as} T_{air}(i))}{dt} = C_{as} \frac{dm_{as}}{dt} T_{air}(i) + C_{as} \frac{dT_{air}(i)}{dt} m_{as} \quad (4.14)$$

$$\frac{dH_{Sens}(i)}{dt} = \frac{dH_{Sens}^{entr}(i)}{dt} - \frac{dH_{Sens}^{sort}(i)}{dt} + Q_{ij} + P_S + CI_S \quad (4.15)$$

$$\rho_{as} C_{as} V(i) \frac{dT_{air}(i)}{dt} = \sum_{i=0}^N [Q_{mas}^{trans}(i, n) C_{as} (T_{air}(n) - T_{air}(i))] + Q_{ij} + P_S + CI_S \quad (4.16)$$

Les températures de l'air dans toutes les zones peuvent être déduites de l'équation 2.16. Les températures de surface T_{sij} peuvent être obtenues en établissant le bilan thermique des murs. Le système d'équations différentielles ordinaires obtenu sera en interaction directe avec le modèle de conduction décrit en détail dans la section 2.6.

4.2.5. Bilan latent

En négligeant le terme dm_{as}/dt , et à l'aide de l'équation de conservation simplifiée de la masse d'air sec, nous obtenons l'équation 4.17 suivante [24, 30]:

$$\frac{H_L(i)}{dt} = \frac{dH_L^{entr}(i)}{dt} - \frac{dH_L^{sort}(i)}{dt} + P_L + CI_L \quad (4.17)$$

Sachant que :

$$m_{as}(i) = \frac{V(i)}{v_s(i)} \quad (4.18)$$

$V(i)$: Volume de la zone i (m^3)

$v_s(i)$: Volume spécifique de l'air humide dans la zone i (m^3)

On peut par la suite avoir l'expression suivante :

$$\frac{dH_L(i)}{dt} = \frac{d(m_{as} r_s(i) L_v)}{dt} = L_v \frac{dm_{as}}{dt} r_s(i) + L_v \frac{dr_s(i)}{dt} m_{as} \quad (4.19)$$

En faisant une concordance entre les équations 2.1 et 2.19, nous obtenons l'équation suivante:

$$m_{as}(i) \frac{dr_s(i)}{dt} = \sum_{i=0}^N [Q_{mas}^{trans}(i, n) (r_s(n) - r_s(i))] + \frac{P_L}{L_v} + \frac{CI_L}{L_v} \quad (4.20)$$

Comme pour le bilan sensible, nous obtenons un système de N équations avec N inconnus, chaque équation représente les humidités spécifiques de l'air de chaque zone. Par ailleurs, il est à noter que la formule empirique de Nadeau et Puiggali [24, 30, 31] permettra de définir la relation entre l'humidité spécifique (la teneur en eau ou l'humidité absolue) et l'humidité relative:

$$r_s = \frac{0.622 P_{sat}(T) H_r}{101325 - P_{sat}(T) H_r} \quad (4.21)$$

H_r : Humidité relative (%)

P_{sat} : Pression de vapeur saturante (Pa)

4.2.6. Modèle de conduction

Le modèle proposé représente un système multicouche donnée par Rumianowski et al [28, 32] en 1989 et repris par Con et al en 2003. Il est souvent utilisé lorsque nous nous intéressons à la détermination de la température d'un nœud à l'intérieur d'un mur. La figure suivante est une illustration du principe de décomposition.

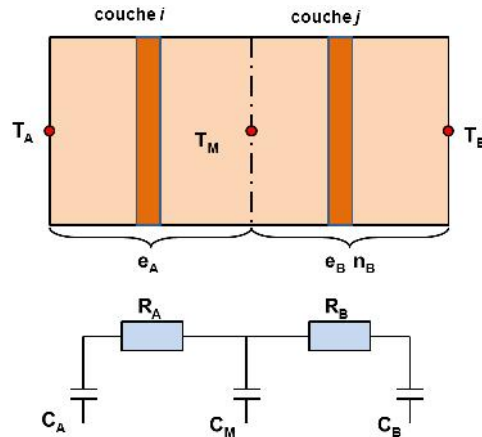


Figure 4.1 : Modèle de conduction pour une paroi opaque [32]

Les résistances équivalentes sont calculées par les formules suivantes [28, 32]:

$$R_A = \sum_{k=1}^{n_A} \frac{e_k}{\lambda_k S_k} \quad (4.22)$$

$$R_B = \sum_{k=n_A+1}^n \frac{e_k}{\lambda_k S_k} \quad (4.23)$$

$$n = n_A + n_B \quad (4.24)$$

e : Epaisseur (m)

n : Nombre de nœud

λ : Conductivité thermique ($W K^{-1} m^{-1}$)

Les capacités thermiques sont déterminées comme suit [28, 32]:

$$C_A = \sum_{k=1}^{n_A} \rho_i C_{p_i} e_i S_i (1 - \beta_i) \quad (4.25)$$

$$C_B = \sum_{j=n_A+1}^n \rho_j C_{p_j} e_j S_j \delta_j \quad (4.26)$$

$$C_M = \sum_{k=1}^{n_A} \rho_i C_{p_i} e_i S_i \beta_i + \sum_{j=n_A+1}^n \rho_j C_{p_j} e_j S_j (1 - \delta_j) \quad (4.27)$$

$$\beta_i = \frac{\frac{e_i}{2 \lambda_i S_i} + \sum_{k=1}^{i-1} \frac{e_k}{\lambda_k S_k}}{R_A} \quad (4.28)$$

$$\delta_j = \frac{\frac{e_j}{2 \lambda_j S_j} + \sum_{k=n_A+1}^{j-1} \frac{e_k}{\lambda_k S_k}}{R_B} \quad (4.29)$$

C_p : Chaleur spécifique ($J \text{ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)

ρ : Densité volumique (kg m^{-3})

Le bilan énergétique correspondant des murs est représenté par les équations suivantes [28, 32]:

$$C_A \frac{dT_A}{dt} = \frac{T_M - T_A}{R_A} + \sum S F_{\text{Surf-i}} \sigma (T_i^4 - T_A^4) + S h_{\text{conv}} (T_{\text{air}} - T_A) \quad (4.30)$$

$$C_B \frac{dT_B}{dt} = \alpha S G + \frac{T_M - T_B}{R_B} + \varepsilon S \frac{1 - \cos \beta}{2} (T_{\text{Sol_ext}}^4 - T_B^4) + \varepsilon S \frac{1 + \cos \beta}{2} (T_{\text{ciel}}^4 - T_B^4) + S h_{\text{cv_amb}} (T_{\text{amb}} - T_B) \quad (4.31)$$

$$C_M \frac{dT_M}{dt} = - \frac{T_M - T_A}{R_A} - \frac{T_M - T_B}{R_B} \quad (4.32)$$

σ : Constante de Stefan-Boltzmann égale à $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$,

G : Eclairement global incident sur les différentes surfaces en contact avec l'ambiance extérieure (W m^{-2}),

α : Coefficient d'absorption,

ε : Émissivité thermique,

$F_{\text{Surf-i}}$: Facteur de forme entre les surfaces d'échange à l'intérieur de la zone thermique,

h_{conv} : Coefficient de transfert convectif entre les surfaces d'échange et l'air ambiant à l'intérieur de la zone thermique ($\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$),

$h_{\text{cv-amb}}$: Coefficient de transfert convectif entre les surfaces d'échange et l'air ambiant à l'extérieur ($\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$).

Nous utilisons les formules définies ci-dessous pour déterminer la température du ciel (équation 4.33) et le coefficient de transfert convectif entre les surfaces d'échange et l'air ambiant à l'extérieur (équation 4.34) :

$$h_{cv-amb} = 2.8 + 3.3 V_{vent} \quad (4.33)$$

$$T_{Ciel} = 0.0552 T_{amb}^{1.5} \quad (4.34)$$

V_{vent} : Vitesse du vent ($m s^{-1}$)

T_{amb} : température de l'air ambiant extérieur (K)

4.3. Sollicitations climatiques extérieures

Pour effectuer cette étude, nous avons choisi les jours du 05 au 17 novembre 2016. Les données météorologiques représentées graphiquement ci-dessous concernent le climat de Ghardaïa.

La figure 4.2 représente la variation de la température ambiante mesurée au cours de ces journées. Les valeurs enregistrées varient entre 07 à 28 °C sous une forme qui se rapproche de la fonction périodique. Sa valeur maximale ($T_{max} = 28\text{ °C}$) s'est transcrite le 06 novembre, tandis que la température minimale ($T_{min} = 7\text{ °C}$) s'est observée le 09 novembre en cette période.

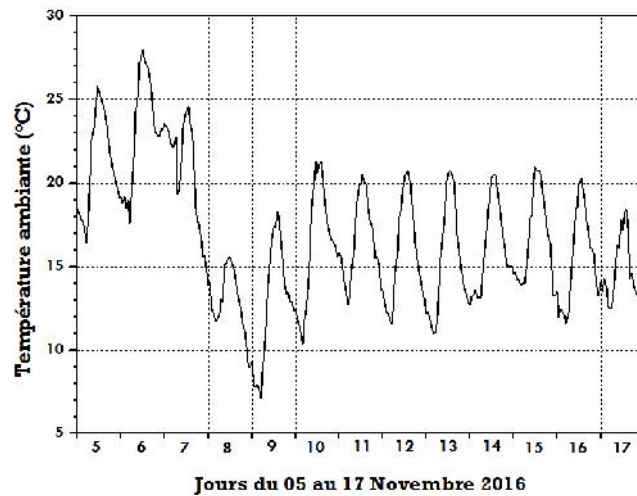


Figure 4.2 : Température ambiante, Ghardaïa les 05 - 17 novembre 2016

La variation de l'éclairement solaire incident sur un capteur horizontal est représentée sur la figure 4.3. Les valeurs sont variables d'un jour à l'autre, elles dépendent de l'état du ciel du jour en question (figure 4.4). Durant cette période, elles ont atteint un chiffre record qui se rapproche de 700 w/m^2 . Ces valeurs maximales concernent le 5 et le 9 novembre, ce qui indique que probablement le ciel

est clair durant ces journées. Cependant, le jour le moins intense est celui du 15 novembre, il correspond à un ciel qui subit des passages nuageux, la valeur de l'éclairement solaire maximal est approximativement 450 w/m^2 .

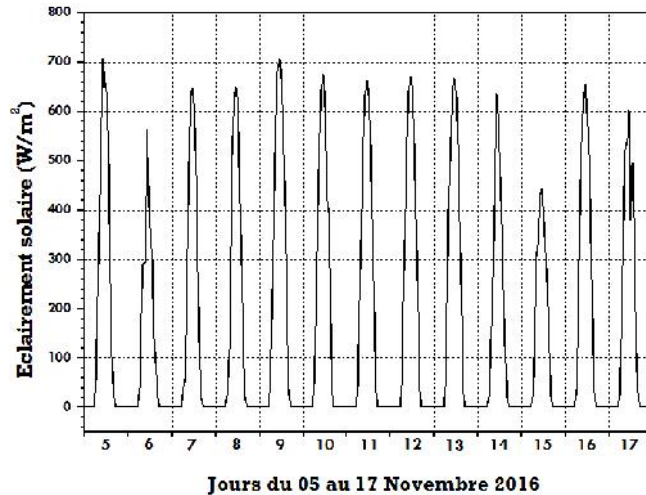


Figure 4.3 : Eclairement solaire horizontal, Ghardaïa les 05 - 17 novembre 2016

Pour avoir plus de détails et précisions, nous avons calculé les taux de couverture nuageuse relatifs à chaque journée. La méthode consiste à calculer tout d'abord l'irradiation journalière incidente sur un plan horizontale en utilisant le Modèle Perrin de Brichambaut. Le choix s'est fixé sur ce dernier en raison de sa fiabilité pour l'estimation des grandeurs (éclairement et irradiation solaires) mises en question. Nous avons déduit par la suite le taux de couverture nuageuse en se basant sur l'irradiation journalière mesurée incidente sur un plan horizontale. La figure 4.4 donne des informations importantes sur l'état du ciel durant cette période.

Les courbes tracées (figure 4.5) de l'humidité relative ont montré que dernière varie largement et, est comprise entre 22% et 83%.

La figure 4.6 montre que la vitesse du vent subit un comportement aléatoire, sa valeur varie entre 0 et 10 m/s. Il est à signaler qu'à l'exception de quelques heures, cette vitesse est globalement inférieure à 5 m/s.

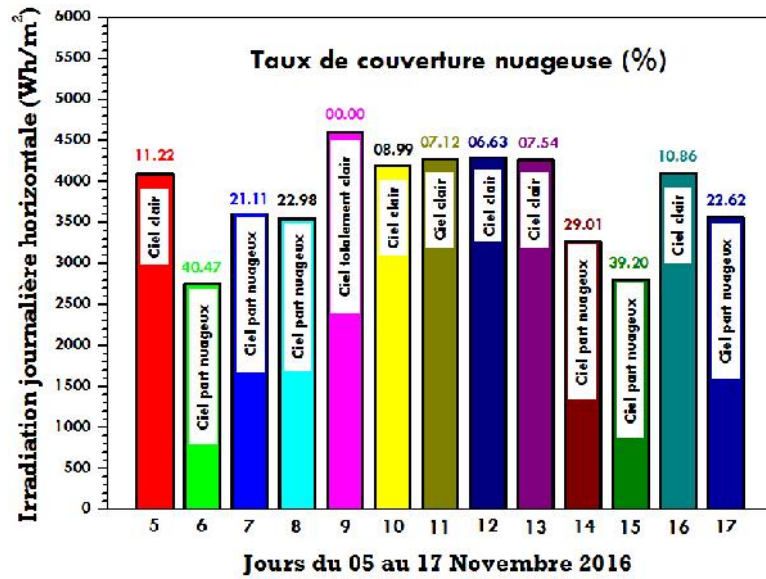


Figure 4.4 : Taux de couverture nuageuse et irradiation journalière mesurée incidente sur un plan horizontale, Ghardaïa les 05 - 17 novembre 2016

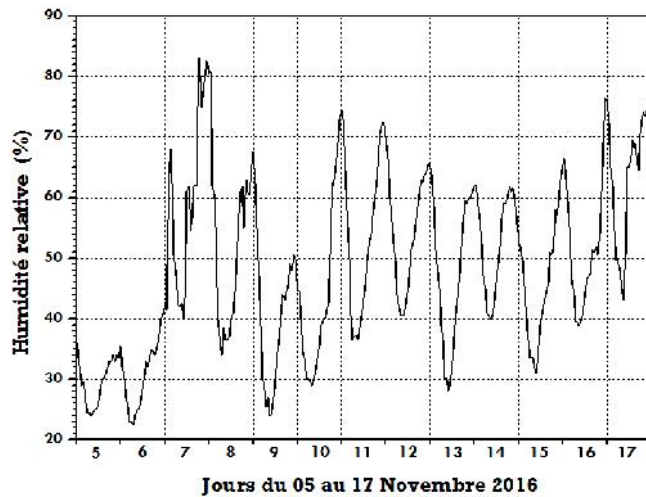


Figure 4.5 : Humidité relative, Ghardaïa les 05 - 17 novembre 2016

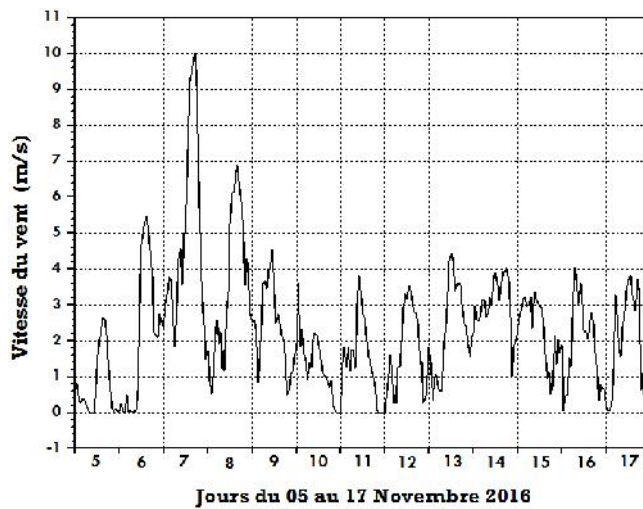


Figure 4.6 : Vitesse du vent, Ghardaïa les 05 - 17 novembre 2016

4.4. Cas de notre d'étude

Le choix s'est fixé sur un studio de surface totale de 43.56 m², la hauteur des murs sous plafond est de 3 m. Le plan descriptif est représenté par la figure 4.7. Ce studio est avec une terrasse plane, composé de :

- Un salon d'une surface totale de 7.75 m²
- Une cuisine d'une surface habitable de 4.90 m²
- Une salle de bains de 4.90 m²
- Un espace de dégagement relié à un hall d'une surface de 8.80 m²
- Une chambre d'une surface approximative de 7.75 m²

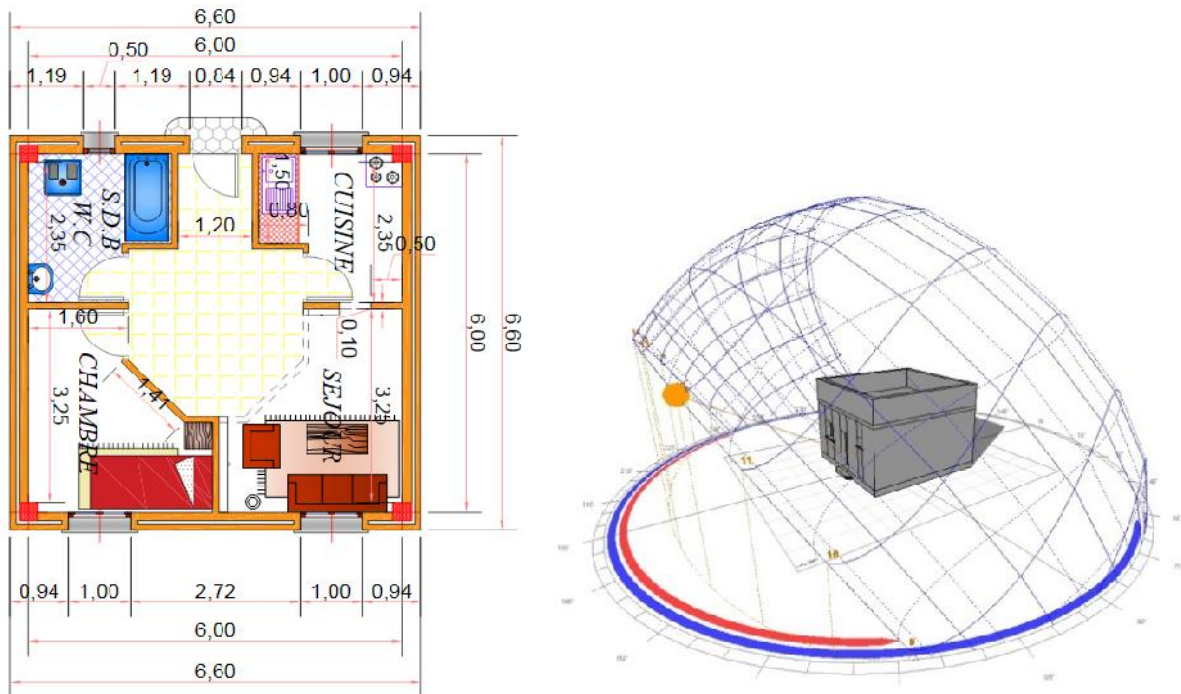


Figure 4.7 : Plans descriptifs du studio

Cette conception a été optimisée pour assurer un agencement judicieux, tirer profit des espaces communs et éviter les espaces résiduels. Ce studio est faiblement compact, ses propriétés thermo-physiques figurent sur le tableau 4.1. Les propriétés de tous éléments de construction sont en majorité communes pour la plupart des bâtiments respectant la vie contemporaine actuelle de cette région. Le coût est une considération vitale dans le choix des matériaux de construction, vu qu'ils sont

disponibles localement et durables; la pierre est le matériau de construction communément le plus utilisé.

Tableau 4.1 : Composition de la maçonnerie et propriétés des matériaux de construction

	Matériau de construction	Conductivité Thermique (W/m K)	Epaisseur de la Couche (m)	valeur de la transmission thermique U (W/m ² K)
Parois extérieures	Mortier de ciment	1.40	0.015	2.5306
	Pierre lourde	2.30	0.370	
	Mortier de ciment	1.40	0.015	
	Plâtre	0.35	0.015	
toits	Dalle de ciment	1.45	0.250	2.2936
	Dalle creuse	1.45	0.250	
	Mortier de ciment	1.40	0.015	
	Plâtre	0.35	0.015	
Rez de chaussée	Carrelage	6.14	0.025	2.1659
	Eboulis	1.40	0.040	
	Dalle	1.75	0.150	
	Sable sec	0.40	0.020	
	Film de Polyane	2.40	0.200	
	Pierres + graviers	2.40	0.200	
	Fenêtre simple vitrage			4.500
	Porte en bois, y compris le cadre			3.195

U : le coefficient de transmission thermique en surface par degré de différence entre l'intérieur et l'extérieur (W / m² K), il est calculé de l'équation suivante [7]:

$$U = \frac{1}{R_{se} + \sum_{i=1}^{i=n} R_i + R_{si}} \quad (4.35)$$

R_{si}: résistance thermique pour les échanges superficiels intérieurs (m² K / W).

R_i: résistance thermique des couches de construction (m² K / W).

R_{se}: résistance thermique pour les échanges superficiels extérieurs (m² K / W).

Pour des surfaces planes et en absence de toute information spécifique concernant les conditions aux limites, les valeurs finales des résistances superficielles sont données dans le tableau 4.2 ci-dessous :

Tableau 4.2: Valeurs de la résistance thermique pour les échanges superficiels.

	Flux thermique direct		
	Ascendant	Horizontal	Descendant
R_{si}	0.10	0.13	0.17
R_{se}	0.04	0.04	0.04

4.5. Simulation numérique : influence des MCPs sur les principaux paramètres du confort thermique

La simulation numérique est devenue un outil essentiel, il nous offre la possibilité de représenter des phénomènes physiques complexes, d'évaluer des alternatives, de recommander des modifications ... Le programme réalisé pour notre cas résout les équations numériquement en utilisant la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4. Cette méthode est couramment utilisée pour la résolution d'équations différentielles ordinaires. Sur le plan de l'analyse numérique, elle nécessite seulement la connaissance des valeurs initiales. Elle est donc très sollicitée de part leur facilité de mise en œuvre et leur précision.

Au début on s'est intéressé à l'étude de l'influence des MCPs sur le confort thermique du studio. Notre étude est basée sur l'analyse de la variation des températures pour les différents cas étudiés. Pour faire face, une simulation numérique est effectuée pour déterminer les profils de température sur les façades intérieure et extérieure des murs. On intègre sur les surfaces intérieures des murs sud, nord, est, ouest et le toit un panneau MCP d'une épaisseur de 10 mm. Nous dériverons ensuite une étude comparative avec un studio conventionnel. Les caractéristiques des MCP utilisés sont les suivantes:

$$\lambda = \begin{cases} 0.22 & \text{si } T \leq 22.6 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 0.18 & \text{si } T > 22.6 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4.36)$$

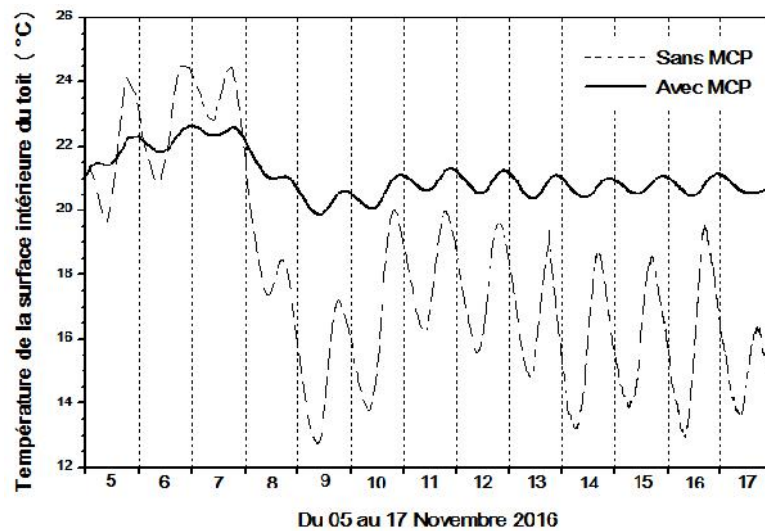
$$C_p = \begin{cases} 4250 + 10750 e^{-\frac{(22.6-T)^2}{16}} & \text{si } T \leq 22.6 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 4250 + 10750 e^{-\frac{(22.6-T)^2}{9}} & \text{si } T > 22.6 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4.37)$$

: conductivité thermique des MCP ($\text{W K}^{-1} \text{m}^{-1}$)

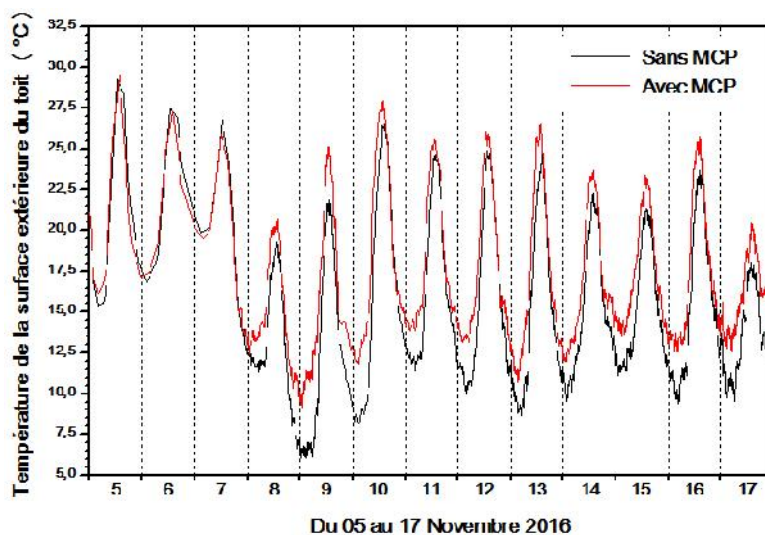
C_p : capacité calorifique des MCP ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$)

Cependant, l'effet de l'emplacement du MCP sur la température des murs est testé pour différents endroits dans l'enveloppe du studio. A chaque fois, nous proviendrons une étude comparative avec un studio normal pour voir l'influence de ce matériau sur les fluctuations des températures de l'air intérieur.

En faisant varier l'emplacement du MCP, il est possible de prévoir les valeurs correspondantes des températures de l'air, l'humidité relative et sur les deux faces des parois opaques interne et externe. Les courbes tracées ci-dessous sur les figures 4.8 - 4.12 montrent les différents profils de température.

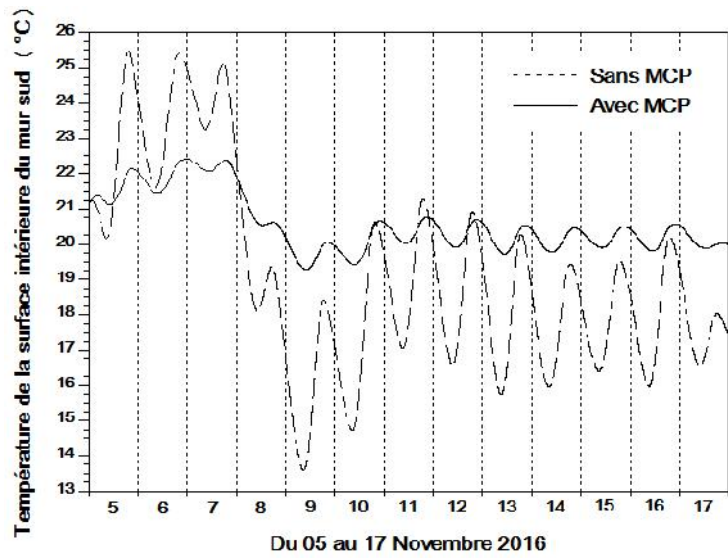


(a)

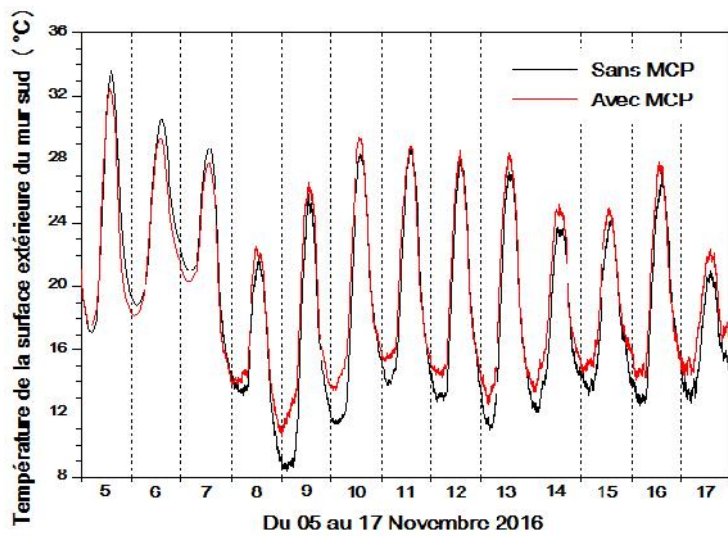


(b)

Figure 4.8 : Températures sur les faces intérieure (a) et extérieure (b) du toit

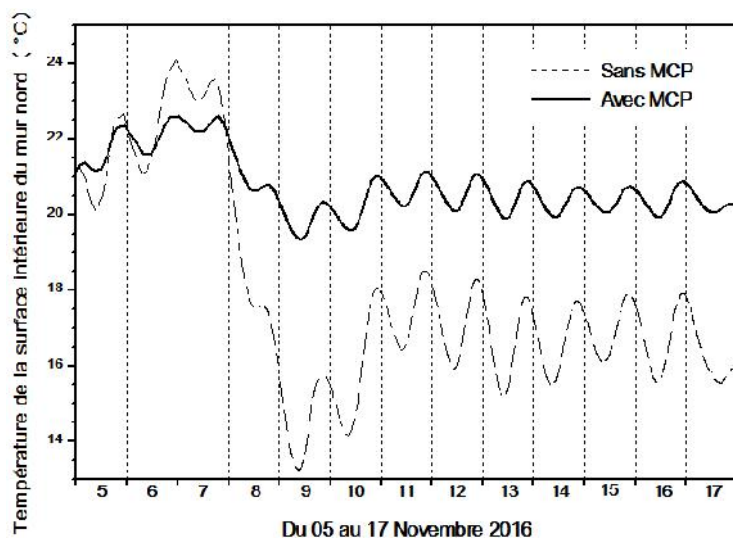


(a)



(b)

Figure 4.9 : Températures sur les faces intérieure (a) et extérieure (b) du mur sud



(a)

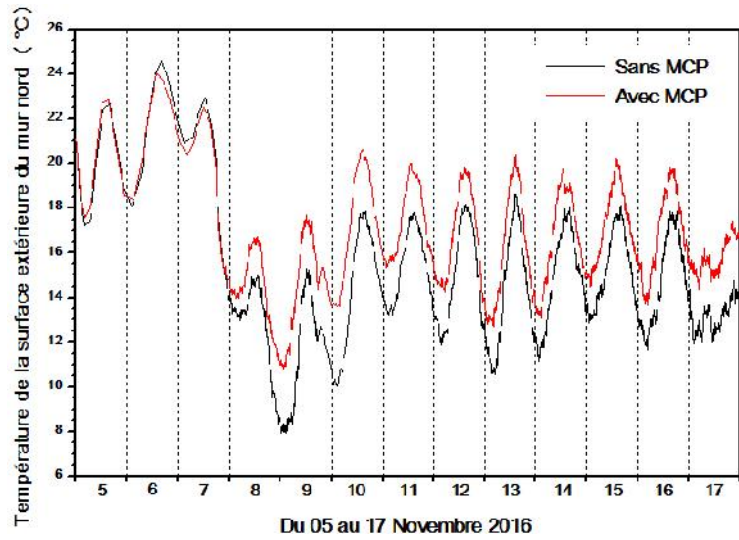


Figure 4.10 : Températures sur les faces intérieure (a) et extérieure (b) du mur nord

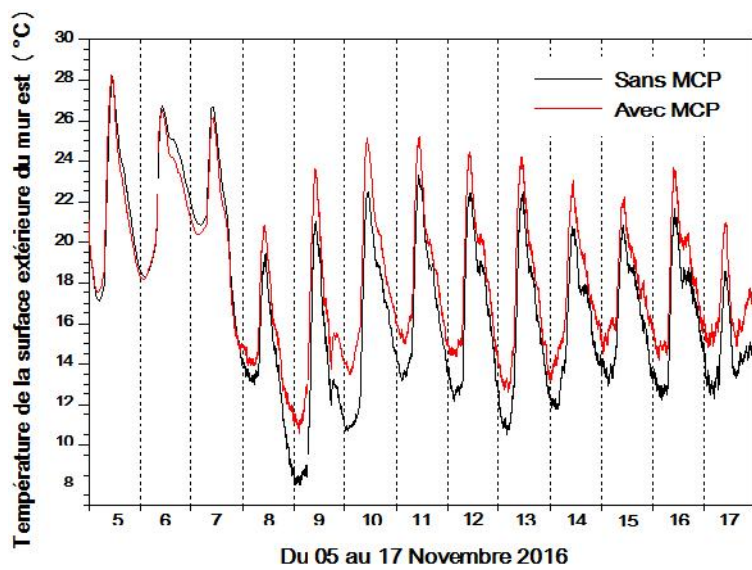
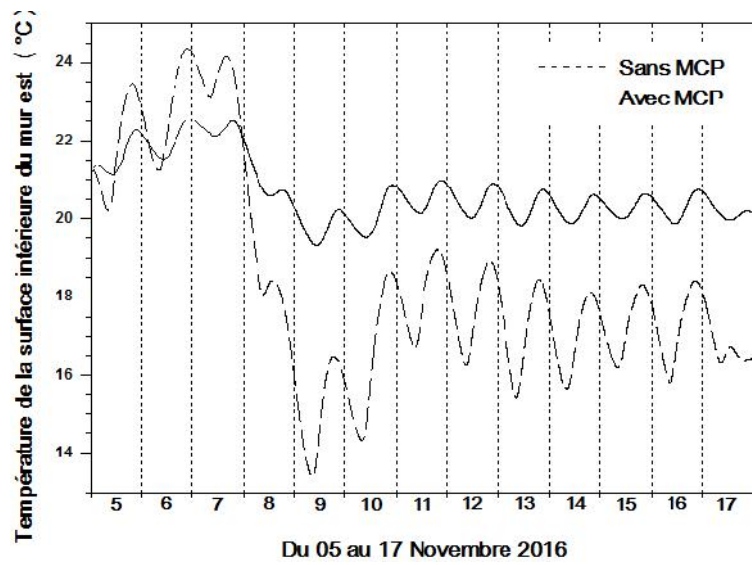


Figure 4.11 : Températures sur les faces intérieure (a) et extérieure (b) du mur est

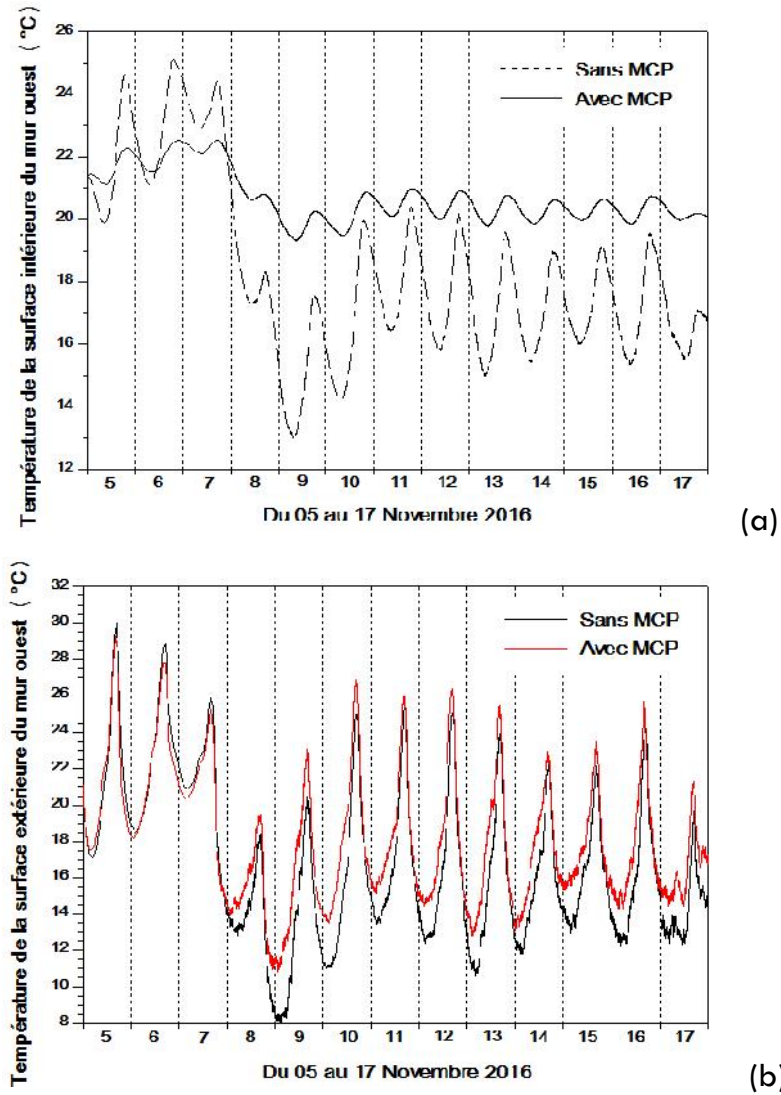


Figure 4.12 : Températures sur les faces intérieure (a) et extérieure (b) du mur ouest

Selon les résultats trouvés, les températures des parois intérieures "sans exception" ont considérablement diminué juste à la fin du 7 novembre. Faisant suite à ces remarques, cette période s'est considérée donc comme période de transition. D'ailleurs, nous avons pu confirmer l'utilité de ce type de matériau vu que les températures des parois passent par la température de la fusion de ce MCP. Ceci dit que pour assurer un bon fonctionnement de ce matériau, il faut l'intégrer dans un milieu qui se caractérise par une température proche de la température de la fusion 22.6 °C. Le phénomène du changement d'état dans ces conditions est éminent en force, ceci assure un transfert thermique par chaleur latente qui engendre un stockage et/ou déstockage de l'énergie.

En effet, il est clair que l'intégration du MCP dans ce cas assure une grande stabilité des températures obtenues. L'amortissement des températures est très intéressant, les fluctuations sont autour de 1 °C. Le niveau d'isolation acquis des parois est aussi important. Le matériau joue en quelque sorte une barrière thermique face aux conditions climatiques extérieures, c'est pour cette raison que les profils des températures sur les faces extérieures des parois donnent des valeurs supérieures à celles du premier cas (sans MCP). Cet aspect est notamment enregistré qu'après le 7 novembre, ceci veut dire qu'on aura ces résultats lorsque le matériau MCP est opérationnel (au cours d'une phase du changement d'état).

Sur la base des écarts obtenus entre les valeurs extrêmes des températures des surfaces intérieures, on a pu constater que l'intégration judicieuse (le phénomène de fusion/solidification doit être lieu) des matériaux à changement de phase MCP peut conduire à une meilleure isolation thermique, générant ainsi un amortissement important des fluctuations des températures intérieures. Dans ces types de situations, les matériaux lourds, tels que les pierres, échangent de l'énergie par "chaleur sensible": ils se refroidissent graduellement. Par ailleurs, la présence d'un MCP provoque un échange de chaleur important dû au stockage latent du flux de chaleur. Cette dernière sera absorbée puis stockée lorsque la température environnementale se rapproche de la température de la fusion du matériau (22.6 °C). Par conséquent, il peut être considéré comme régulateur thermique. Ainsi, il améliore l'inertie thermique de l'édifice.

En effet, notre deuxième démarche consiste à déterminer l'emplacement optimal du panneau MCP sur les surfaces intérieures des murs composites. Cette étude est principalement basée sur la variation de la température de l'air intérieur. Les figures 4.13 - 4.14 nous donnent le comportement instantané des principaux paramètres de confort (température et humidité relative de l'air) couvrant ainsi toutes les situations possibles. Cette phase nous a permis de déduire la meilleure configuration en fixant la teneur en humidité de l'air intérieur à $3 \cdot 10^{-3} \text{ Kg}_{\text{eau}} / \text{Kg}_{\text{air sec}}$.

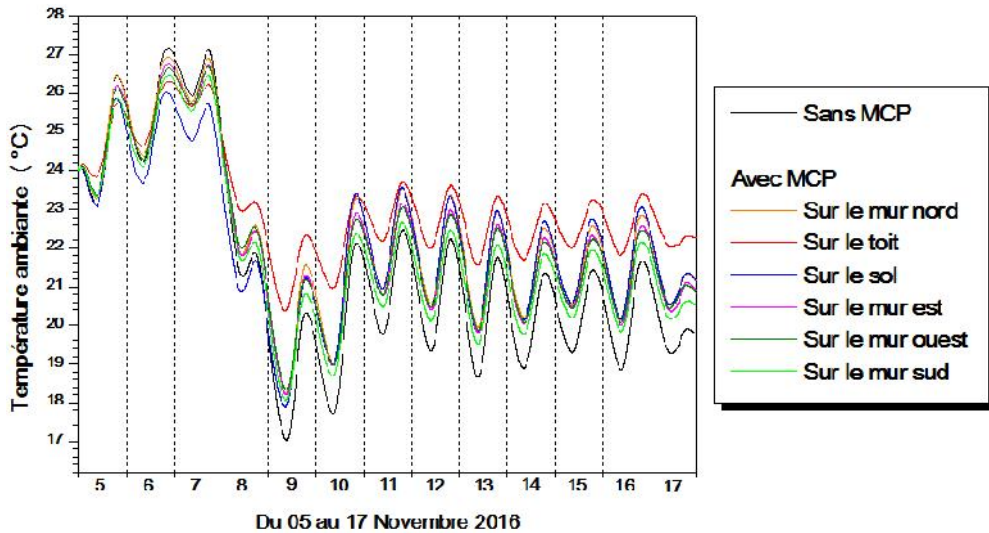


Figure 4.13 : Température de l'air pour une teneur en eau fixée à $3 \cdot 10^{-3} \text{ Kg}_{\text{eau}}/\text{Kg}_{\text{air-sec}}$

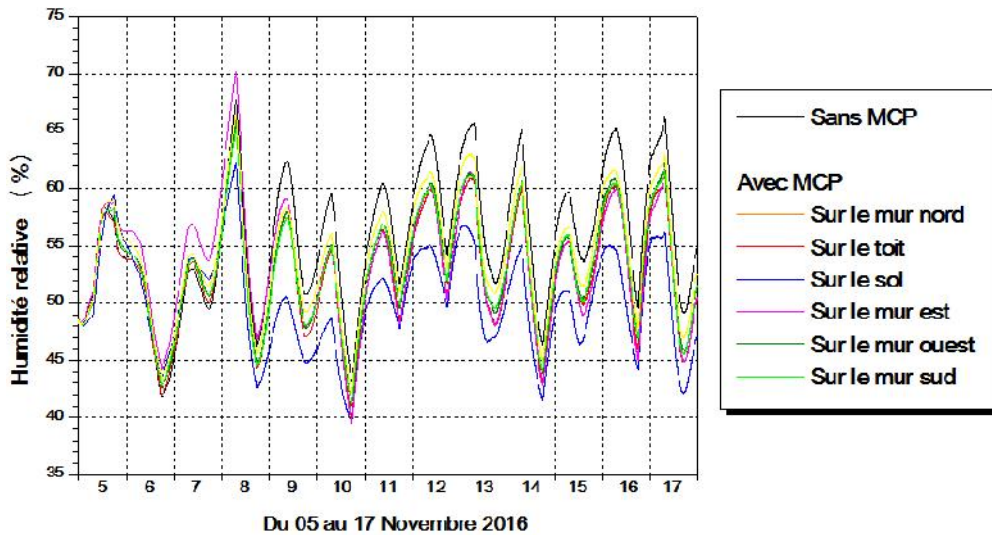


Figure 4.14 : Humidité relative de l'air pour une teneur en eau fixée à $3 \cdot 10^{-3} \text{ Kg}_{\text{eau}}/\text{Kg}_{\text{air-sec}}$

Les résultats indiquent que l'intégration du MCP sur la surface intérieure du toit apporte le meilleur compromis du confort. L'analyse et la décortication des courbes montrent qu'une diminution de 10% s'est enregistrée pour l'humidité relative de l'air si le matériau est incorporé sur le toit. Pour les autres cas, le taux de diminution est globalement estimé à 5%. Il est à noter aussi que la température est inversement proportionnelle par rapport à l'humidité relative vu que la teneur en eau de l'air est fixe.

Le stockage de l'énergie thermique due au rayonnement solaire s'effectue pendant la journée sous forme de chaleur latente. Le processus repose sur des

microcapsules sphériques qui changent facilement de phase sur l'ensemble de leur volume. Ces MCPs ont une conductivité thermique moyenne de 0,2 W/mK pour notre exemple, ce qui provoque un certain transfert thermique. En effet, si on intègre ce matériau sur les surfaces intérieures des deux parois (toit et mur nord), on obtient plus de performance en termes de confort. L'isolation cette fois-ci aura une influence plus significative sur la température et l'humidité de l'air intérieur (figure 4.15).

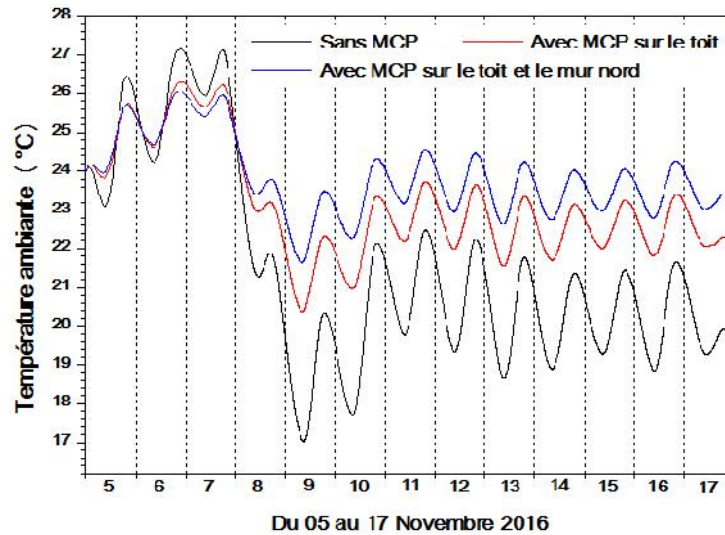


Figure 4.15 : Température de l'air pour une teneur en eau fixée à $3 \cdot 10^{-3} \text{ Kg}_{\text{eau}}/\text{Kg}_{\text{air-sec}}$

Si nous voulons faire une projection détaillée des résultats obtenus, et pour avoir plus de détails et précisions, nous pouvons mettre un tableau exhaustif qui englobant les paramètres suivants:

- $T_{\text{sim-moy}}$: températures moyennes simulées de l'air intérieur.
- $T_{\text{Conf}} - T_{\text{sim-moy}}$: écarts moyens journaliers entre la température du confort de T_{Conf} et la température moyenne résultante du jour $T_{\text{sim-moy}}$ par simulation.
- $T_{\text{sim-moy}}$: l'amortissement en température entre les valeurs maximales et minimales des températures moyennes simulées $T_{\text{sim-moy}}$.
- $\Delta(T_{\text{Conf}} - T_{\text{sim-moy}})$: écart en températures en intégrant un panneau en MCP de 1 cm d'épaisseur, et ceci entre les écarts moyens journaliers enregistrées en degrés Celsius par rapport à la température de confort.
- $\Delta(\Delta T_{\text{sim-moy}})$: réduction de l'amortissement en température par cette technique.

Pour ce faire, nous considérons les températures mentionnées ci-dessous T_{Conf} comme températures du confort.

- $T_{\text{Conf}} = 22.5 \text{ °C}$ pour les mois de décembre, novembre, janvier, février et mars.
- $T_{\text{Conf}} = 24 \text{ °C}$ pour les mois d'octobre et avril.
- $T_{\text{Conf}} = 25.5 \text{ °C}$ pour les mois de juin, mai, juillet, août et septembre.

Le tableau 4.4 représente le gain économisé en température et en amortissement grâce à l'intégration d'un mur en PCM avec un toit de 1cm d'épaisseur.

Tableau 4.3: Gain économisé en température et en amortissement par l'intégration d'un MCP de 1 cm d'épaisseur en surface intérieure du toit

Jours		05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17
Sans MCP	$T_{\text{sim_moy}}$	24.50	25.53	26.37	21.75	18.42	19.83	21.21	20.93	20.21	20.16	20.35	20.31	19.93
	$T_{\text{Conf}} - T_{\text{sim_moy}}$	-2.00	-3.03	-3.87	0.75	4.08	2.67	1.29	1.57	2.29	2.34	2.15	2.19	2.57
	$\Delta T_{\text{sim_moy}}$	3.35	2.93	2.14	5.32	3.30	4.42	2.70	2.91	3.12	2.46	2.15	2.82	1.97
Toit avec MCP	$T_{\text{sim_moy}}$	24.51	25.36	25.82	23.18	21.23	22.10	22.97	22.86	22.47	22.44	22.61	22.63	22.39
	$T_{\text{Conf}} - T_{\text{sim_moy}}$	-2.01	-2.86	-3.32	-0.68	1.27	0.40	-0.47	-0.36	0.03	0.06	-0.11	-0.13	0.11
	$\Delta T_{\text{sim_moy}}$	1.92	1.67	1.20	3.12	1.95	2.39	1.56	1.63	1.78	1.46	1.28	1.58	1.11
		Confort satisfaisant pour les 2 cas				Amélioration du confort par l'intégration des MCP								
$\Delta(T_{\text{Conf}} - T_{\text{sim_moy}})$		-0.01	0.17	0.55	0.07	2.81	2.27	1.76	1.93	2.26	2.28	2.26	2.32	2.46
$\Delta(\Delta T_{\text{sim_moy}})$		1.43	1.26	0.94	2.20	1.35	2.03	1.14	1.28	1.34	1.00	0.87	1.24	0.86

Dans le cas du studio non isolé, les écarts moyens journaliers ($T_{\text{Conf}} - T_{\text{sim-moy}}$) sont compris entre -3.87 °C et 4.08 °C , tandis que la température moyenne de l'air varie entre 19.83 °C et 26.37 °C . Ce large intervalle est certainement causé par les fortes fluctuations climatiques extérieures.

Pour un studio avec un panneau MCP en toiture, les valeurs de ($T_{\text{Conf}} - T_{\text{sim-moy}}$) ont diminué et elles sont comprises entre -0.47 °C et 1.27 °C pour la période qui s'étend du 08 au 17 novembre. Par contre, cet écart est assez important pour les journées du 05 au 07 novembre pour les deux cas (sans et avec MCP). La température de l'air ambiant intérieur est suffisamment éloignée de la température de fusion. Il convient de noter que le confort pendant ces jours est satisfaisant. Le jour 08 semblait une phase de transition. Nous pourrions ainsi apporter plus de confort thermique à l'occupant en intégrant dans le toit un panneau MCP de 1cm.

Le tableau 4.4 donne une fiche détaillée qui apporte les informations nécessaires sur tous les types d'intégration en termes d'économies de température en degrés Celsius, de coûts et d'amortissement. Le coût unitaire imposé du MCP est de 1647 \$/m³.

Tableau 4.4: Coût du MCP et gain bénéficié en température et en amortissement

	Type d'intégration	Prix (\$)	Jours de tests								
			09	10	11	12	13	14	15	16	17
$\Delta(T_{\text{Conf}} - T_{\text{sim_moy}})$	Toit	717.4332	2.7697	2.2926	1.8277	1.9783	2.2241	2.3024	2.2959	2.2937	2.4595
	Sol		0.7053	1.3470	1.2066	1.1159	1.1583	1.2858	1.3021	1.3371	1.2998
	Sud	326.1060	0.8339	0.7511	0.5245	0.5227	0.6184	0.7277	0.7110	0.7080	0.7607
	Nord		1.2105	1.3921	1.2038	1.1592	1.2478	1.2522	1.2186	1.2233	1.3020
	Est		1.0974	1.0781	0.9189	0.9206	1.0097	1.0598	1.0218	1.0142	1.1104
	Ouest		1.1633	1.0820	0.9082	0.9176	1.0145	1.0584	0.9950	1.0219	1.1188
	Toit+Sud		3.5583	2.8276	2.1225	2.2826	2.6714	2.7954	2.7715	2.7411	2.9417
	Toit+Nord	3.8950	3.4210	2.7269	2.8568	3.2006	3.2570	3.1727	3.2127	3.4176	
	Toit+ Est	3.7713	3.1795	2.4721	2.6306	2.9920	3.0771	3.0248	3.0214	3.2616	
	Toit+Ouest	3.8498	3.1447	2.4682	2.6260	3.0140	3.0681	2.9958	3.0201	3.2725	
	Sud+Sol	1.3894	1.7028	1.3639	1.3240	1.4883	1.6673	1.6859	1.6422	1.6875	
	Nord+Sol	1.6295	2.1083	1.7734	1.7121	1.8238	1.9637	1.9283	1.9865	2.0231	
	Est+Sol	1.5290	1.9630	1.6143	1.5389	1.7152	1.8492	1.8266	1.8314	1.9202	
	Ouest+Sol	1.5741	1.9126	1.6148	1.5796	1.7347	1.8141	1.8229	1.8434	1.9289	
	Toit+ Sol	1434.8664	2.9295	2.7793	2.1264	2.1968	2.5263	2.6458	2.6223	2.6279	2.7977
	Sud+Nord	652.2120	1.9944	1.9902	1.5737	1.5701	1.7654	1.8542	1.8040	1.8072	1.8851
	Sud+Est		1.8741	1.7384	1.3009	1.3318	1.5433	1.6453	1.6280	1.5976	1.7056
	Sud+Ouest		1.9431	1.7123	1.2756	1.3156	1.5583	1.6520	1.6053	1.5990	1.7296
	Nord+Est		2.2378	2.3417	1.9328	1.9337	2.1061	2.1475	2.0498	2.0890	2.1812
	Nord+Ouest		2.3089	2.3169	1.9534	1.9449	2.1145	2.1260	2.0375	2.0839	2.2384
Est+Ouest	2.1994		2.0633	1.6595	1.7085	1.9121	1.9565	1.8719	1.8999	2.0345	
$\Delta(\Delta T_{\text{sim_moy}})$	Toit	717.4332	1.2537	1.9630	1.1083	1.1861	1.2801	0.9527	0.8422	1.1171	0.8181
	Sol		-0.0949	-0.0131	0.0053	-0.1016	-0.0951	-0.1435	-0.0828	-0.1362	-0.0140
	Sud	326.1060	0.4436	0.6494	0.4754	0.4599	0.4839	0.3106	0.3191	0.4552	0.3091
	Nord		-0.1113	0.1383	0.0501	-0.0068	0.0354	0.0817	0.0453	0.0002	0.0383
	Est		0.1748	0.3636	0.2544	0.1761	0.2441	0.1788	0.1789	0.1888	0.0608
	Ouest		0.3333	0.5666	0.3586	0.3525	0.4704	0.3365	0.2759	0.3855	0.2718
	Toit+Sud		1.9541	2.7543	1.6780	1.7297	1.8560	1.4179	1.2402	1.7435	1.1772
	Toit+Nord	1.4082	2.2856	1.2330	1.3173	1.4406	1.1478	0.9848	1.2933	0.9542	
	Toit+ Est	1.6663	2.5132	1.4183	1.4789	1.6171	1.2801	1.1184	1.4768	1.0023	
	Toit+Ouest	1.8267	2.6559	1.5432	1.6540	1.8328	1.3687	1.2073	1.6621	1.1368	
	Sud+Sol	0.3152	0.6234	0.5549	0.4310	0.3724	0.2788	0.3244	0.4538	0.3640	
	Nord+Sol	-0.2351	0.2288	0.2011	0.0255	0.0136	0.0198	0.0835	0.0393	0.1707	
	Est+Sol	0.0428	0.4185	0.3479	0.2281	0.1971	0.1602	0.1868	0.2010	0.2151	
	Ouest+Sol	0.2403	0.5716	0.4931	0.3831	0.3707	0.2673	0.3168	0.4050	0.3677	
	Toit+ Sol	1434.8664	1.1125	2.0877	1.2398	1.2599	1.3494	1.0155	0.9175	1.2164	0.9398
	Sud+Nord	652.2120	0.3858	0.8621	0.6006	0.5436	0.6049	0.4861	0.4284	0.5516	0.4264
	Sud+Est		0.6829	1.0981	0.7717	0.6978	0.8053	0.6342	0.5834	0.7104	0.4884
	Sud+Ouest		0.8339	1.2497	0.8968	0.8951	0.9490	0.7120	0.6756	0.9290	0.6597
	Nord+Est		0.1049	0.6301	0.3331	0.2703	0.3451	0.3698	0.2979	0.2651	0.2346
	Nord+Ouest		0.3053	0.7989	0.4867	0.4673	0.5584	0.4683	0.4262	0.4854	0.3910
Est+Ouest	0.5850		1.0374	0.6646	0.6602	0.7406	0.6068	0.5120	0.6581	0.4313	

Les valeurs affichées montrent que l'intégration en toiture apporte le bon confort thermique si nous voulons incorporer le MCP dans une seule surface intérieure d'un mur opaque intérieur en termes de température et d'amortissement. Cependant, si nous souhaitons améliorer le confort intérieur en introduisant deux surfaces intérieures avec une couche de MCP sur le mur intérieur, l'amélioration de la température est plus importante pour l'intégration sur le toit et le mur nord. En revanche, l'intégration du MCP dans le toit et sur le mur sud est plus favorable pour l'amortissement des fluctuations de température.

4.6. Amélioration de l'efficacité énergétique par l'intégration des MCPs

4.6.1. Modèle de bilan énergétique

En vue de calculer les besoins énergétiques d'une construction quelconque, on se base sur le bilan énergétique ci-présent. Ce dernier tient en compte les besoins énergétiques requis (chauffage et climatisation) pour assurer le confort de l'espace de vie intérieur, l'énergie utilisée pour l'éclairage, le chauffage de l'eau, et les gains de chaleur internes (occupants, éclairage et équipements électriques). La méthodologie adoptée est utilisée pour prévoir les besoins en chauffage et en climatisation.

Les besoins énergétiques calculés pour un bâtiment, exprimés en kilowattheures (kWh) sont donnés en général par les équations ci-dessous [6-7, 33-37]:

$$Q_{\text{Tot}} = \left| Q_{\text{Enveloppe}} \pm (Q_{\text{Occup}} + Q_{\text{Elec}}) \right| + Q_{\text{ECS}} + Q_{\text{Cons_Elc}} \pm Q_{\text{Solaire}} \quad (4.38)$$

Pour la période de chauffage, l'équation devient :

$$Q_{\text{Tot}} = Q_{\text{Enveloppe}} - (Q_{\text{Occup}} + Q_{\text{Elec}}) + Q_{\text{ECS}} + Q_{\text{Cons_Elc}} - Q_{\text{Solaire}} \quad (4.39)$$

Pour le refroidissement, l'équation générale se simplifie comme suit:

$$Q_{\text{Tot}} = Q_{\text{Enveloppe}} + (Q_{\text{Occup}} + Q_{\text{Elec}}) + Q_{\text{ECS}} + Q_{\text{Cons_Elc}} + Q_{\text{Solaire}} \quad (4.40)$$

En intersaisons, si la chaleur diffusée par les apports internes, comme la lumière, les occupants et leurs activités, est supérieure par rapport à la consommation d'énergie due à l'enveloppe, les besoins énergétiques seront calculés comme suit:

$$Q_{Tot} = \left| Q_{Enveloppe} - (Q_{Occup} + Q_{Elec}) \right| + Q_{ECS} + Q_{Cons_Elc} \pm Q_{Solaire} \quad (4.41)$$

Toujours en intersaisons et si la chaleur diffusée cette fois-ci est inférieure à la consommation d'énergie due à l'enveloppe, l'équation générale se simplifie comme suit :

$$Q_{Tot} = Q_{Enveloppe} - (Q_{Occup} + Q_{Elec}) + Q_{ECS} + Q_{Cons_Elc} \pm Q_{Solaire} \quad (4.42)$$

- Besoins énergétiques dus à l'enveloppe du bâtiment

Les besoins énergétiques calculés pour une construction quelconque par degré de différence en température entre l'intérieur et l'extérieur sont exprimés en kilowatts-heure par la formule suivante [6-7, 33-37]:

$$Q_{Enveloppe} = 24 DP_{Enveloppe} Dj \quad (4.43)$$

$DP_{Enveloppe}$: Somme des déperditions thermiques dues aux murs, fenêtres, portes, plafonds, ponts thermiques, sol, planchers et à la ventilation, (W/K).

Dj : Nombre de degrés-jours de chauffage et de refroidissement.

$$DP_{Enveloppe} = DP_{plafonds} + DP_{murs} + DP_{sols} + DP_{portes} + DP_{fenêtres} + DP_{ponts} + DP_{ventil} \quad (4.44)$$

Chaque terme est calculé par l'une des équations suivantes [6-7, 33-37]:

$$DP_{plafonds} = \sum_{i=1}^{i=n} b_{plafond_i} S_{plafond_i} U_{plafond_i} \quad (4.45)$$

$$DP_{murs} = \sum_{i=1}^{i=n} b_{mur_i} S_{mur_i} U_{mur_i} \quad (4.46)$$

$$DP_{sols} = \sum_{i=1}^{i=n} b_{sol_i} S_{sol_i} U_{sol_i} \quad (4.47)$$

$$DP_{portes} = \sum_{i=1}^{i=n} b_{porte_i} S_{porte_i} U_{porte_i} \quad (4.48)$$

$$DP_{\text{fenêtres}} = \sum_{i=1}^{i=n} b_{\text{fenêtre}_i} S_{\text{fenêtre}_i} U_{\text{fenêtre}_i} \quad (4.49)$$

S_i : la surface (m^2).

b_i : le coefficient de réduction des déperditions thermiques.

U_i : le coefficient de transmission thermique par degré de différence entre l'intérieur et l'extérieur ($W/m^2 K$).

La résistance thermique R mesure l'aptitude d'un matériau à résister au passage d'un flux de chaleur. Ainsi, les valeurs des coefficients de transmission thermique U seront calculées comme suit:

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_{i=1}^{i=n} R_i + R_{se}} \quad (4.50)$$

R_{si} : la résistance d'échange thermique superficielle intérieure ($m^2 K/W$)

R_i : les résistances thermiques de chaque couche de construction ($m^2 K/W$)

R_{se} : la résistance d'échange thermique superficielle extérieure ($m^2 K/W$)

Pour les surfaces planes, les valeurs des résistances thermiques qui seront retenues sont données par le tableau 4.5.

Pour le calcul du coefficient de réduction, il faut distinguer :

- Les surfaces des parois séparant l'espace non chauffé de la zone chauffée
- Les surfaces des parois séparant la zone non chauffée de l'extérieur, du plancher ou d'un autre espace non chauffé
- Le type de l'espace non chauffé
- L'état de l'isolation thermique des parois adjacentes à l'espace non chauffé
- L'état de l'isolation thermique de l'espace non chauffé

Tableau 4.5: Valeurs des résistances thermiques superficielles

	Direction du flux de chaleur		
	Ascendant	Horizontal	Vers le bas
R_{si} ($m^2 K/W$)	0.10	0.13	0.17
R_{se} ($m^2 K/W$)	0.04	0.04	0.04

Pour un mur en contact avec l'extérieur, $b = 1$.

Pour un mur enterré ou un plancher sur vide sanitaire, $b = 0.8$.

Les valeurs du coefficient de réduction des déperditions thermiques doivent être données en fonction d'un rapport de surface et d'un coefficient équivalent U des différentes parois.

Pour les bâtiments adjacents autres que d'habitation, $b = 0.2$.

Dans les autres cas, les valeurs du coefficient de réduction des pertes de chaleur doivent être données dans les tableaux ci-dessous en fonction du rapport de surface A_{iu} / A_{ue} et le coefficient équivalent U .

Tableau 4.6 : Coefficient de réduction des pertes de chaleur en fonction du coefficient de transmission thermique surfacique et du rapport de surface A_{iu} / A_{ue} [7, 34]

$R = A_{iu}/A_{ue}$	$U_{v,ue} (W/m^2 K)$			
	0.0	0.3	3.0	9.0
$R \leq 0.25$	0.80	0.85	0.90	0.95
$0.25 < R \leq 0.50$	0.65	0.75	0.80	0.90
$0.50 < R \leq 0.75$	0.55	0.65	0.75	0.85
$0.75 < R \leq 1.00$	0.50	0.55	0.70	0.80
$1.00 < R \leq 1.25$	0.45	0.50	0.65	0.80
$1.25 < R \leq 2.00$	0.35	0.40	0.50	0.70
$2.00 < R \leq 2.50$	0.30	0.35	0.45	0.65
$2.50 < R \leq 3.00$	0.25	0.30	0.40	0.60
$3.00 < R \leq 3.50$	0.20	0.30	0.40	0.55
$3.50 < R \leq 4.00$	0.20	0.25	0.35	0.50
$4.00 < R \leq 6.00$	0.15	0.20	0.25	0.40
$6.00 < R \leq 8.00$	0.10	0.15	0.20	0.35
$8.00 < R \leq 10.00$	0.10	0.10	0.20	0.30
$10.00 < R \leq 25.00$	0.05	0.10	0.15	0.25
$25.00 < R \leq 50.00$	0.05	0.05	0.05	0.15
$R > 50.00$	0.00	0.00	0.05	0.05



Les déperditions thermiques dues aux ponts thermiques sont données par l'équation suivante [6-7, 33-37]:

$$\begin{aligned}
 DP_{\text{ponts thermiques}} = & \sum_{i,j} b_{pb_i/m_j} k_{pb_i/m_j} l_{pb_i/m_j} + \sum_{i,j} b_{pi_i/m_j} k_{pi_i/m_j} l_{pi_i/m_j} \\
 & + \sum_{i,j} b_{ph_i/m_j} k_{ph_i/m_j} l_{ph_i/m_j} + \sum_{i,j} b_{rf_i/m_j} k_{rf_i/m_j} l_{rf_i/m_j} + \sum_{i,j} b_{men_i/m_j} k_{men_i/m_j} l_{men_i/m_j}
 \end{aligned}
 \tag{4.51}$$

l_{pb_i/m_j} : longueur du pont thermique, plancher bas i - mur j

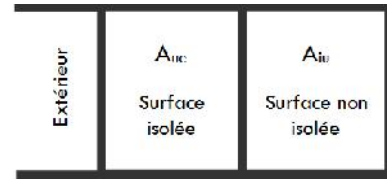
l_{pi_i/m_j} : longueur du pont thermique, étage intermédiaire i - mur j

l_{ph_i/m_j} : longueur du pont thermique, étage supérieur i - mur j

l_{rf_i/m_j} : longueur du pont thermique, mur de cisaillement i- mur j.

Tableau 4.7 : Coefficient de réduction des pertes de chaleur en fonction du coefficient de transmission thermique surfacique et du rapport de surface A_{iu} / A_{ue} [7, 34]

$R = A_{iu}/A_{ue}$	$U_{v,ue} (W/m^2 K)$			
	0.0	0.3	3.0	9.0
$R \leq 0.25$	0.35	0.50	0.85	0.95
$0.25 < R \leq 0.50$	0.20	0.35	0.70	0.90
$0.50 < R \leq 0.75$	0.15	0.25	0.65	0.85
$0.75 < R \leq 1.00$	0.15	0.20	0.55	0.80
$1.00 < R \leq 1.25$	0.10	0.15	0.50	0.75
$1.25 < R \leq 2.00$	0.05	0.10	0.40	0.65
$2.00 < R \leq 2.50$	0.05	0.10	0.35	0.60
$2.50 < R \leq 3.00$	0.05	0.10	0.30	0.55
$3.00 < R \leq 3.50$	0.05	0.05	0.25	0.50
$3.50 < R \leq 4.00$	0.05	0.05	0.25	0.45
$4.00 < R \leq 6.00$	0.00	0.05	0.20	0.35
$6.00 < R \leq 8.00$	0.00	0.05	0.15	0.30
$8.00 < R \leq 10.00$	0.00	0.05	0.10	0.25
$10.00 < R \leq 25.00$	0.00	0.00	0.10	0.20
$25.00 < R \leq 50.00$	0.00	0.00	0.05	0.10
$R > 50.00$	0.00	0.00	0.00	0.05



$$l_{rf_i/m_i} = 2 h_{Moy_Plaf} (N_{appart} - N_{niv}) \quad (4.52)$$

h_{Moy_Plaf} : la hauteur moyenne du plafond

N_{appart} : nombre d'appartements

N_{niv} : nombre de niveaux.

l_{men_i/m_j} : la longueur du pont thermique, charpenterie i - mur j

k : conductivité thermique (W/m K)

Pour calculer les déperditions thermiques dues à la ventilation, nous devons se baser sur les données suivantes:

- Menuiserie : avec ou sans joint
- Surface adjacente avec l'extérieur à l'exception du plancher bas
- Surface habitable
- Type de ventilation

La ventilation des locaux est obligatoire, pour ce faire, un débit minimal doit être assuré afin d'éviter les inconforts. Afin de réduire les dépenses énergétiques, un soin tout particulier doit être apporté au choix et à la mise en œuvre des composants.

L'étanchéité doit être réalisée le mieux possible car les fuites dans les parties chauffées augmentent les débits entrants et donc les déperditions. Le défaut d'étanchéité de l'enveloppe du bâtiment (perméabilité) joue aussi un grand rôle dans les déperditions thermiques. Ces défauts d'étanchéité sont multiples:

- Joints des ouvrants de mauvaise qualité
- Linéiques des ouvrants non rendus étanches par application de mousse expansive ou tout autre procédé.
- Appuis de fenêtres scellés sur les côtés mais non par le dessous
- Murs extérieurs en maçonnerie courante, briques ou parpaings, maçonnés avec trop de jeu...etc.

$$DP_{\text{Ventil}} = 0.34 qv_{\text{en}} \quad (4.53)$$

DP_{Ventil} : déperditions thermiques dues au système de ventilation par degré de différence en température entre l'intérieur et l'extérieur (W/K)

qv_{en} : est le débit d'air équivalent transitant dans le logement

0.34 : est la capacité thermique volumique de l'air en Wh/m³K

$$qv_{\text{en}} = qv_{\text{Fen_H}} + qv_{\text{Fen_S}} + qv_{\text{Comb}} + qv_{\text{vmc}} + qv_{\text{perm}} + qv_{\text{condext}} \quad (4.54)$$

Si un ou plusieurs des débits ne sont pas utilisés, ils ont pour valeur 0

$qv_{\text{Fen_H}}$: est le débit d'air d'aération quand les fenêtres sont utilisées comme système de ventilation d'hygiène.

$$qv_{\text{Fen_H}} = 1,8 D_{\text{Hyg}} \quad (4.55)$$

D_{Hyg} est le débit d'hygiène

$qv_{\text{Fen_S}}$: est le débit supplémentaire dans le cas où l'ouverture des fenêtres vient en complément du système spécifique (aspect comportemental de l'occupant)

$$qv_{\text{Fen_S}} = 1800 (0.01 Sp) F_{\text{ouv}} v_{\text{fen}} \quad (4.56)$$

Sp est la surface de la pièce

$$F_{\text{ouv}} = 0.6 \text{ Max} \left(0, \left(T_{\text{ext}} / 25 \right) + 0.2 \right) \quad (4.57)$$

$$v_{\text{fen}} = 0.5 (0.026 + 0.00525 \Delta T) \quad (4.58)$$

qv_{Comb} : est le débit supplémentaire extrait lié au fonctionnement des appareils à combustion quand ils se trouvent dans les pièces chauffées.

$$qv_{\text{comb}} = \begin{cases} 0.002 P_{\text{Chauf}} & \text{pour les VMC gaz} \\ 0.003 P_{\text{Chauf}} & \text{pour les autres} \end{cases} \quad (4.59)$$

P_{Chauf} : est la puissance fournie par le système de chauffage

$$P_{\text{Chauf}} = 1.2 (U_T + U_V) \Delta T \quad (4.60)$$

U_T : est le coefficient de déperdition par transmission. Afin de simplifier, il est possible d'utiliser la formule utilisant le coefficient $U_{\text{bât}}$

Ce coefficient est par définition la déperdition théorique d'un bâtiment par transmission à travers les murs, il est exprimé en ($W/m^2 K$). Cette méthode de calcul est la plus utilisée, mais sa valeur rationnelle est de 0 à 2, sachant que 0 est une excellente isolation et 2 une isolation inexistante [6-7, 33-37].

- Construction non isolée et fenêtres simples vitrage : $U_T = 1.80$
- Construction entre 1974 et 1982 : $U_T = 1.40$
- Construction entre 1983 et 1989 : $U_T = 1.15$
- Construction entre 1990 et 2000 : $U_T = 0.95$
- Construction norme RT 2000 entre 2001 et 2006 : $U_T = 0.80$
- Construction norme R1 2005 entre 2007 et 2012 : $U_T = 0.75$
- Construction nouvelle avec très bonne isolation : $U_T = 0.40$
- Construction dernière génération avec excellente isolation : $U_T = 0.30$

H_V : est le coefficient de déperdition par renouvellement d'air. Il est possible d'utiliser les débits d'hygiène majorés de 30 % pour tenir compte des autres déperditions.

ΔT : est la différence entre la température de la pièce et celle de base ($^{\circ}C$)

qv_{vmc} : est le débit d'air extrait par la ventilation mécanique. Le débit qv_{vmc} est corrigé par les coefficients C_d et C_{fr} .

$$qv_{\text{vmc}} = D_{\text{Hyg}} C_d C_{fr} \quad (4.61)$$

Le coefficient de dépassement C_d est un facteur multiplicatif des débits d'hygiène visant à prendre en compte les contraintes de dimensionnement de l'installation de ventilation et la dispersion des caractéristiques de composants. $C_d = 1.15$ dans le cas où le matériel est certifié, 1.30 dans les autres cas.

Le coefficient de fuite du réseau C_{fr} est une valeur par défaut, 0.833 en basse pression (< 20 Pa) ou 2.5 dans les autres cas.

qv_{perm} : est le débit de fuite de l'enveloppe.

$$qv_{perm} = A_T C_{perm} \quad (4.62)$$

La perméabilité de l'enveloppe est représentée par le débit de fuite (en m^3/h) sous une dépression de 4 pascals par m^2 de surface de l'enveloppe. La surface de l'enveloppe considérée est la surface des parois déperditives A_T .

A_T : est la surface intérieure totale des parois qui séparent le volume chauffé de l'extérieur, du sol et des locaux non chauffés, en m^2 , dont on exclut les planchers bas.

La valeur par défaut de la perméabilité de l'enveloppe (en $m^3/h m^2$ sous 4 Pa) est calculée en multipliant la surface d'enveloppe (A_T) par la valeur de perméabilité donnée dans le tableau suivant:

Tableau 4.8 : Valeur de la perméabilité [7, 34]

Usage	C_{perm}
Logements individuels	1.3
Logements collectifs	1.7
Autres usages	3

$qv_{condext}$: est le débit d'air extrait par les conduits à tirage naturel. Pour connaître le débit, il faut connaître les différentes pertes de charge, perte de charge linéique du conduit ΔP_{cond} , perte de charge singulière des coudes ΔP_{coude} , perte de charge singulière de la bouche ΔP_{bouche} , ainsi que la force motrice due à la différence de densité entre l'air chaud du logement et l'air extérieur ΔP_{mot} .

$$M_{Air_froid} = 1.293 \cdot 273.15 / (273.15 + T_{ext}) \quad (4.63)$$

$$M_{Air_chaud} = 1.293 \cdot 273.15 / (273.15 + T_{int}) \quad (4.64)$$

Pour plus d'éclaircissements, nous trouvons des applications numériques approfondies et plus détaillées, permettant d'expliquer la méthode de calcul de tous les facteurs liés aux déperditions thermiques dues au système de ventilation dans les références [33] et [34].

- Consommation d'eau chaude

Il est assez difficile de donner une estimation exacte des besoins en eau chaude sanitaire car ils sont fonction du standing, du nombre d'occupants, de leurs âges, de leurs professions, de leurs modes de vie, du jour (ouvrable, week-end ou férié), de la saison, et bien d'autres circonstances encore. L'expérience a montré que les besoins raisonnables se situaient entre 25 et 60 litres d'eau chaude à 50 °C par jour et par personne [7, 33, 34]. Le calcul des besoins en eau chaude sanitaire doit être fait par jour puis on multiplie par le nombre de jours du mois considéré. Si le volume est différent les jours de la semaine et le Week-end, une moyenne journalière peut être faite puis on multiplie par le nombre de jours du mois considéré. La formule qui donne l'énergie nécessaire à la production de l'eau chaude sanitaire est donnée par [7, 33, 34]:

$$Q_{ECS} = p \cdot 1.1628 \cdot V_{ECS} \cdot (T_{ECS} - T_{ef}) \quad (4.65)$$

Q_{ECS} : est l'énergie nécessaire à la production de l'eau chaude sanitaire pour la journée, en Wh.

p : est la masse volumique de l'eau en fonction de sa température (en Kg/litre)

T_{ef} : elle peut être prise égale à 1 Kg/litre.

V_{ECS} : est le volume d'eau (m^3),

$$V_{ECS} = 50 \cdot N_{Pers} \quad (4.66)$$

N_{Pers} : est le nombre de personnes occupant le logement

T_{ECS} : est la température de l'eau chaude au point de soutirage, en °C.

T_{ef} : est la température moyenne de l'eau froide du mois considéré entrant dans le ballon ou le serpentin de production d'eau chaude sanitaire (production instantanée), en °C.

- Gains de chaleur internes dus aux occupants

L'être humain diffuse de la chaleur pour maintenir ses fonctions corporelles. Cette chaleur résulte de la combustion des aliments ingérés avec l'oxygène respiré. Le tableau 4.9 donne une estimation sur la diffusion de chaleur en fonction de l'activité pratiquée par l'individu. Les apports internes dus aux occupants sont donnés par l'équation 4.67 [7, 33, 34]:

$$Q_{\text{Occup}} = C_p N_{\text{Pers}} D_{\text{pres/jour}} N_{\text{Jch}} \quad (4.67)$$

C_p : la chaleur dégagée par occupant (W/occupant)

N_{Pers} : le nombre d'occupant

$D_{\text{pres/jour}}$: la durée de présence par jour (h/jour)

N_{Jch} : le nombre de jours chauffés (jours/an)

Tableau 4.9 : Diffusion de chaleur par personne [7, 33, 34]

Niveau d'activité	Exemples d'activité	Diffusion de chaleur par personne (sensible et latente)
1	Activité statique assise (lire et écrire par exemple)	120 W
2	Travaux simples assis ou debout, travail en laboratoire, machine à écrire	150 W
3	Activités corporelles légères	190 W
4	Activités corporelles moyennes à difficiles	Plus de 200 W

- Gains de chaleur internes dus à l'éclairage et aux équipements

Les machines électriques, en raison de leur fonctionnement, et n'importe quel équipement émettent une certaine quantité de chaleur dans l'ambiance. Pour les appareils électriques et les autres équipements, il n'existe pas une méthode de calcul universelle qui puisse être appliquée pour calculer les apports, ni la répartition sensible / latente de cette chaleur. Dans certaines références, il a été proposé quelques valeurs de gains en chaleur pour différents appareils électroménagers.

Tableau 4.10 : Diffusion de chaleur par l'éclairage et équipements électriques (cas de notre étude) [7, 33, 34]

Type d'équipement	Durée (heure) et puissance opérationnelle " PO " des modes (Watts)				Energie (kWh)
	PO du Mode 1	Heure	PO du Mode 2	Heure	
Téléviseur + Démo	20	19	78	5	0.770
Réfrigérateur	12	22	145	2	0.554
Eclairage			75	6	0.450
Ordinateur	32	2	186	4	0.808
Divers					1
Total par jour					3.5820

- Les charges électriques journalières

Le calcul de la consommation électrique se fera en fonction des données suivantes:

- La puissance de l'appareil électrique exprimée en watts
- Le nombre d'heures par jour pendant lesquelles l'appareil fonctionne
- Le nombre de jours par an pendant lesquels l'appareil fonctionne.

Le calcul se fera donc en effectuant le produit entre le nombre d'heures d'utilisation, le nombre de jours d'utilisation et la puissance de l'appareil en watts. Le résultat sera divisé par 1000 pour convertir le nombre de watts en kilowatt.

P_{ap_electr} : la puissance des appareils électriques (W)

Nb_{heures} : nombre d'heures pendant lesquelles le périphérique est en état de fonctionnement pendant la journée

Nb_{jours} : nombre de jours pendant lesquels le périphérique est en état de fonctionnement pendant l'année

Le calcul, en kilowattheures, sera comme suit [7, 33, 34]:

$$Q_{tot_ap_elctr} = Nb_{heures} Nb_{jours} \frac{P_{ap_electr}}{1000} \quad (4.68)$$

Tableau 4.11 : Consommation moyenne des appareils électriques par jour (cas de notre étude) [7, 33, 34]

Type d'équipement	Puissance (W)		Durée d'utilisation par jour	Consommation moyenne par jour (Wh)	
	Valeurs de fonctionnement	Valeur choisie pour les calculs			
TV LCD avec Démo intégré	en service	90 à 250	140	5 h	757.00
	en veille	3	/	19 h	
Réfrigérateur (250 litres)		150 à 200	/	En continu	551.00
Eclairage : 4 lampes économiques		15 à 25	20	6 h (Séjour)	220.00
				3 h (Cuisine)	
				1 h (SDB)	
				1 h (Chambre)	
Ordinateur à écran plat	en service	70 à 80	75	4 h	306.00
	en veille	3	/	2 h	
Chargeur de GSM		5	/	1 h	0.50
Fer à repasser		750 à 1100	925	15 min	231.25
Aspirateur		650 à 800	720	12 min	144.00
Radio-réveil		3 à 6 W	4.5	en continu	108.00
Rasoir électrique		8 à 12 W	10	3 min	0.50
Sèche-cheveux		300 à 600 W	450	5 min	37.50
				Total par jour (Wh)	2355.75/jour

- Gain solaire passif

Les apports solaires dépendent de l'ensoleillement et des surfaces réceptrices équivalentes sur les différentes orientations. Pour une période de calcul donnée, les apports solaires se calculent comme suit [33, 34]:

$$Q_{\text{Solaire}} = \sum_j I_{Sj} \sum_n A_{Snj} \quad (4.69)$$

La première somme s'effectue sur toutes les orientations j, (horizontal, nord, sud, est, ouest, Nord-Est, Nord-Ouest, Sud-Est, Sud-Ouest ...etc.).

La seconde somme s'effectue sur toutes les surfaces n d'orientation j qui captent le rayonnement solaire

I_{Sj} : est l'irradiation solaire sur une surface unitaire ayant l'orientation j

$A_{S_{nj}}$: est l'aire réceptrice équivalente de la surface ayant l'orientation j. Elle est calculée comme suit:

$$A_S = A F_{Omb} F_{Red} g \quad (4.70)$$

A : est l'aire de la baie (m^2)

F_{Red} : est le facteur de réduction pour les encadrements des vitrages, égal au rapport de l'aire de la surface transparente à l'aire totale de la menuiserie vitrée;

F_{Omb} : est le facteur d'ombre, il est défini par l'utilisateur pour des raisons simplificatrices, et peut être calculé par :

$$F_{Omb} = F_{Omb_R} F_{Omb_S} \quad (4.71)$$

F_{Omb_R} : est le facteur d'ombre des rideaux;

F_{Omb_S} : est le facteur d'ombre de la surface qui peut être calculé par :

$$F_{Omb_S} = F_{Cor_h} F_{Cor_Sur} F_{Cor_Ecr} \quad (4.72)$$

F_{Cor_h} : est le facteur de correction pour l'horizon

F_{Cor_Sur} : est le facteur de correction pour les surplombs

F_{Cor_Ecr} : est le facteur de correction pour les écrans latéraux

g : est le facteur solaire de la baie

Le facteur solaire utilisé dans cette formule est en principe la moyenne dans le temps du rapport de l'énergie traversant l'élément exposé à l'énergie incidente sur celui-ci, en l'absence d'ombrage. Certaines valeurs figurent dans le tableau 4.12. Ces valeurs correspondent à l'incidence normale, avec une surface propre.

Tableau 4.12 : Facteurs solaires pour les deux types de vitrages les plus courants

Type de vitrage	g
Vitrage simple	0.85
Double vitrage clair	0.75

4.6.2. Efficacité énergétique de l'édifice : cas du mois de Novembre

Conformément aux résultats de la section 4.4 qui traitent les principaux paramètres du confort thermique, le choix s'est fixé sur le mois de novembre. Nous nous intéressons aux calculs des besoins énergétiques nécessaires pour à assurer un

confort permanent dans toutes les zones du studio. Les paramètres qui s'accordent avec le scénario d'occupation et le mode de vie des occupants sont les suivants : la température de l'eau froide T_{ef} varie en fonction du mois, $T_{ECS} = 50\text{ °C}$, $C_p = 150\text{ W}$, $Nb_{occ} = 2$, $D_{pres} / jour = 14\text{ h}$, la surface du vitrage représente environ 95% de la surface totale de la fenêtre, $F_{Shad} = 0.7$ pour l'orientation s, $F_{Red} = 0.8$ et $g = 0.8$, la température donnée par l'équation d'Auliciems a été considérée comme température du confort.

$$T_{Conf} = 17.8 + 0.31 T_{ext} \quad (4.73)$$

Le calcul des économies d'énergie est basé sur des données radiométriques et météorologiques et repose aussi sur un programme de simulation énergétique de bâtiments. Le tableau 4.13 représente les besoins énergétiques correspondants au mois de novembre.

Tableau 4.13 : Besoins énergétiques totaux, l'influence du gain solaire passif (sans MCP)

T_{ext} (°C)	T_{Conf} (°C)	T_{ef} (°C)	Dj	$Q_{enveloppe}$ (kWh)	$Q_{solaire}$ (kWh)	Gains internes		$Q_{ECS\ à\ 50\text{°C}}$ (kWh)	Q_{Cons_Elc} (kWh)	Q_{Tot} (kWh)
						Q_{occup} (kWh)	Q_{Elec} (kWh)			
16.54	22.5	12.30	178.80	2177.17	0	126.00	107.46	131.51	70.67	2145.90
					184.59					1961.30

Les résultats affichés sur le tableau prouvent que le chauffage solaire passif "qui nous permet d'exploiter les apports solaires directs dus aux rayonnements solaires incidents et traversant le vitrage des ouvertures" engendre une diminution en énergie de 8.60 % par rapport au premier cas (sans apports solaires). La consommation initiale totale s'est arrêtée à 2145.90 kWh, en profitant des apports solaires directs, on peut la réduire à 1961.30 kWh. Ce pourcentage peut devenir plus significatif en améliorant les performances thermiques de l'enveloppe (voir la figure 4.16).

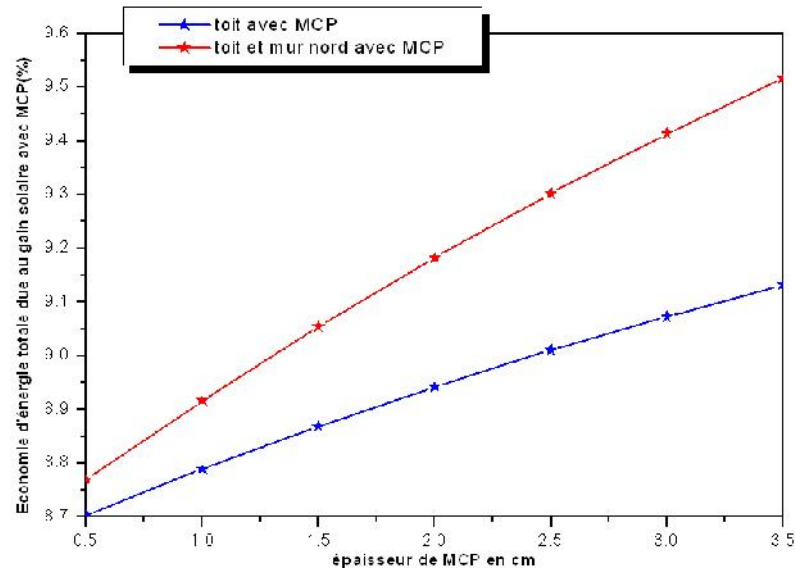


Figure 4.16 : Economie en énergie due à l'enveloppe issue du gain solaire en fonction de l'épaisseur des MCPs.

Le tableau 4.14 montre en chiffres les avantages issus de ces techniques si on profite à la fois des gains solaires directs et de la particularité du matériau à changement de phase MCP. Nous nous intéressons aussi à l'effet de l'épaisseur des MCPs sur les économies en énergie.

Tableau 4.14 : Économies en énergie dues au chauffage solaire passif (gain solaire) et à l'intégration du matériau MCP

Epaisseurs du MCP			0.5 cm	1 cm	1.5 cm	2 cm	2.5 cm	3 cm	3.5 cm
Toit	Sans apports solaires	Q _{Tot}	2121.01	2100.15	2081.33	2064.27	2048.73	2034.51	2021.46
		Q _{enveloppe}	2152.28	2131.42	2112.61	2095.54	2080.00	2065.79	2052.73
	Avec apports solaires	Q _{Tot}	1936.41	1915.56	1896.74	1879.67	1864.13	1849.92	1836.86
		Q _{enveloppe}	2105.11	2070.13	2038.70	2010.30	1984.51	1960.98	1939.43
Toit + Mur Nord	Sans apports solaires	Q _{Tot}	2105.11	2070.13	2038.70	2010.30	1984.51	1960.98	1939.43
		Q _{enveloppe}	2136.38	2101.41	2069.98	2041.57	2015.78	1992.25	1970.71
	Avec apports solaires	Q _{Tot}	1920.51	1885.54	1854.11	1825.70	1799.91	1776.38	1754.84
		Q _{enveloppe}	2177.17	2142.20	2110.77	2082.36	2056.57	2033.04	2011.51

La comparaison entre les deux types d'intégration montre que l'incorporation de ce matériau au mur nord et à la toiture est plus efficace par rapport au cas où on se limite uniquement au toit. Les valeurs indiquent qu'il est possible d'aboutir à un niveau d'économie à environ 9.48% " $((2177.17-1970.71) \times 100) / 2177.17$ " pour une épaisseur de 3.5 cm. De ce fait, en isolant seulement la toiture, les économies en

énergie sont d'environ de 5.72% " $((2177.17-2052.73) \times 100) / 2177.17$ " pour une épaisseur de 3.5 cm (figure 4.17). Il est à noter qu'on se réfère toujours aux besoins énergétiques dus à l'enveloppe de l'édifice.

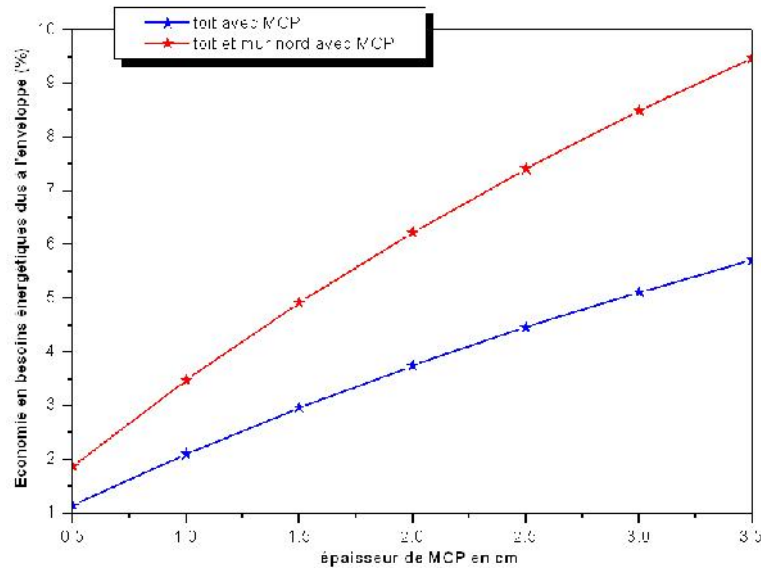


Figure 4.17 : Économies en besoins énergétiques dus à l'enveloppe en fonction de l'épaisseur des MCPs.

Les courbes tracées sur la figure 4.18 représentent en pourcentage l'apport de ces deux concepts passifs en termes de besoins énergétiques totaux.

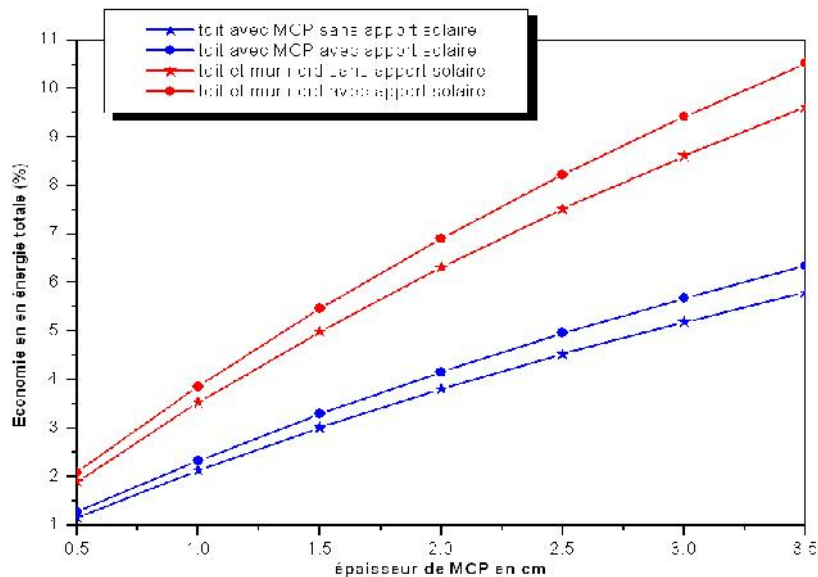


Figure 4.18 : Économies en énergie totale due au gain solaire en fonction de l'épaisseur des MCPs.

Pour analyser les chiffres, on se réfère cette fois-ci aux besoins énergétiques totaux sans apports solaires. Les résultats obtenus donc montrent que l'isolation du mur nord et du toit par une paroi en MCP de 3.5 cm d'épaisseur peut engendrer une économie en énergie de l'ordre de 18.22% " $((2145.90 - 1754.84) \times 100) / 2145.90$ ", en profitant du gain solaire. En absence d'apports solaires le taux de diminution s'est fixé à de 9.62% " $((2145.90 - 1939.43) \times 100) / 2145.90$ ".

Toutefois, dans le cas d'un toit isolé par le matériau de type MCP, 14.40% " $((2145.90 - 1836.86) \times 100) / 2145.90$ " de l'énergie peut être économisée grâce aux gains d'énergie solaire accumulée. De même, cette isolation peut assurer une économie d'énergie de 5.79% " $((2145.90 - 2021.46) \times 100) / 2145.90$ " sans apport solaire.

4.7. Conclusion

Dans ce chapitre, l'intégration d'un matériau de type MCP dans une construction contribue à améliorer les performances thermiques de l'enveloppe et assure également un confort thermique à l'intérieur. Cela a un impact significatif sur l'économie d'énergie du studio car il permet de stocker le gain de chaleur solaire et interne. La comparaison entre les différents types d'intégration des MCPs conduit aux conclusions suivantes :

- L'utilisation d'un MCP comme isolant supplémentaire peut entraîner une différence de température significative entre l'intérieur et l'extérieur, améliorant ainsi les performances thermiques de l'enveloppe du bâtiment.
- Les apports solaires gratuits peuvent jouer un rôle positif pendant la période hivernale, cette quantité d'énergie peut réduire la consommation d'énergie due aux besoins du chauffage. Cependant, le stockage de cette quantité d'énergie dans l'enveloppe contribue à maintenir un confort thermique satisfaisant à l'intérieur du studio.
- Le choix judicieux de la température de la fusion du matériau ($T = 22.6 \text{ }^\circ\text{C}$) a permis de maintenir la température de l'air intérieur dans l'intervalle du confort thermique.

- L'intégration du MCP sur le mur nord et le toit est le meilleur choix pour contrôler le gain solaire direct pendant la période hivernale.
- Ce concept de matériau dit "intelligent" peut conduire à une économie en énergie plus importante en profitant convenablement du gain solaire passif.

Références

1. I.Y. Choi, S.H. Cho, J.T. Kim, Energy consumption characteristics of high-rise apartment buildings according to building shape and mixed-use development, *Energy and Buildings* 46 (2012) 123–131.
2. M. Ozel, Determination of optimum insulation thickness based on cooling transmission load for building walls in a hot climate, *Energy Conversion and Management* 66 (2013) 106–114.
3. W. Wang, H. Rivard, R. Zmeureanu, Floor shape optimization for green building design, *Advanced Engineering Informatics* 20 (2006) 363–378.
4. K. Tsikaloudaki, Th. Theodosiou, K. Laskos, D. Bikas, Assessing cooling energy performance of windows for residential buildings in the Mediterranean zone, *Energy Conversion and Management* 64 (2012) 335–343.
5. J. Han, L. Lu, H. Yang, Investigation on the thermal performance of different lightweight roofing structures and its effect on space cooling load, *Applied Thermal Engineering* 29 (2009) 2491–2499.
6. S. Belgherras, S.M.A. Bekkouche, T. benouaz, N. Benamrane, Prospective analysis of the energy efficiency in a farm studio under Saharan weather condition , *Energy and building* 145 (2017) 342-353.
7. S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M. Hamdani, M.K. Cherier, M.R. Yaiche, N. Benamrane, Diagnosis and comprehensive quantification of energy needs for existing residential buildings under Sahara weather conditions, *Advances in building energy research*, Volume 11, 2017 - Issue 1, pages: 37-51.
8. S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M. Hamdani, M.K. Cherier, M.R. Yaiche, N. Benamrane, Modelling and experiment of buildings thermo-aerulic behavior according to the level-compactness in Saharan climate conditions, *Engineering structures and technologies* 8(3), 2016, 117-130.
9. R. Hassan, Modernity with Context: The North of Africa, a Mediterranean 'genius loci', in *ATLAS: Architectures of the 21st Century*, edited by Luis Fernández-Galiano, Bilbao: BBVA Fundación, (2011).
10. Y. Lavafpour, M. Surat, Passive low energy architecture in hot and dry climate, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(8), 2011, 757-765.
11. A. AhmetVefik, Vernacular climate control in desert architecture, *Energy and Buildings*, 16, 1991, 809–815.

12. M.A. Kama, An overview of passive cooling techniques in buildings: design concepts and architectural interventions, *Acta Technica Napocensis : Civil Engineering & Architecture*, 55, (2012).
13. K.A. Al-Sallal, Case Studies in realizing green buildings, vernacular tower architecture of Sana'a: theory and method for deriving sustainable design guidelines, *Sustainability, Energy and Architecture*, Chapter 10, 2013, 257–287.
14. M. Casini, Designing the third millennium's buildings, *Smart Buildings*, 2016, 3-54.
15. A. Krishan, The habitat of two deserts in India: hot-dry desert of Jaisalmer (Rajasthan) and the cold-dry high altitude mountainous desert of Leh (Ladakh), *Energy and Buildings* 23, 1996, 217–229.
16. M.M. Antonio, T.A. Isabel, C. Soolyeon, V. José-Luis, Energy efficiency and thermal comfort in historic buildings: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 61, 2016, 70-85.
17. L. Giovanni, K. Somayeh, A. Amaryllis, B. Johan, Hygrothermal performance evaluation of traditional brick masonry in historic buildings, *Energy and Buildings* 105, 2015, 393-411.
18. G. Marco, P.H. Gregor, R.F. Anthony, Modelling and calibration of a high-mass historic building for reducing the prebound effect in energy assessment, *Energy and Buildings* 116, 2016, 434–448.
19. F. Souayfane, F. Fardoun, P.H. Biwole, Phase Change Materials (PCM) for cooling applications in buildings: A review, *Energy and Buildings* 2016, 129.
20. J. Hasnat, M. Alam, J. Sanjayan, J. Wilson, Investigation of PCM as retrofitting option to enhance occupant thermal comfort in a modern residential building, *Energy and Buildings* 133, 2016, 217–229.
21. H. Ling, C. Chen, H. Qin, S. Wei, J. Lin, Na Li, M. Zhang, Nan Yu, Yin Li, Indicators evaluating thermal inertia performance of envelopes with phase change material, *Energy and Buildings* 122, 2016, 175–184.
22. L. Royon, L. Karim, A. Bontemps, Optimization of PCM embedded in a floor panel developed for thermal management of the lightweight envelope of buildings, *Energy and Buildings* 82, 2014, 385–390.
23. P. Rumianowski, J. Brau, J.J. Roux, An adapted model for simulation of the interaction between a wall and the building heating system, in *Proceedings of the Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings IV Conference*, Orlando, Florida, USA; 1989: 224–233.
24. J.J. Roux, *Comportement thermique des bâtiments*, Institut National des Sciences Appliquées, département de génie civil, 2000, INSA de Lyon, France.
25. M.A.C. Haddam, S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M. Hamdani, M.K. Cherier, N. Benamran, Integration of eaves and shading devices for improving the thermal

- comfort in a multi-zone building, *Thermal Science*, Year 2015, Vol. 19, Suppl 2, pp. S615-S624.
26. M. Hamdani, S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M.K. Cherier, A new modelling approach of a multizone building to assess the influence of building orientation in Saharan climate, *Thermal Science*, Year 2015, Vol. 19, Suppl 2, pp. S591-S601.
 27. S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M. Hamdani, Cherier, M.K. Cherier, N. Benamran, Judicious choice of the building compactness to improve thermo-aeraulic comfort in hot climate, *Journal of Building Engineering*, 01 (2015) 42–52.
 28. R. Kaoulal épouse Boussem, Contribution à l'étude des systèmes solaires intégrés aux bâtiments, Thèse de doctorat de l'Université Tahri Mohammed Béchar Spécialité : Physique énergétique, 2017.
 29. Y. Jannot, Transferts thermiques, Ecole des Mines, Nancy, 2012.
 30. M.A.C. Haddam, Application de quelques notions de la conception bioclimatique pour l'amélioration de la température interne d'un habitat, Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, Mars 2015.
 31. J.P. Nadeau, J.R. Puiggali, Séchage: des processus physiques aux procédés industriels, Tec & Doc-Lavoisier, 1995 (ISBN 2-7430-0018-X).
 32. P. Rumianowski, J. Brau, J.J. Roux, An adapted model for simulation of the interaction between a wall and the building heating system, in *Proceedings of the Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings IV Conference Orlando, USA*, p. 224-233, 1989.
 33. M.K. Cherier, L'utilisation passive de l'énergie solaire dans les habitats de Ghardaïa, Doctorat en Sciences Spécialité Énergies Renouvelables, Université Abou-bakr belkaïd, Tlemcen, Juin 2018.
 34. S. Bendara, Stratégies de contrôle passif pour l'amélioration du confort thermo-aéraulique des bâtiments multi-zones, Doctorat en Sciences Physique énergétique, Université Abou-bakr belkaïd, Tlemcen, Juin 2019.
 35. H. Kadraoui, Diagnostic et solutions adaptées pour l'amélioration de l'efficacité énergétique d'une construction multizone énergivore, Doctorat en Sciences Spécialité Énergies Renouvelables, Université Abou-bakr belkaïd, Tlemcen, Juin 2019.
 36. S. Bendara, S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, S. Belaid, M. Hamdani, M.K. Cherier, A. Boutelhig, N. Benamrane , Energy efficiency and economic insulation thickness according to the compactness measure Case of a studio apartment under Saharan weather conditions, *Journal of Solar Energy Engineering*, : Including Wind Energy and Building Energy Conservation, Copyright©2019 by ASME, doi:10.1115/1.4042455.
 37. S.M.A. Bekkouche, N. Benamrane, M.K. Cherier, M. Hamdani, T. Benouaz, S. Belgherras, S. Bendara, H. Kadraoui, Application of some solar passive concepts to create more energy efficient studio apartment, 2017 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Date Added to IEEE Xplore: 01 October 2018, DOI: 10.1109/IRSEC.2017.8477274

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ces travaux, on s'est intéressé au confort thermique et à l'efficacité énergétique d'une construction bâtie vu leurs impacts sur la qualité des ambiances intérieures, la santé et la productivité de l'occupant. Le but essentiel donc est d'améliorer les performances thermiques de l'enveloppe du bâtiment qui conduisent à l'amélioration du confort thermique. A cet effet, quelques objectifs ont été visés pour répondre à certains points évoqués:

- Fournir une ambiance plus confortable à l'intérieur du bâtiment.
- Réduire la consommation énergétique.
- L'exploitation économique et efficace de l'énergie solaire dans les bâtiments (captation, stockage, distribution.....etc.).

Les résultats obtenus étaient globalement intéressants notamment pour les briques creuses qui possèdent des propriétés thermo-physiques permettant de réduire les déperditions thermiques à travers l'enveloppe et minimiser par conséquence la consommation énergétique quelle que soit la saison. Une brique creuse verticale à dix 10 cavités apporte un bon compromis en terme du confort. Si ce matériau est disposé horizontalement, les configurations correspondantes à neuf 9 et onze 11 cavités favorisent une meilleure solution, elles devront donc être privilégiées. Les démarches suivies se sont basées sur le choix de la configuration et du nombre adéquat de cavités.

En plus, il a été conclu que globalement les matériaux de construction légers et lourds peuvent améliorer le confort thermique intérieur de l'habitat en lissant les variations de température jour - nuit.

Cependant, en utilisant la méthode d' "enthalpie-porosité" pour la modélisation du stockage d'énergie par chaleur latente avec des conditions environnementales variables, il a été déduit que l'intégration judicieuse des MCPs semble parfois une solution prometteuse et peut augmenter le confort thermique et améliorer en conséquence l'efficacité énergétique de l'édifice. Une étude comparative a été menée pour évaluer l'effet combiné de la géométrie de la section de la cavité et de

l'épaisseur des MCPs des conteneurs. Le processus de fusion/solidification des MCPs semble efficace en raison de son influence sur la température de l'air confiné dans la cavité. A cet effet, l'application des conteneurs des MCPs dans le secteur du bâtiment favorise une température de l'air intérieur proche de la température de fusion du matériau.

Par ailleurs certains résultats ont montré que l'intégration des MCPs dans le toit et le mur nord est le meilleur choix pour maintenir une température plus confortable. Les panneaux intérieurs en MCP ont permis de réduire la consommation d'énergie due aux besoins de chauffage. La comparaison entre les différents types d'intégration des MCPs a montré que l'utilisation d'un MCP comme isolant supplémentaire peut entraîner une différence de température significative entre l'intérieur et l'extérieur. Les apports solaires gratuits peuvent jouer un rôle positif pendant la période hivernale, cette quantité d'énergie peut réduire la consommation d'énergie due aux besoins du chauffage. Cependant, le stockage de cette quantité d'énergie dans l'enveloppe contribue à maintenir un confort thermique satisfaisant à l'intérieur du studio. L'intégration du MCP sur le mur nord et le toit apparaît comme un meilleur choix pour contrôler le gain solaire direct pendant la période hivernale. Ce concept de matériau dit "intelligent" peut conduire à une économie en énergie plus importante en profitant convenablement du gain solaire passif.

Perspectives

En vue d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments, nous proposons une méthode de chauffage/climatisation par l'utilisation des échangeurs Air-MCPs par voies active. Cette importante étude peut être une solution adéquate pour une meilleure exploitation des apports solaires.

Autant, les recherches devront être ouvertes dans le domaine de stockage saisonnier pour réduire la consommation énergétique et améliorer le rendement de chauffage/climatisation des bâtiments.