



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic Republic of Algeria
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research
جامعة عبد الحميد بن باديس – مستغانم
Abdel Hamid Ibn Badis University – Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculty of Sciences and Technology
قسم الهندسة الميكانيكية
Department of Mechanical Engineering



N° d'ordre : M2...../GM/2024

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Thème

**EFFET DE L'INTEGRATION D'UNE COUCHE DE MATERIAU
A CHANGEMENT DE PHASE (MCP) DANS UN TOIT DE
BATIMENT SUR SES PERFORMANCES ENERGETIQUES**

Présenté par

1-BENHAMDADA Abdennour.

Soutenu le 24/06/ 2024 devant le jury composé de :

Président : Dr. MEDJAHED Bendida Maitre de Conférences "A" Université de Mostaganem.

Examineur : Dr. GUERMAT Abdelkader Maitre de Conférences "B" Université de Mostaganem

Encadrant : Dr. FLITTI Abdelmadjid Maitre de Conférences "B" Université de Mostaganem

Année universitaire 2023 / 2024

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Mes parents qui m'ont toujours soutenu dans tout ce que j'ai fait, qu'Allah les bénisse et les garde en bonne santé.

Mon frère Farouk et ma sœur Yousra

Mes amis Issam eddine et Abderrahman

Remerciements

J'aimerais d'abord remercier Allah le tout puissant et miséricordieux pour la volonté, la santé et la patience qu'Il m'a accordée durant toutes ces années d'étude.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements au **Dr. FLITTI Abdelmadjid** qui en tant que directeur de mémoire s'est toujours montré à l'écoute et très conseiller, grand merci à lui pour son entière disponibilité durant toutes les étapes de la réalisation de ce travail.

J'adresse mes vifs remerciements aux membres du jury le **Dr. MEDJAHED Bendida** pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury de mon travail ainsi que le **Dr. GUERMAT Abdelkader**, grand merci à eux pour leur présence et leur lecture attentive de ce travail malgré leurs préoccupations et leur emploi du temps assez chargé ainsi que les remarques qu'ils m'adresseront lors de la soutenance afin de l'améliorer.

Je tiens à remercier mes parents pour leur contribution, leur soutien moral et financier et leur encouragement.

Liste des figures

| | |
|--|----|
| <i>Figure 0. 1: Sources de déperditions de chaleur d'une maison</i> | 1 |
| <i>Figure I. 1: Procédés de stockage par chaleur sensible et chaleur latente</i> | 4 |
| <i>Figure I. 2: Schéma de principe d'un système de stockage par voie thermochimique</i> | 5 |
| <i>Figure I. 3: Classification des matériaux à changement de phase</i> | 6 |
| | |
| <i>Figure II. 1: une toiture sans MCP</i> | 10 |
| <i>Figure II. 2: Une toiture avec MCP</i> | 10 |
| <i>Figure II. 3: Les trois types de nœuds issus de la discrétisation de la toiture</i> | 16 |
| | |
| <i>Figure III. 1 : Evolution de la demande en énergie électrique en Algérie</i> | 18 |
| <i>Figure III. 2: Température moyenne maximale et minimale à Chlef</i> | 19 |
| <i>Figure III. 3: Variation de la température ambiante en fonction du temps</i> | 19 |
| <i>Figure III. 4: Variation de la vitesse du vent en fonction du temps</i> | 20 |
| <i>Figure III. 5: Variation du flux du rayonnement solaire intercepté par le toit en fonction du temps</i> | 20 |
| <i>Figure III. 6: Variation de la température apparente du ciel en fonction du temps</i> | 21 |
| <i>Figure III. 7: Variation du coefficient convectif externe en fonction du temps</i> | 21 |
| <i>Figure III. 8: Distribution de températures dans le toit sans MCP au cours du temps</i> | 23 |
| <i>Figure III. 9: Variation du coefficient de convection intérieur au cours du temps, pour un toit sans MCP</i> | 24 |
| <i>Figure III. 10: Variation du coefficient d'échange par rayonnement au cours du temps, pour un toit sans MCP</i> | 24 |
| <i>Figure III. 11: Distribution de températures dans le toit avec MCP au cours du temps</i> | 25 |
| <i>Figure III. 12: Variation du coefficient de convection intérieur au cours du temps, pour un toit avec MCP</i> | 26 |
| <i>Figure III. 13: Variation du coefficient d'échange par rayonnement au cours du temps, pour un toit avec MCP</i> | 26 |
| <i>Figure III. 14: Variation de la température de la face intérieure du toit, pour les deux cas étudiés</i> | 27 |

Liste des tableaux

| | |
|--|-----------|
| <i>Tableau I. 1: Propriétés physiques de quelques hydrates salins</i> | <i>6</i> |
| <i>Tableau I. 2: Caractéristiques de quelques MCP organiques et eutectiques</i> | <i>7</i> |
| <i>Tableau I. 3: Comparaison entre les trois familles de MCP</i> | <i>8</i> |
| | |
| <i>Tableau III. 1: Propriétés thermophysiques des matériaux du modèle physique.</i> | <i>22</i> |

Liste des abréviations

| | | |
|----------------|---|------------------------------------|
| c | Capacité thermique spécifique | [J/kg°C] |
| E | Energie stockée | [J] |
| H | Enthalpie volumétrique totale | [J/m ³] |
| h | Enthalpie sensible | [J/m ³] |
| h_{conv1} | Coefficient d'échange convectif côté extérieur | [W/m ² °C] |
| h_{conv2} | Coefficient d'échange par convection côté intérieur | [W/m ² °C] |
| h_{ray} | Coefficient d'échange par rayonnement | [W/m ² K] |
| I | Flux du rayonnement solaire | [W/m ²] |
| L_f | Chaleur latente de fusion | [J/kg] |
| Q | Energie totale gagnée | [J/m ²] |
| \dot{Q} | Flux instantané de chaleur gagné | [W/m ²] |
| \bar{Q} | Flux de chaleur instantané gagné moyen | [W/m ²] |
| q | Quantité de chaleur absorbée ou cédée | [J] |
| T | Température | [°C] |
| T_f | Température de fusion | [°C] |
| T_{sk} | Température apparente du ciel | [°C] |
| $T_{\infty 1}$ | Température ambiante du milieu extérieur | [°C] |
| $T_{\infty 2}$ | Température ambiante du milieu intérieur | [°C] |
| V | Vitesse du vent | [m/s] |
| Δt | Pas temporel | [s] |
| Δx | Pas spatial | [m] |
| λ | Conductivité thermique- | [W/m°C] |
| ρ | Masse volumique | [kg/m ³] |
| ε | Emissivité | [/] |
| σ | Constante de Stefan-Boltzmann | [W/m ² K ⁴] |

Indices :

| | |
|-----|---------|
| l | Liquide |
| p | Phase |
| s | Solide |

Résumé

Dans notre pays, le secteur de bâtiments est le premier consommateur d'énergie représentant 41% de la consommation globale nationale. Dans la période estivale, environ 70% de cette consommation est dédiée à la climatisation. Ainsi, la promotion de l'efficacité énergétique dans ce secteur s'impose. Pour y parvenir, les chercheurs actuels ont proposé de nombreuses solutions. Cependant, il apparaît, clairement, que l'incorporation de matériaux de changement de phase dans les enveloppes de bâtiments est une solution en plein expansion.

Ce travail s'inscrit dans ce cadre et il consiste à une étude numérique, par la méthode de différences finies, de l'effet de l'incorporation d'une couche de MCP dans la toiture d'une maison sur ces performances énergétiques dans la période estivale. Au cours de cette étude, la méthode enthalpique explicite a été implantée sous l'environnement Matlab, afin d'évaluer les performances d'un toit avec et sans MCP. Les résultats trouvés ont prouvé que cette solution réduit du coût de confort thermique.

Mots clés : Matériaux à changement de phase, méthode enthalpique explicite, toit, méthodes des différences finis.

Abstract

In our country, the buildings sector is the leading energy consumer, which represents 41% of the overall national consumption. In the summer, around 70% of this consumption is devoted to air conditioning. It is therefore essential to promote energy efficiency in this sector. To achieve this, current researchers have proposed a number of solutions. However, it is clear that the incorporation of phase-change materials into building envelopes is a solution that is undergoing rapid expansion.

This work falls within this framework and consists of a numerical study, using on the finite difference method, of the effect of incorporating a layer of PCM into a house's roof on its energy performance during summer period. In this study, the explicit enthalpy method was implemented in the Matlab environment in order to evaluate the performance of a roof with and without PCM. The obtained results show that this solution reduces the cost of the thermal comfort.

Key words: Phase change materials, explicit enthalpy method, roof, finite difference methods.

ملخص

في بلادنا، يعد قطاع البناء المستهلك الرئيسي للطاقة، حيث يمثل 41% من الاستهلاك الوطني الإجمالي. وفي فترة الصيف، يتم تخصيص حوالي 70% من هذا الاستهلاك لتكييف الهواء. ولذلك، فإن تعزيز كفاءة الطاقة في هذا القطاع أمر ضروري. ولتحقيق ذلك، اقترح الباحثون الحاليون العديد من الحلول. ومع ذلك، فمن الواضح أن دمج المواد متغيرة الطور في أغلفة المباني هو الحل المتنامي.

هذا العمل هو جزء من هذا الإطار ويتكون من دراسة عددية، باستخدام طريقة الفرق المحدودة، لتأثير دمج طبقة من المواد متغيرة الطور في سقف المنزل على استهلاكه للطاقة في فترة الصيف. خلال هذه الدراسة، تم غرس طريقة الإنثالبي الصريحة في بيئة الماتلاب، من أجل تقييم أداء السقف بوجود المواد متغيرة الطور وبدونها. أثبتت النتائج المتحصل عليها أن هذا الحل يقلل تكلفة الراحة الحرارية.

الكلمات المفتاحية: مواد متغيرة الطور، طريقة الإنثالبي الصريحة، السقف، طرق الفروق المحدودة.

Table des matières

| | |
|--|-----|
| Dédicaces..... | ii |
| Remerciements | iii |
| Liste des figures..... | iv |
| Liste des tableaux..... | v |
| Liste des abréviations | vi |
| Résumé..... | vii |
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre I..... | 2 |
| Chapitre I : Généralités sur les matériaux à changement de phase..... | 3 |
| I.1 Introduction | 3 |
| I.2. Le stockage de l'énergie thermique | 3 |
| I.2.1. Le stockage par chaleur sensible | 3 |
| I.2.2. Le stockage par chaleur latente..... | 4 |
| I.2.3 Le Stockage par voie thermochimique | 5 |
| I.3 Classification des matériaux a changement de phase | 6 |
| I.3.1 Les matériaux inorganiques | 6 |
| I.3.2 Les MCP organiques..... | 7 |
| I.3.3 Les MCP Eutectiques | 7 |
| I.4. Comparaison entre différents types de MCP..... | 8 |
| Chapitre II : Modélisation numérique du transfert thermique dans un toit comportant une couche de MCP..... | 9 |
| II.1 Introduction..... | 9 |
| II.2 Présentation du modèle physique de la toiture et des conditions aux limites..... | 9 |
| II.3 Modèle mathématique | 12 |
| II.3.1 Équations régissant..... | 12 |
| II.3.2. Formulation mathématique du problème de changement de phase | 13 |
| II.3.3 formulation des équations | 15 |
| Chapitre III : Résultats et discussion | 18 |
| III.1. Introduction | 18 |

| | |
|---|-----------|
| III.2. Données météorologiques de la ville de Chlef | 18 |
| III.3 Propriétés thermophysiques des matériaux du modèle physique..... | 22 |
| III.4 Résultats de simulations..... | 23 |
| III.4.1 Performances énergétiques du toit sans MCP | 23 |
| III.4.2 Performances énergétiques du toit avec MCP | 25 |
| III.4.3 Comparaison entre les deux cas | 27 |
| Conclusion générale | 28 |

Introduction générale

Introduction générale

Afin de réduire les coûts liés au confort thermique dans les bâtiments, plusieurs travaux de recherche récentes ont recommandé d'incorporer des couches de matériaux à changement de phase (MCP) dans les enveloppes des bâtiments [1, 2, 3]. Ces travaux affirment, également, que cette solution, qui repose sur la capacité de ces matériaux à stocker de l'énergie thermique lorsqu'ils fondent et à en restituer lors qu'ils se solidifient, figure parmi les solutions les plus prometteuses en termes d'efficacité et de durabilité [1, 2, 3]. De nombreuses études ont prouvé les effets bénéfiques de l'incorporation des MCP sur le confort thermique des zones climatiques chaudes [4].

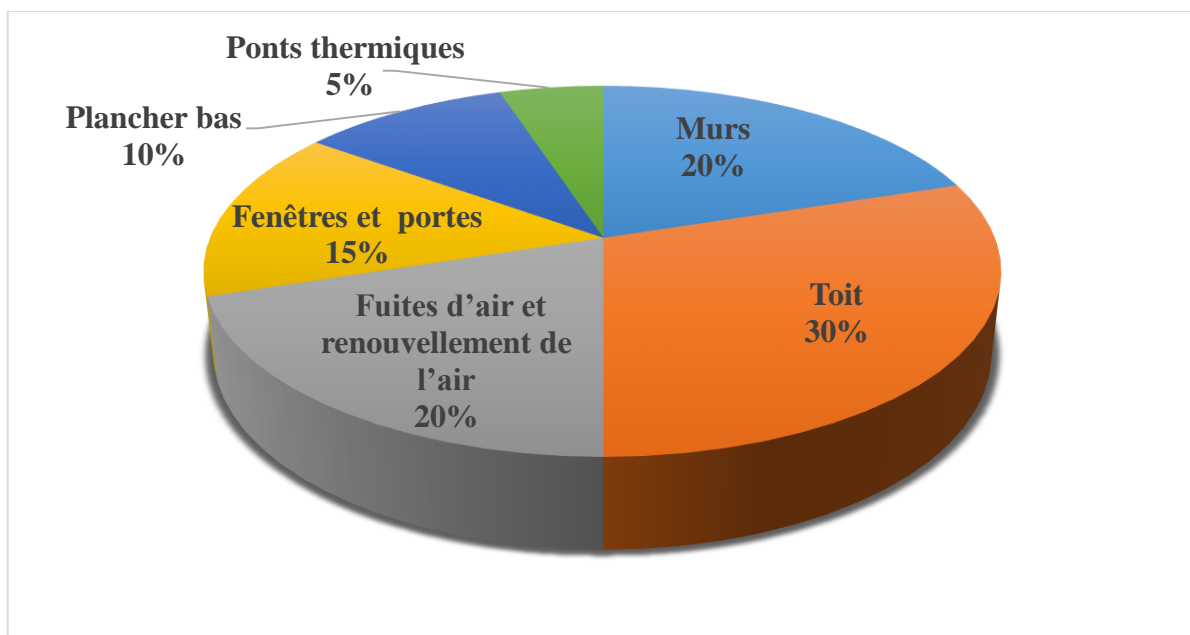


Figure 0. 1: Sources de déperditions de chaleur d'une maison [5].

La toiture est la surface du bâtiment qui est la plus exposée à l'environnement extérieur (rayonnement solaire) et qui est la plus touchée par le changement climatique [6]. En conséquence, elle est responsable d'environ de 30% des déperditions thermiques d'une maison [5]. Dans les régions arides et semi-arides de notre pays, lors de la période estivale la situation est plus critique. En effet, le gain de chaleur, surtout à travers la toiture, engendre une consommation excessive de l'énergie électrique par voie de climatisation. A titre d'exemple, à l'échelle mondiale l'énergie consommée pour la climatisation des locaux représente respectivement environ 61 % de la demande totale d'énergie dans

Introduction générale

le secteur bâtiments [7]. Certains travaux provisionnent que cette portion va augmenter de 37% en 2050 [7].

L'incorporation d'une couche de MCP dans les enveloppes des bâtiments figure parmi les stratégies adoptées les plus réussites. En effet, elle a prouvé qu'elle assure le contrôle des charges thermiques, ce qui se traduit par de remarquables économies d'énergie [7]. La performance, de cette technique, dépendent des propriétés thermophysiques du MCP, de l'emplacement de la couche de MCP, de son épaisseur, des conditions climatiques et de la position et de l'orientation du bâtiment [8] [9].

L'objectif de ce travail s'inscrit dans cette problématique et vise à étudier, numériquement, l'effet de l'intégration d'une couche de MCP dans la toiture d'un bâtiment, supposé situé à la ville de Chlef, sur ses performances énergétiques.

Ce manuscrit est structuré en trois chapitres de la manière suivante :

- La première donne un aperçu général sur les matériaux à changement de phase utilisés dans le secteur du bâtiment.
- Le deuxième est consacré à la modélisation numérique, par la méthode de différences finies, du transfert de chaleur dans la toiture
- Et enfin, les résultats obtenus et leur interprétation sont présentés dans le dernier chapitre.

Chapitre I

**Généralités sur les matériaux à
changement de phase**

Chapitre I : Généralités sur les matériaux à changement de phase

I.1 Introduction

Ces dernières années, de nombreuses études ont confirmé que l'incorporation de matériaux à changement de phase (MCP) dans les enveloppes des bâtiments a un effet positif sur les coûts associés au confort thermique de ces derniers [10]. En effet, ces matériaux offrent des solutions prometteuses en termes d'efficacité énergétique et de durabilité pour l'isolation thermique des bâtiments ; surtout dans les zones climatiques chaudes [4].

Le fonctionnement des MCP repose sur l'exploitation de transitions de phase, telles que la fusion et la solidification, qui se produisent à des températures spécifiques. Lors du passage d'une phase à une autre, les matériaux absorbent ou libèrent de la chaleur [2]. Ce sont, donc, des candidats naturels pour le stockage de l'énergie solaire. En effet, ils peuvent stocker de la chaleur pendant les périodes où elle est disponible en excès, puis la restituer lorsque cela est nécessaire [2].

I.2. Le stockage de l'énergie thermique

Le stockage d'énergie thermique implique de stocker une certaine quantité de chaleur afin de pouvoir l'utiliser ultérieurement [11]. Généralement, le stockage de la chaleur se produit par l'intermédiaire de l'un des trois mécanismes suivants : le stockage par chaleur sensible, le stockage par chaleur latente, et le stockage thermochimique (réaction chimique) [12].

I.2.1. Le stockage par chaleur sensible

Elle correspond à la quantité de chaleur conservée E produite par la variation de la température d'un corps, qu'il soit solide ou liquide, d'une température initiale T_1 à une température finale T_2 sans que son état physique ne soit modifié [13]. Elle s'exprime à l'aide de la relation suivante :

$$E = h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} m c(T) dT \quad (\text{I.1})$$

Avec :

- h L'enthalpie en $[J]$;
- m La masse en $[kg]$;
- c La capacité calorifique en $[J/kg^\circ C]$;

On peut distinguer deux situations pour le stockage sensible :

- Si $T_2 > T_1$ alors on parlera de stockage du chaud.

- Si $T_2 < T_1$ alors on parlera de stockage du froid.

Ce mode de stockage présente un intérêt lorsqu'on dispose d'un corps ayant une masse et une capacité calorifique élevées, ainsi qu'un écart de température assez considérable.

I.2.2. Le stockage par chaleur latente

La chaleur latente est la quantité de chaleur absorbée ou libérée par un corps lors d'un changement de phase physique. Le mécanisme de stockage d'énergie thermique par chaleur latente repose sur l'exploitation de ce phénomène physique.

Lorsqu'on chauffe un matériau à changement de phase (MCP) à l'état solide, une fois que sa température est égale à celle de sa fusion T_f , la transition à la phase liquide débute et sa température reste pratiquement constante. Dès que le matériau soit entièrement liquide, sa température augmente de nouveau [14], comme c'est illustré sur la figure I.1. Lors de ce changement, une quantité de chaleur est absorbée lors de ce changement. En inversant le processus, le matériau restitue la quantité de chaleur absorbée.

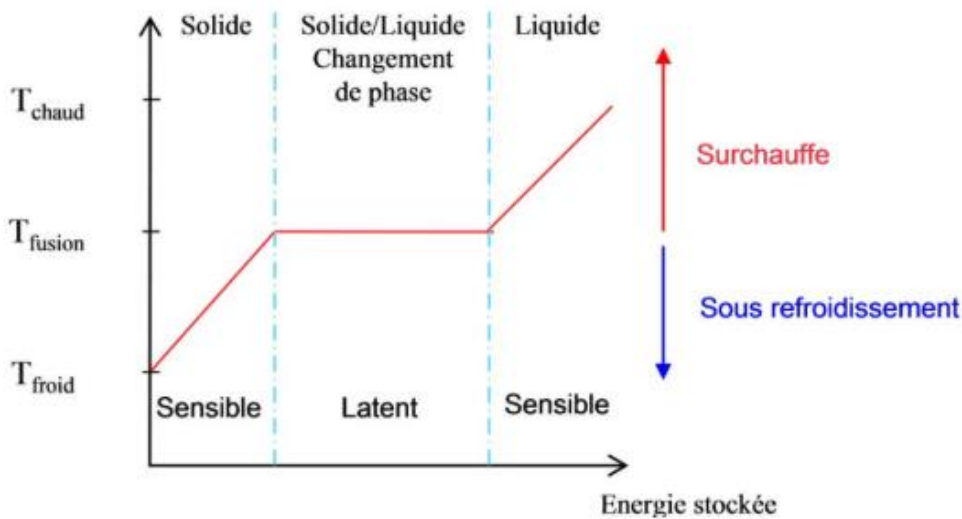


Figure I. 1: Procédés de stockage par chaleur sensible et chaleur latente [15].

Si une substance, qui se trouve initialement à une température T_1 inférieure à sa température de fusion T_f , est chauffée à une température finale T_2 , supérieure à T_f , les deux procédés de stockage interviennent successivement. Le stockage sera donc effectué sous forme de chaleur sensible dans les phases solide et liquide, ainsi que sous forme de chaleur latente dans la phase de transition. L'énergie stockée E entre les deux états initial et final a l'expression suivante [16] :

$$E = h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_f} mc_{\text{sol}}(T) dT + mL_f(T_f) + \int_{T_f}^{T_2} mc_{\text{liq}}(T) dT \quad (\text{I.2})$$

avec :

- c_{sol} Capacité thermique massique à l'état solide en $[J/kg^{\circ}C]$.
- c_{liq} Capacité thermique massique à l'état liquide en $[J/kg^{\circ}C]$.
- L_f Chaleur latente de changement de phase en $[J/kg]$.

En supposant que les capacités calorifiques des corps sont constantes alors l'équation (I.2) devient :

$$E = h_2 - h_1 = mc_{sol}(T_f - T_1) + mL_f(T_f) + mc_{liq}(T_2 - T_f) \quad (I.3)$$

Dans l'équation (I.3), le terme $m L_f$ revêt une grande importance par rapport aux autres termes de l'équation, car l'énergie stockée par chaleur sensible est inférieure à celle par chaleur latente [7]. Donc, lorsqu'il s'agit de grandes quantités d'énergie et de faibles écarts de température, ce type de stockage est extrêmement efficace pour stocker de grandes quantités d'énergie.

I.2.3 Le Stockage par voie thermochimique

Deux types de réactions sont utilisés pour le stockage thermochimique : les réactions chimiques endothermiques réversibles et les réactions de sorption.

Le déclenchement d'une réaction endothermique réversible permet de stocker de la chaleur. Pour restituer cette chaleur, il suffit d'inverser la réaction (exothermique). La figure I.2 présente une schématisation de ce type de stockage.

Les produits de réaction peuvent être stockés à température ambiante et ne subissent que peu ou pas de dégradation chimique une fois isolés. Ainsi, ce mode de stockage est généralement destiné au stockage à long terme, car, contrairement aux deux autres modes, il n'est quasiment pas affecté par la durée du stockage.

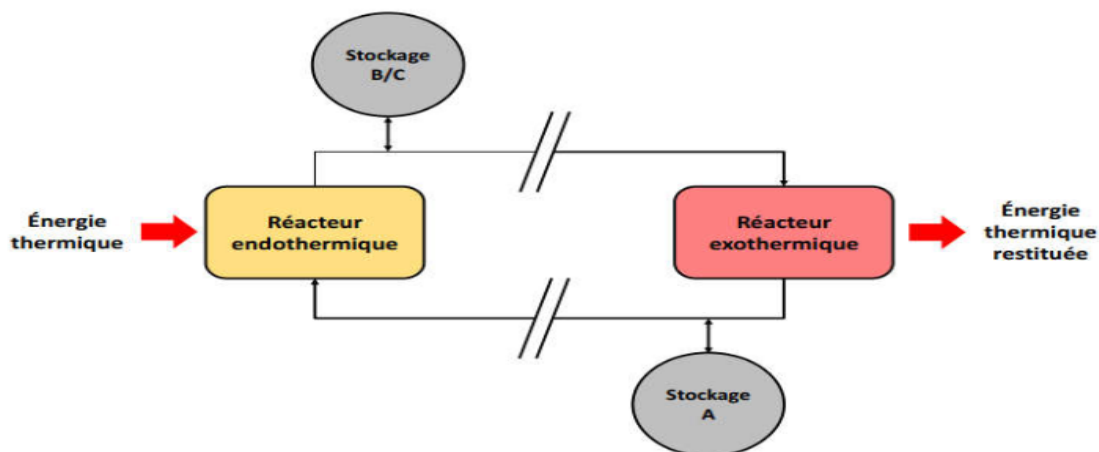


Figure I. 2: Schéma de principe d'un système de stockage par voie thermochimique [13].

I.3 Classification des matériaux à changement de phase

On distingue trois grandes familles de MCP : les composés organiques, les composés inorganiques et les mélanges eutectiques. Chacune de ces familles peut être décomposée en sous-groupes, dont les comportements physiques et chimiques très différents influent sur la conception du système de stockage [17].

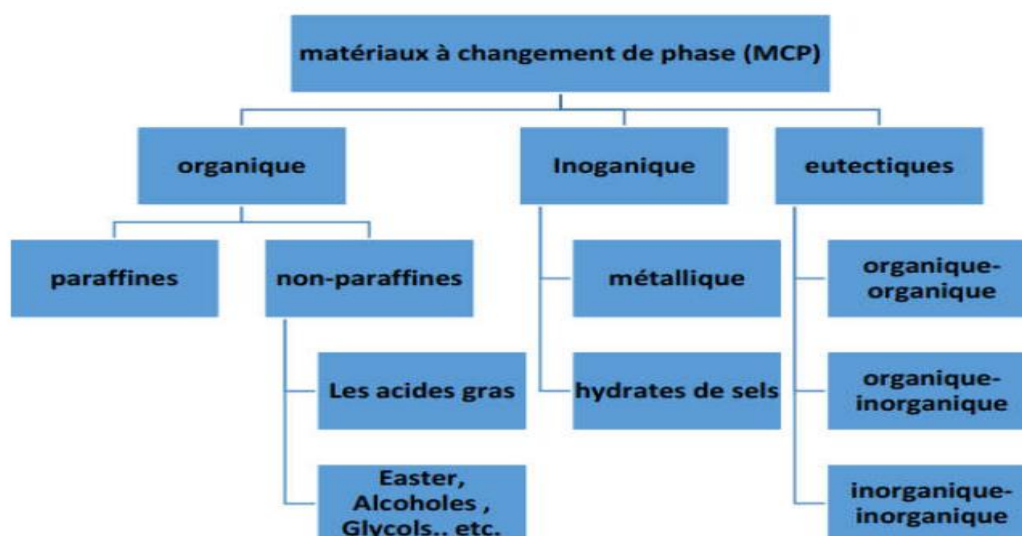


Figure I. 3: Classification des matériaux à changement de phase [17].

I.3.1 Les matériaux inorganiques

Les matériaux inorganiques, tels que les solutions aqueuses de sel, les sels hydratés, les mélanges de sels et les mélanges de métaux, sont destinés au stockage à des températures moyennes et élevées, en effet, ils ont des plages de température de fusion allant de -100 °C à $+1000\text{ °C}$.

Tableau I. 1: Propriétés physiques de quelques hydrates salins [9].

| composé | Température de fusion (°C) | L (kJ/kg) | Conductivité thermique ($\text{w.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$) | | Densité (kg.m^{-1}) | |
|---|----------------------------|-----------|--|-----------------|--------------------------------|-------------|
| | | | Liquide | Solide | Liquide | Solide |
| H ₂ O | 0 | 333 | 0.612(20°C) | | 988(20°C) | 917(0°C) |
| CaCl ₂ .6H ₂ O | 29 | 190.8 | 0.540 (38.7°C) | 1.088 (23°C) | 1562 (32°C) | 1802(24°C) |
| Mg Cl ₂ . 6H ₂ O | 89 | 192.8 | 0.490 (95°C) | 0.611 (37°C) | 1550 (94°C) | 1636 (25°C) |
| Mg Cl ₂ . 6H ₂ O | 117 | 168.6 | 0.570 (120°C) | 0.694 (90°C) | 1450 (120°C) | 1569(20°C) |

Ces matériaux possèdent une chaleur latente importante ainsi qu'une haute conductivité thermique [13]. De plus, ils présentent l'avantage d'être disponible, non inflammable et abordables en termes d'investissement [13]. En revanche, ils peuvent engendrer certains problèmes comme la ségrégation, la corrosion et la surfusion.

I.3.2 Les MCP organiques

Les matériaux organiques les plus rencontrés, dans le domaine de stockages de l'énergie, sont les paraffines, les non-paraffines et les acides gras. Ils ont, généralement, une température de fusion comprise entre 0°C et 150° C [13].

Comparés aux MCP inorganiques ils ont une conductivité thermique et une chaleur latente de fusion plus faibles, de plus, ils sont inflammables. Ils présentent, en revanche, le majeur avantage d'être utilisable sur une large plage de températures et d'être compatible avec les matériaux de construction traditionnels. Dans la plupart des cas, ils sont non réactifs et peuvent être recyclés [13].

I.3.3 Les MCP Eutectiques

Il s'agit généralement d'un mélange de PCM organiques et inorganiques. Il se compose de plusieurs PCM purs. Ces matériaux présentent deux avantages majeurs : un point de fusion net similaire à une substance pure et des chaleurs latentes légèrement supérieures à celles des composés organiques purs. En pratique, il existe peu de données sur les propriétés thermiques de ces matériaux et ils sont, rarement, utilisés dans les systèmes industriels [13]. Le tableau I.2 donne les propriétés thermophysiques de quelques MCP organiques et eutectiques.

Tableau I. 2: Caractéristiques de quelques MCP organiques et eutectiques [5].

| Type de substance | composé | Température de fusion (°C) | Chaleur latente (kJ/kg) | Conductivité thermique (w.m-1k-1) | | Densité (kg.m ⁻¹) | |
|-----------------------|-------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-------------------|-------------------------------|-------------|
| | | | | Liquide | solide | Liquide | solide |
| Substances organiques | Paraffine C21-C50 | 66-68 | 189 | – | 0.21 | 930 (70°C) | 830 (20°C) |
| | Naphtalène | 80 | 147.7 | 0.132 (83.8°C) | 0.341 s, (43,9°C) | 976 (84°C) | 1145 (20°C) |
| Eutectique organique | | 67 | 123.4 | 0.130 (100°C) | 0.282 (38.5°C) | – | – |
| Acides gras | Acide caprique | 32 | 152.7 | 0.153 (38.5°C) | – | 878 (45°C) | – |
| | Acide stéarique | 69 | 202.5 | 0.172 (70°C) | – | – | 965 (24°C) |

I.4. Comparaison entre différents types de MCP

Le tableau I.3 donne une comparaison entre les trois familles des matériaux de changement de phase utilisés dans le domaine de stockage thermique. En donnant pour chaque famille, les principaux avantages et inconvénients.

Tableau I. 3: Comparaison entre les trois familles de MCP [18].

| MCP | Avantages | Désavantages |
|---------------------|---|---|
| Organiques | <ul style="list-style-type: none"> • Disponibles dans une large gamme de température • Pas de surfusion • Chimiquement stables • Haute énergie de fusion • Non Corrosifs • Simple d'utilisation | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Faible conductivité thermique ➤ Chaleur latente faible ➤ Peut-être inflammable ➤ Coût élevé. ➤ Masse faible. |
| Inorganiques | <ul style="list-style-type: none"> • Chaleur latente élevée. • Faible coût. • Point de fusion nette • Non- inflammable. • Forte conductivité thermique. • Chaleur spécifique massique élevée. | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Phénomène de surfusion ➤ Agent de nucléation étranger indispensable ➤ Corrosifs pour la plupart des métaux ➤ Vieillessement rapide |
| Eutectiques | <ul style="list-style-type: none"> • Point de fusion nette Similaire à une substance pure. • Chaleur latente légèrement supérieures à celle des composés organiques purs. | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Peu de données disponibles sur les propriétés de ces matériaux. ➤ Peu utilisés au niveau des applications industrielles. |

Chapitre II

Modélisation numérique du transfert thermique dans un toit comportant une couche de MCP

Chapitre II : Modélisation numérique du transfert thermique dans un toit comportant une couche de MCP

II.1 Introduction

L'intégration d'une couche de MCP dans les enveloppes des bâtiments est une technique prometteuse visant à assurer une régulation thermique passive, favorisant, ainsi, une réduction de la consommation énergétique. L'étude de l'efficacité de cette technique passe par des essais de laboratoire et des simulations numériques.

Les méthodes numériques sont utiles pour résoudre les problèmes de dynamique des fluides, de transfert de chaleur et de masse et d'autres équations aux dérivées partielles de la physique lorsque ces problèmes ne peuvent pas être traités par des techniques d'analyse exactes en raison de non-linéarités, de géométries complexes et de conditions aux limites compliquées [18]. Actuellement, la méthode des différences finies (MDF), la méthode des volumes finis (MVF) et la méthode des éléments finis (MEF) sont largement utilisées pour la solution des équations aux dérivées partielles de transfert de chaleur, de masse et de quantité de mouvement [18].

La MDF par rapport aux deux autres méthodes présente l'avantage d'être facile à manipuler, mais souvent elle est appliquée à des problèmes d'ingénierie de géométries, plus ou moins, simples [18]. Cependant, l'avènement des approches de génération de grille numérique, le FDM est devenu comparable au MEF dans le traitement des géométries irrégulières, tout en conservant la simplicité du MDF standard [18].

Dans ce travail la méthode de différences finies est choisie pour modéliser le problème de transfert thermique dans un toit avec est sans couche de PCM.

II.2 Présentation du modèle physique de la toiture et des conditions aux limites

Pendant la période estivale, on observe une forte augmentation de température susceptible de nuire au confort thermique des occupants dans différentes habitations. Ces conditions génèrent des gains de chaleur à l'intérieur très conséquents, surtout dans les régions chaudes, sachant que dans notre pays plus de 85 % de sa surface totale est caractérisée par un climat chaud et sec [19]. En matière de déperditions thermiques d'une maison, le maillon faible est la toiture. En effet, elle est responsable d'environ de 30% de ces déperditions [20].

Les deux modèles physiques du toit, étudiés dans ce travail, afin de mettre en évidence l'amélioration escomptée, par l'intégration du PCM, en terme de coût de confort thermique sont inspirés du travail

de Y. Huang et al [10]. Le premier, voir figure II.1, est une toiture sans PCM de 19 cm d'épaisseur constituée d'une couche de béton de 150 mm d'épaisseur, entre deux couches (extérieure et intérieure) mortier de même épaisseur [10]. Alors que dans le deuxième modèle, une couche de PCM, de 1,5 cm d'épaisseur, est placée entre la couche extérieure de mortier et la couche de béton, comme c'est illustré sur la figure II.2.

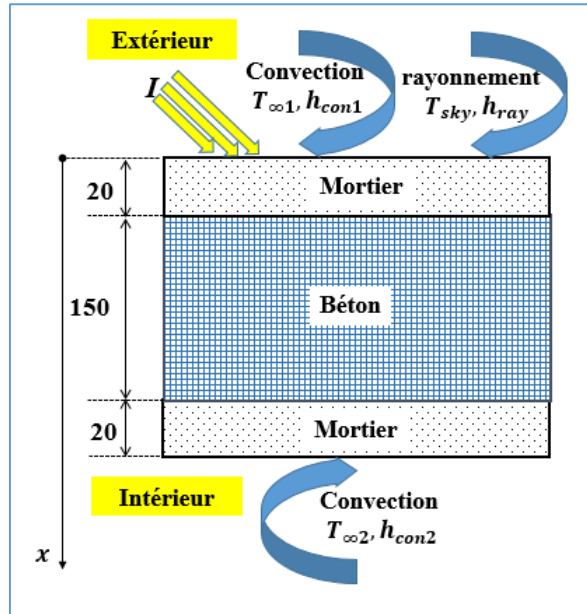


Figure II. 1: une toiture sans MCP [10].

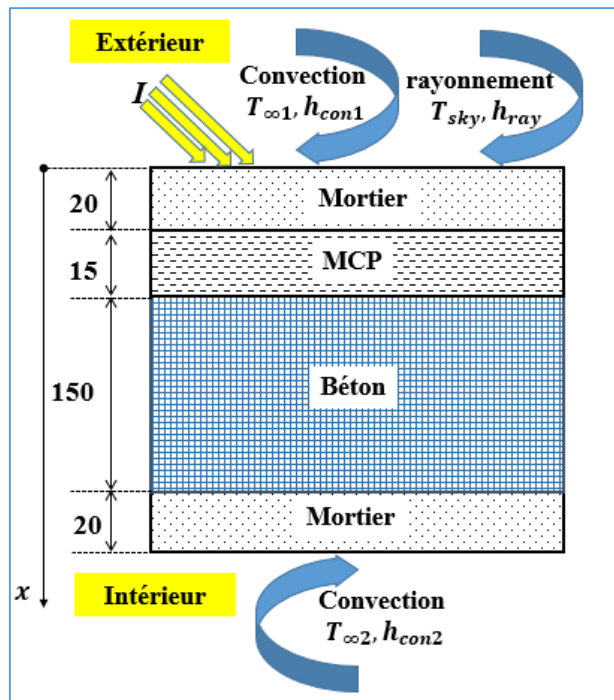


Figure II. 2: Une toiture avec MCP [10].

La face extérieure (supérieure) du toit, est soumise à un échange convectif, caractérisé par $(h_{conv1}, T_{\infty1})$, un échange radiatif, caractérisé par (h_{ray}, T_{sk1}) et une fraction de l'énergie solaire incidente. Ce qui se traduit par la relation suivante [10, 21]:

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \alpha I + h_{conv1}(T_{\infty1} - T_{x=0}) + h_{ray}(T_{sk1} - T_{x=0}) \quad (\text{II.1})$$

Où :

- I : l'irradiation solaire reçue par le toit.
- α : l'absorptivité du toit, dans ce travail elle est égale à 0.6 [10, 21]. Ainsi, le produit αI représente l'énergie absorbée par la surface extérieure du toit.
- h_{conv1} : Coefficient d'échange convectif côté extérieur, il est calculé à l'aide de l'expression suivante [21] :

$$h_{conv1} = \begin{cases} 6 + 4V & \text{si } V \leq 5 \text{ m/s} \\ 7.4V^{0.78} & \text{si } V > 5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

Où V est la vitesse de l'air ambiant extérieur en m/s.

- $T_{x=0}$: Température à la face extérieure du toit.
- $T_{\infty1}$: Température ambiante du milieu extérieur.
- T_{sk} : la température apparente du ciel, calculée sur la base de $T_{\infty1}$ à l'aide de la relation suivante [10, 21]:

$$T_{sk} = 0.0552T_{\infty1}^{1.5} \quad (\text{II.3})$$

- h_{ray} : Coefficient d'échange par rayonnement côté extérieur, il est calculé à l'aide de l'expression suivante [10, 21]:

$$h_{ray} = \varepsilon \sigma (T_{sk}^2 + T_{x=0}^2)(T_{sk} + T_{x=0}) \quad (\text{II.4})$$

Avec:

- ε est l'émissivité ($\varepsilon = 0.85$) [10].
- σ est la constante de Stefan-Boltzmann : $\sigma = 5.675 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

La condition aux limites pour la surface inférieure du toit s'exprime par la relation suivante [10, 22]:

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = h_{conv2}(T_{x=L} - T_{\infty2}) \quad (\text{II.5})$$

Où :

- h_{conv2} : Coefficient d'échange convectif côté intérieur.
- $T_{x=L}$: Température à la face intérieure du toit.

- $T_{\infty 2}$: Température ambiante du milieu intérieur.

La littérature présente de nombreuses formules pour le calcul du coefficient h_{conv2} . Dans le cadre de ce travail, c'est l'équation présentée par [22] basée sur des calculs expérimentaux qui sera retenue :

$$h_{conv2} = \frac{1.823}{D^{0.121}} (T_{x=L} - T_{\infty 2}) \quad (\text{II.6})$$

Où D est le diamètre hydraulique qui est calculé en supposant un toit carré de 3 m, à l'aide de la relation suivante [22] :

$$D = \frac{4S}{P} \quad (\text{II.7})$$

S représente l'aire de la section de passage et P le périmètre de cette section.

II.3 Modèle mathématique

Le transfert de chaleur sur le toit est tridimensionnel. Cependant, l'épaisseur du toit est, nettement, inférieure à ces deux autres dimensions. Par conséquent, le transfert de chaleur dans le sens de la longueur et de la largeur a peu d'impact sur la distribution de la température dans le toit [10]. Ainsi, Le processus de transfert de chaleur est un transfert de chaleur unidimensionnel dans la direction normale (perpendiculaire à la surface) du toit.

Afin d'établir un modèle Mathématique simple du problème, il est nécessaire d'effectuer un certain nombre d'hypothèses décrivant le problème physique. Dans ce cas, celles retenues sont :

- MCP initialement à l'état solide ;
- La propagation de la chaleur dans le toit se fait uniquement par conduction ;
- Le transfert est unidirectionnel ;
- La variation du volume dans le MCP lors de la transition de phase est négligeable.
- La résistance thermique entre les couches est négligeable.

II.3.1 Équations régissant

En adoptant les hypothèses simplificatrices du précédent paragraphe, les équations régissant le transfert de chaleur et de masse dans un toit avec une couche de MCP sont écrites. Le transfert de chaleur est régi par le mode de conduction pour les deux modèles physiques étudiés :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \vec{\nabla} T) + s \quad (\text{II.8})$$

Pour un matériau homogène et isotrope et en absence de source de chaleur interne ($s=0$), l'équation (II.1), pour la conduction unidirectionnelle, se réduit à:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (\text{II.9})$$

II.3.2. Formulation mathématique du problème de changement de phase

La formulation mathématique des problèmes de changement de phase a précédemment été composée d'équations de conduction thermique transitoire pour les phases solide et liquide, d'une équation de bilan énergétique d'interface et de conditions limites et initiales appropriées. Dans ces formulations, la température est la seule variable dépendante et la position de l'interface solide-liquide doit être déterminée en tant que partie de la solution. Ainsi, un suivi attentif de la position de l'interface est essentiel pour une solution précise du problème.

Bien qu'il existe plusieurs méthodes numériques pour résoudre les problèmes de changement de phase dans la littérature [18], la méthode de l'enthalpie et celle de la capacité thermique apparente sont les plus courantes [23]. Dans cette étude, nous avons choisi la méthode de l'enthalpie pour éviter la divergence de la méthode de capacité apparente observée dans la zone de transition de chaleur latente élevée [23].

II.3.2.1 La méthode enthalpique

Avec l'introduction de la méthode enthalpique, le problème du changement de phase devient plus simple. C'est une méthode qui nous permet de déterminer le champ de température sans connaître la progression temporelle du front de température dans le temps. Par conséquent, elle nous permet de résoudre les problèmes de changement de phase, en présence d'une zone pâteuse, pour des géométries complexes [23]. Pour la résolution des problèmes de Stefan, c'est l'une des méthodes à domaine fixe les plus populaires [24].

Pour un processus de changement de phase qui implique soit la fusion ou la solidification, la conservation de l'énergie peut être exprimée en termes d'enthalpie totale et de température pour des propriétés thermophysiques constantes, comme suit [24, 25]:

$$\frac{\partial H(t)}{\partial t} = \nabla(\lambda_p(\nabla T)) \quad (\text{II.10})$$

avec:

- H est l'enthalpie volumétrique totale, en $[\text{J}/\text{m}^3]$;

- t est le temps, en [s] ;
- λ_p est la conductivité thermique du MCP à la phase p , en [W/m°C] ;
- T est la température en [°C].

L'enthalpie volumétrique totale est la somme de la chaleur sensible et latente du MCP, c'est-à-dire :

$$H(t) = h(t) + \rho_l f(t)L_f \quad (\text{II.11})$$

Où

- h est l'enthalpie volumétrique sensible, en [J/m³] ;
- ρ_l est la masse volumique du MCP à l'état liquide, en [kg/m³];
- f est la fraction massique fondue ; et L_f est la chaleur latente de fusion, en [J/kg].

Pour un changement de phase isotherme, la fraction massique du MCP fondue est donnée comme suit [24]:

$$f = \begin{cases} 0, & \text{si } T < T_f \text{ (solide)} \\ 0 \text{ à } 1, & \text{si } T = T_f \text{ (mélange)} \\ 1, & \text{si } T > T_f \text{ (liquide)} \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Des équations (II.11) et (II.12), on peut déduire que l'enthalpie volumétrique totale du MCP a l'expression suivante [24] :

$$H = \int_{T_f}^T \rho_s c_s dT, \quad T < T_f \text{ (solide)} \quad (\text{II.14})$$

$$H = \rho_l f L_f, \quad T = T_f \text{ (mélange)} \quad (\text{II.15})$$

$$H = \int_{T_f}^T \rho_l c_l dT + \rho_l L_f \quad T > T_f \text{ (liquide)} \quad (\text{II.16})$$

En se basant sur ces trois dernières relations, selon la phase la température se calcule à l'aide de l'une des trois relations suivantes [24] :

$$T = T_f + \frac{H}{\rho_s c_s}, \quad H < 0 \text{ (solide)} \quad (\text{II.17})$$

$$T = T_f, \quad 0 \leq H \leq \rho_l L_f \text{ (mélange)} \quad (\text{II.18})$$

$$T = T_f + \frac{(H - \rho_l L_f)}{\rho_l c_l}, \quad H > \rho_l L_f \text{ (liquide)} \quad (\text{II.19})$$

II.3.2.2 Discrétisation par la méthode des différences finies

La méthode de différences finies est une méthode numérique qui permet de résoudre les équations différentielles partielles. Cette méthode évalue les dérivées partielles d'une fonction en utilisant un nombre fini de valeurs de cette même fonction en points voisins, en espace ou en temps. Cela permet de s'assurer que le domaine est traité en utilisant une grille qui contient les nœuds.

Dans ce travail, pour la résolution numérique de la formulation enthalpique par la méthode des différences finies, le modèle physique est subdivisé en n segments égaux, chacun de largeur $\Delta x = l/n$.

En utilisant le schéma explicite, l'équation (II.10) est discrétisée au point $x_i (x_i = i \Delta x)$ à l'instant t_k ($t_k = k \Delta t$) de la façon suivante :

- La dérivée première temporelle est approximée à l'aide des différences finies décentrées aval à 2 points d'ordre 1 ;
- La dérivée seconde spatiale temporelle est estimée à l'aide des différences finies centrées à 3 points d'ordre 2.

Ainsi, la forme discrète de l'équation (II.11) par le schéma explicite est la suivante [18]:

$$\frac{H_i^{k+1} - H_i^k}{\Delta t} = \lambda_p \frac{T_{i+1}^k - 2T_i^k + T_{i-1}^k}{\Delta x^2} \quad (\text{II.20})$$

- H_i^k : représente l'enthalpie volumétrique totale $H(x_i, t_k)$ au nœud x_i à l'instant t_k ,
- T_i^k : est la température $T(x_i, t_k)$ au nœud x_i à l'instant t_k ,
- Δt : pas de temps,
- Δx : pas de l'espace.

Il est à signaler que le schéma explicite, donné par l'équation (II.20), doit vérifier la condition de stabilité suivante [18]:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x^2} \leq \frac{c_p \rho_p}{\lambda_p} \quad (\text{II.21})$$

II.3.3 formulation des équations

L'algorithme de la méthode enthalpique explicite, utilisée dans le cadre de ce travail, comporte, pour une période donnée de durée t_D , les étapes suivantes [18]:

1. L'initialisation $k=0$: permet de calculer les enthalpies volumétriques totales à chaque nœud H_i^0 à partir des conditions initiales.

2. Le calcul des enthalpies volumétriques totales à chaque nœud H_i^{k+1} en se servant de la relation (II.20).
3. Le calcul des températures à chaque nœud T_i^{k+1} en utilisant la relation appropriée parmi les trois relations (II.17), (II.18) et (II.19).
4. Si $k \leq \frac{t_D}{\Delta t}$, il mettre $k=k+1$ et aller à 2), sinon stop.

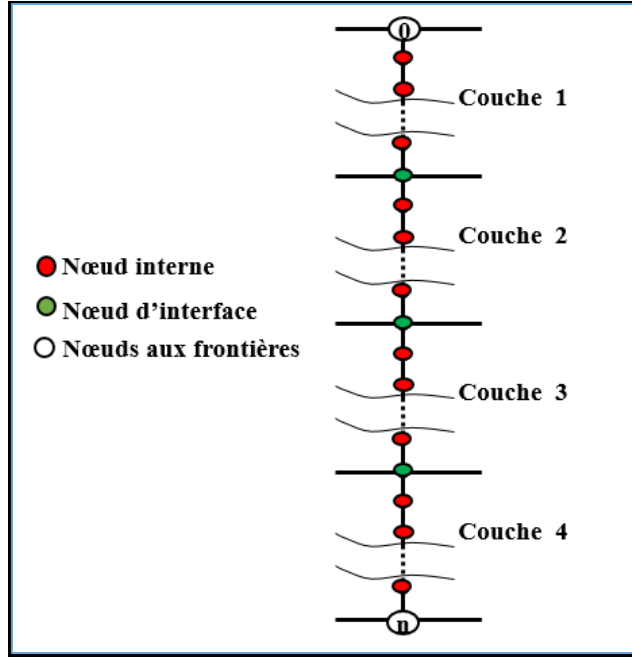


Figure II. 3: Les trois types de nœuds issus de la discrétisation de la toiture.

La formulation de différence finie des nœuds internes est obtenue directement à partir de l'équation (II.20) :

$$H_i^{k+1} = H_i^k + \left(\frac{\lambda_p \Delta t}{\Delta x^2}\right) (T_{i-1}^k - 2T_i^k + T_{i+1}^k) \quad (\text{II.22})$$

Pour les deux nœuds de frontières, l'application des conditions aux limites conduit aux deux relations suivantes :

$$H_0^{k+1} = H_0^k + \left(\frac{2\lambda_b \Delta t}{\Delta x^2}\right) T_1^k - \left(\frac{2\lambda_b \Delta t}{\Delta x^2} + \frac{2h_{conv1} \Delta t}{\Delta x} + \frac{2h_{ray} \Delta t}{\Delta x}\right) T_0^k + \left(\frac{2\Delta t}{\Delta x}\right) (h_{conv1} T_{\infty 1} + h_{ray} T_{sk} + \alpha I) \quad (\text{II.23})$$

$$H_n^{k+1} = H_n^k + \left(\frac{2\lambda_b \Delta t}{\Delta x^2}\right) T_{n-1}^k - \left(\frac{2\lambda_b \Delta t}{\Delta x^2} + \frac{2h_{conv2} \Delta t}{\Delta x}\right) T_n^k + \left(\frac{2\Delta t}{\Delta x}\right) (h_{conv2} T_{\infty 2}) \quad (\text{II.24})$$

Pour un nœud d'interface qui se trouve entre les deux couches A et B, l'équation (II.20) devient :

$$H_i^{k+1} = H_i^k + \left(\frac{\lambda_A \Delta t}{\Delta x^2}\right) T_{i-1}^k - \left(\frac{\Delta t}{\Delta x^2}\right) (\lambda_A + \lambda_B) T_i^k + \left(\frac{\lambda_B \Delta t}{\Delta x^2}\right) T_{i+1}^k \quad (\text{II.25})$$

Pour un nœud interne qui appartient à la couche de MCP, il faut d'abord déterminer la fraction massique fondue en utilisant l'expression suivante :

$$f_i^k = \begin{cases} 0, & \text{si } H_i^k < 0 \\ \min\left(1, \frac{H_i^k}{\rho_l L_f}\right) & \text{si } H_i^k > 0 \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

Puis la conductivité thermique du MCP à ce nœud est calculé comme suit :

$$\lambda_i^k = (1 - f_i^k)\lambda_s + f_i^k\lambda_l \quad (\text{II.27})$$

Enfin, l'enthalpie volumétrique sensible correspondante est calculée à l'aide de la relation suivante :

$$H_i^{k+1} = H_i^k + \left(\frac{\lambda_{i-1}^k \Delta t}{\Delta x^2}\right) T_{i-1}^k - \left(\frac{\Delta t}{\Delta x^2}\right) (\lambda_{i-1}^k + \lambda_{i+1}^k) T_i^k + \left(\frac{\lambda_{i+1}^k \Delta t}{\Delta x^2}\right) T_{i+1}^k \quad (\text{II.28})$$

Chapitre III

Résultats et discussion

Chapitre III : Résultats et discussion

III.1. Introduction

La consommation d'énergie électrique pendant la période estivale en Algérie est un défi important. En effet, selon l'opérateur du système électrique les trois records de Puissance Maximale Appelée sur le réseau interconnecté national ont été enregistrés durant cette période [26] (voir figure III.1). Cette forte demande en énergie électrique est due aux températures élevées et les sécheresses intenses augmentant, ainsi, le recours à la climatisation. Les incendies, qui peuvent être exacerbés par les conditions climatiques, aggravent, fortement, la situation.

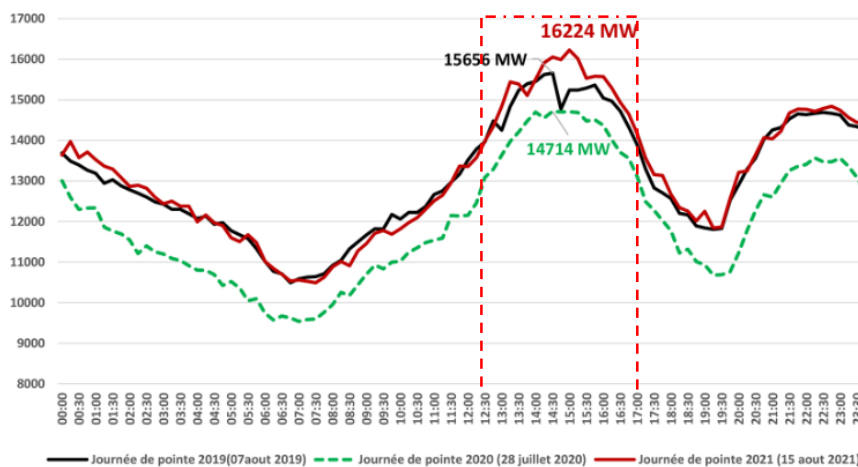


Figure III. 1 : Evolution de la demande en énergie électrique en Algérie [27].

La figure III.1 montre que le pic de la consommation journalière est enregistré de 12h30 et 17h00, ce qui indique, clairement, que la plupart de l'énergie consommée est destinée à la climatisation. Afin d'alléger les factures de confort thermique, il est primordial de réduire les gains thermiques dans les enveloppes des immeubles. La toiture est responsable, d'environ, de 30% des déperditions thermiques [28]. Ce travail, cherche à étudier l'amélioration des performances énergétiques escomptées par l'incorporation d'une couche de MCP dans le toit d'un building.

Dans ce chapitre, les principaux résultats de simulations, des deux cas étudiés (toiture sans MCP, toiture avec MCP), issus d'un script élaboré, sous l'environnement Matlab, seront présentés.

III.2. Données météorologiques de la ville de Chlef

Le climat du Chlef est semi-aride qui se caractérise par des étés chauds et secs peu orageux et des hivers doux et humides [29]. La figure III.2 illustre les moyennes de températures minimales et maximales enregistrées à cette ville au cours de l'année.

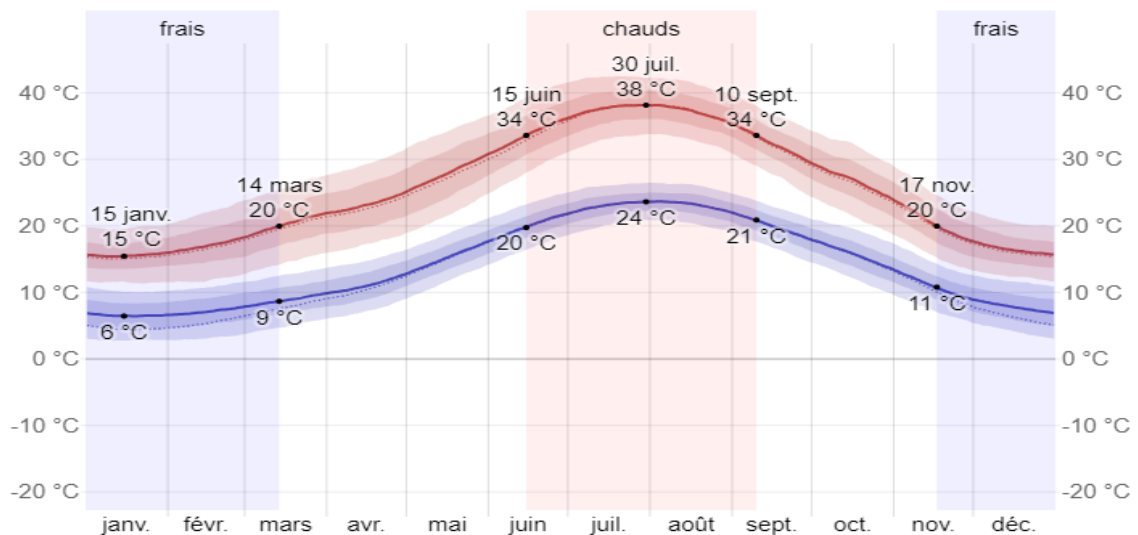


Figure III. 2:Température moyenne maximale et minimale à Chlef [27].

Le logiciel « Meteonorm 8 » est utilisé, dans ce travail, pour estimer les données météorologiques afin de générer les conditions aux limites du paroi supérieure de la toiture. Pour ce faire, il est nécessaire d'introduire :

- Les coordonnées GPS (Latitude et longitude) de la ville.
- L'orientation appropriée du plan, pour notre étude l'orientation sud est choisie.
- L'inclinaison du plan.

Cette estimation, qui est basée sur les données antérieures, a donné les valeurs recherchées à chaque minute. Nous avons pris en compte les données d'une période de 54 heures de durée de la période estivale. Cette période a lieu du minuit (00h00min) du 12 Août 2023 à six heures du matin du 14 Août 2023 (06h00min).

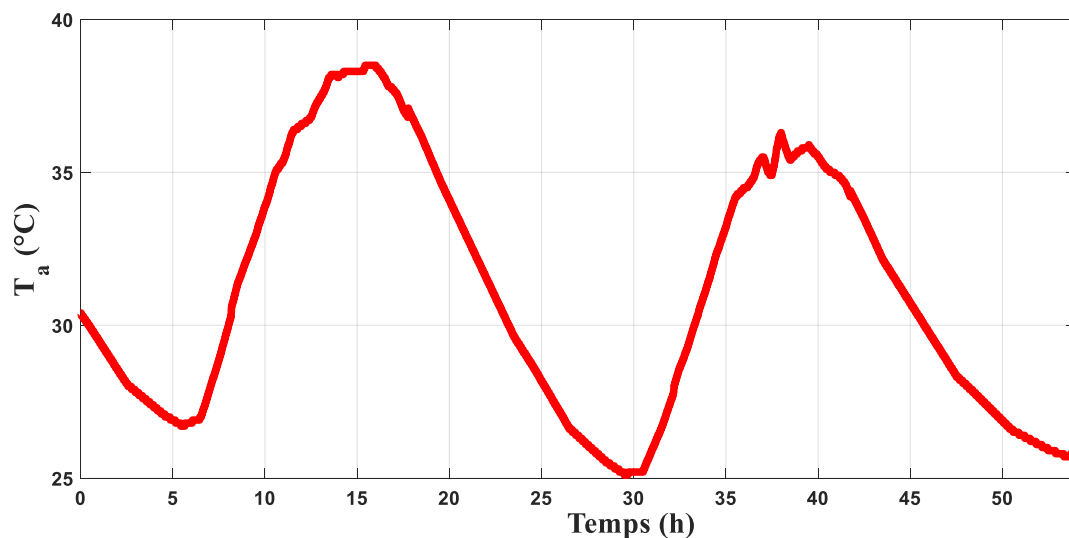


Figure III. 3:Variation de la température ambiante en fonction du temps.

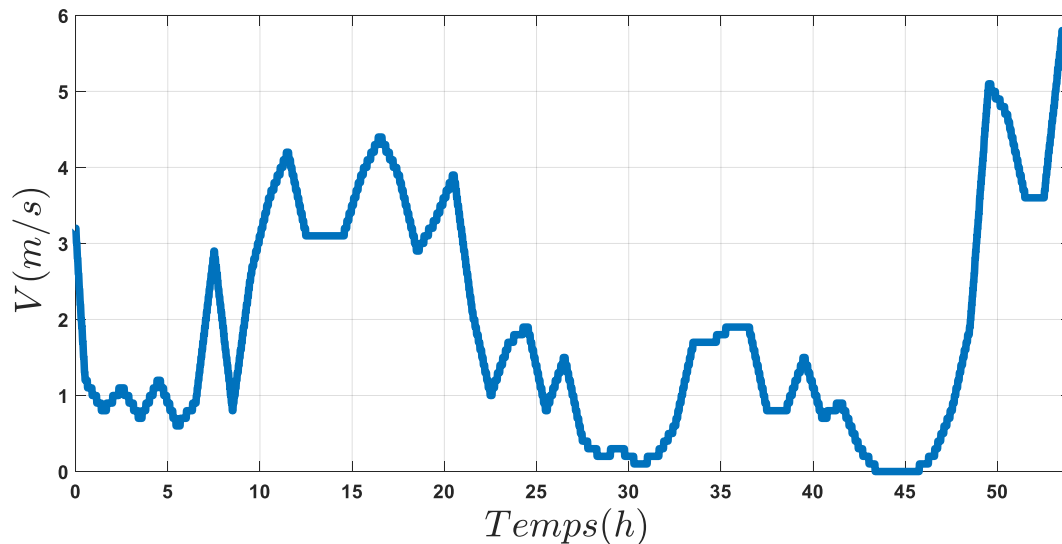


Figure III. 4: Variation de la vitesse du vent en fonction du temps.

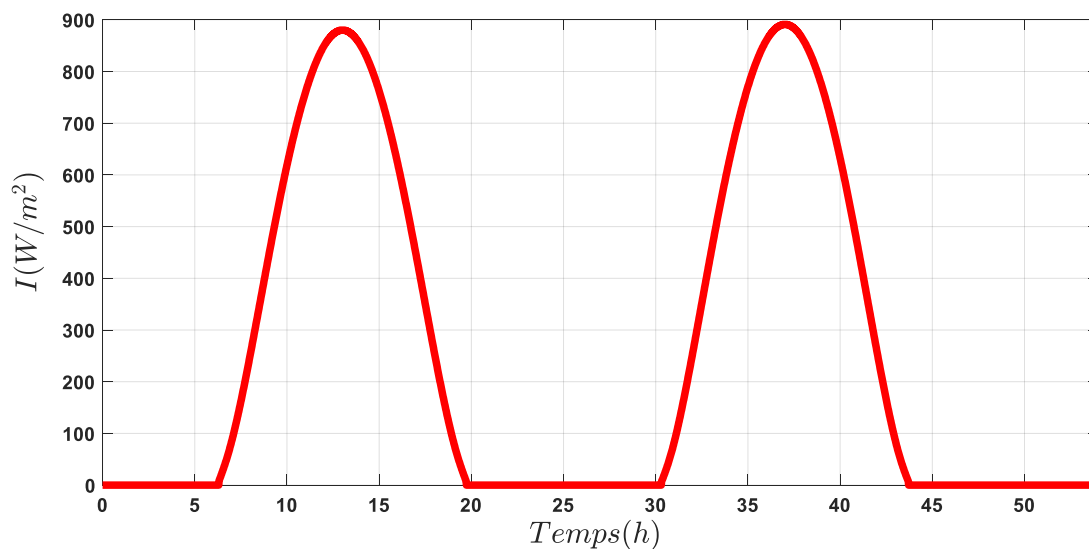


Figure III. 5: Variation du flux du rayonnement solaire intercepté par le toit en fonction du temps.

Les figures III.3 et III.4 donne, respectivement, les variations de température ambiante et de vitesse du vent durant de la période étudiée. La température maximale durant la première journée est de 38.5°C alors que dans la deuxième journée elle vaut 36.3°C . les plus grandes valeurs de températures sont enregistrées de 14h à 17h. La première journée enregistre aussi les plus grandes valeurs des vitesses du vent par rapport à la deuxième. Mais les plus grandes valeurs sont obtenues de 04h00 à 06h00 de la troisième journée, où la plus grande valeur est d'environ 6m/s. Les allures de ces deux courbes se concordent avec celles qui sont données par le site de données métrologique du « WeatherSpark » [27] .

La figure III.5 présente la variation du flux du rayonnement solaire intercepté par la toiture *pendant* la période étudiée. Les valeurs maximales, pour les deux journées, sont enregistrées de 13h à 13h15min, où la plus grande valeur est de l'ordre de 900 W/m^2 .

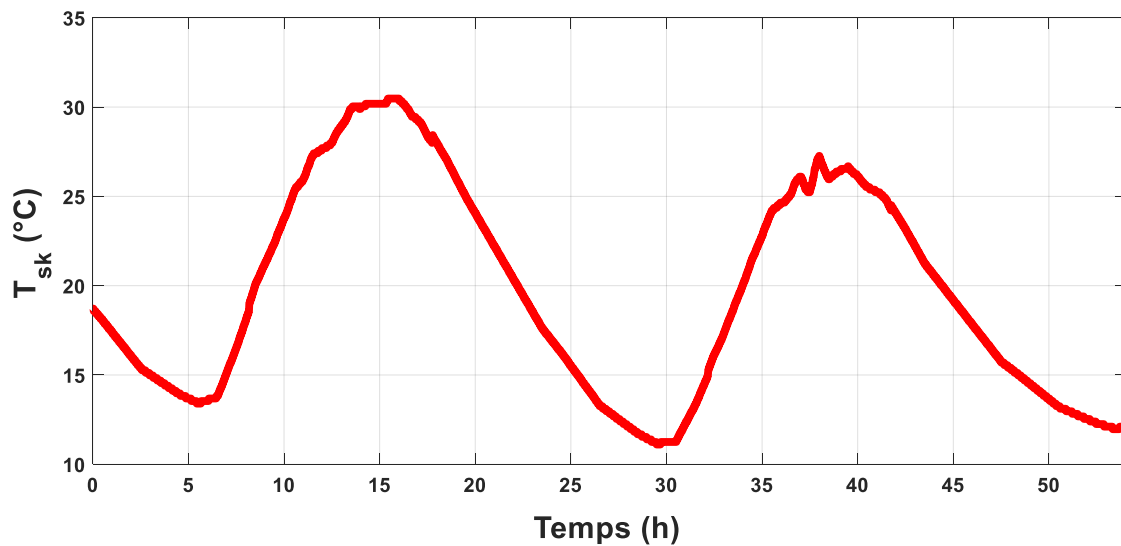


Figure III. 6: Variation de la température apparente du ciel en fonction du temps.

La variation de la température apparente du ciel en fonction du temps est illustrée dans la figure III.6 pour la période étudiée. L'allure de cette courbe est, logiquement, semblable à celle de la variation de la température ambiante, donnée par la figure III.3, du fait qu'elle est calculée sur la base de cette dernière à l'aide de la formule II.3.

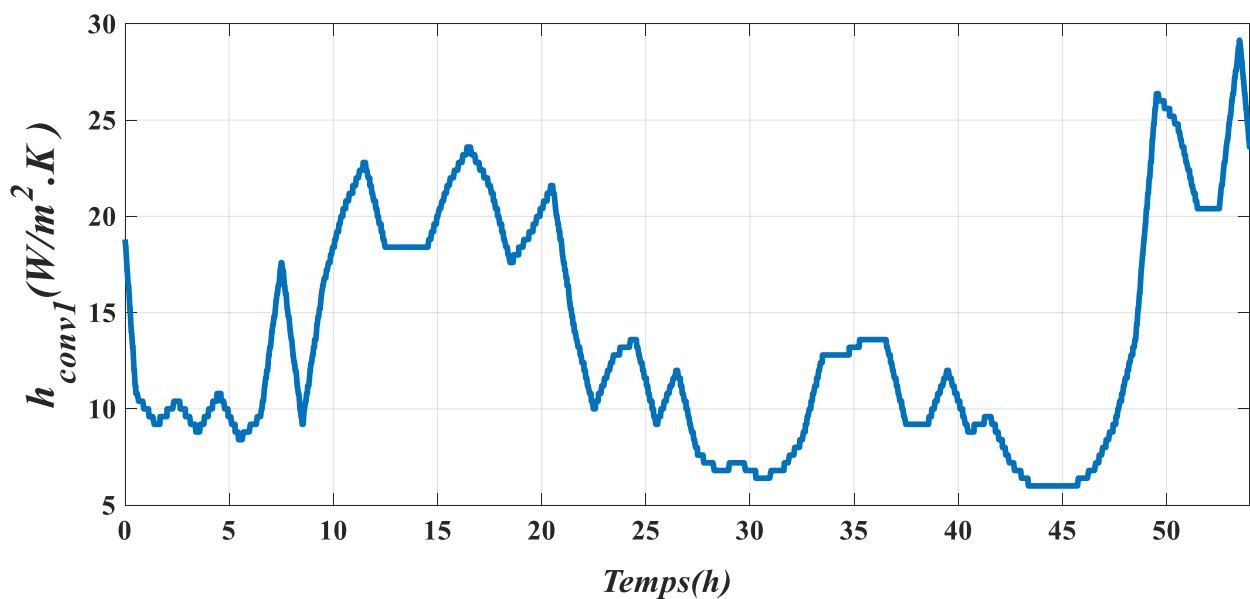


Figure III. 7: Variation du coefficient convectif externe en fonction du temps.

La figure III.7 présente la variation du coefficient de convection externe h_{conv1} en fonction du temps. La valeur maximale est égale à $29.16 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, la valeur minimale est égale à $6 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ et la valeur moyenne de ce coefficient, pour la période étudiée est égale à $13.49 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$.

III.3 Propriétés thermophysiques des matériaux du modèle physique

Le modèle physique étudié de la toiture avec MCP, présenté dans le deuxième chapitre, comporte quatre couches : béton, deux couches de mortier et une couche de MCP. Dans cette étude, on a opté pour choisir, comme MCP la paraffine RT31. Ce choix est motivé par les arguments suivants [10, 30]:

- Une Température de fusion adaptée ($T_f = 31^\circ\text{C}$),
- Une bonne chaleur latente ($L_f = 170 \text{ kJ/kg}$),
- Le stockage et la libération de chaleur s'effectuent à des températures relativement constantes
- Pas d'effet de surfusion,
- Chimiquement inerte.
- Produit longue durée, avec des performances stables tout au long des cycles de changement de phase.

Le tableau ci-dessous donne les propriétés thermophysiques des matériaux constituant le modèle physique.

Tableau III. 1: Propriétés thermophysiques des matériaux du modèle physique.

| Matériel | RT31 | Mortier | Béton |
|---|----------|---------|-------|
| Température de fusion (k) | 304.15 | — | — |
| Densité-solide (kg/m^3) | 880 | 1700 | 2300 |
| Capacité thermique_solide ($\text{J}/(\text{K}\cdot\text{kg})$) | 2000 | 1000 | 920 |
| Conductivité thermique-solide ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) | 0.2 | 1.15 | 1.75 |
| Chaleur latente (kJ/kg) | 170 | — | — |
| Densité-liquide (kg/m^3) | 760 | — | — |
| Conductivité thermique-liquide ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) | 0.2 | — | — |
| Capacité thermique-liquide ($\text{J}/(\text{K}\cdot\text{kg})$) | 2000 | — | — |
| Viscosité dynamique ($\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$) | 0.002508 | — | — |
| β (K^{-1}) | 0.00076 | — | — |

III.4 Résultats de simulations

Afin de mener à bien ce travail, nous avons adapté le programme élaboré par Soiba [31], l'année universitaire précédente, afin de traiter les modèles physiques étudiés.

Comme, c'est mentionné dans le chapitre précédent, la méthode enthalpique explicite a une condition de stabilité. Ce qui a conduit, pour les propriétés thermophysiques des matériaux du modèle physique, à choisir les pas suivants : $\Delta t = 1s$ et $\Delta x = 2.5mm$.

Pour pouvoir générer les conditions initiales on a supposé que le toit, initialement, se trouve à une température uniforme égale à $26^{\circ}C$. De plus, la température à l'intérieur $T_{\infty 2}^k$, dans ce travail, est supposée fixe et est égale à $24^{\circ}C$.

III.4.1 Performances énergétiques du toit sans MCP

Il est évident que, tout d'abord, il faut étudier les performances énergétiques du toit sans la présence de couche de PCM. Ainsi, pour cette configuration, les variations de la distribution de température dans le toit, du coefficient de convection intérieur et du coefficient d'échange par rayonnement en fonction du temps vont être tracer.

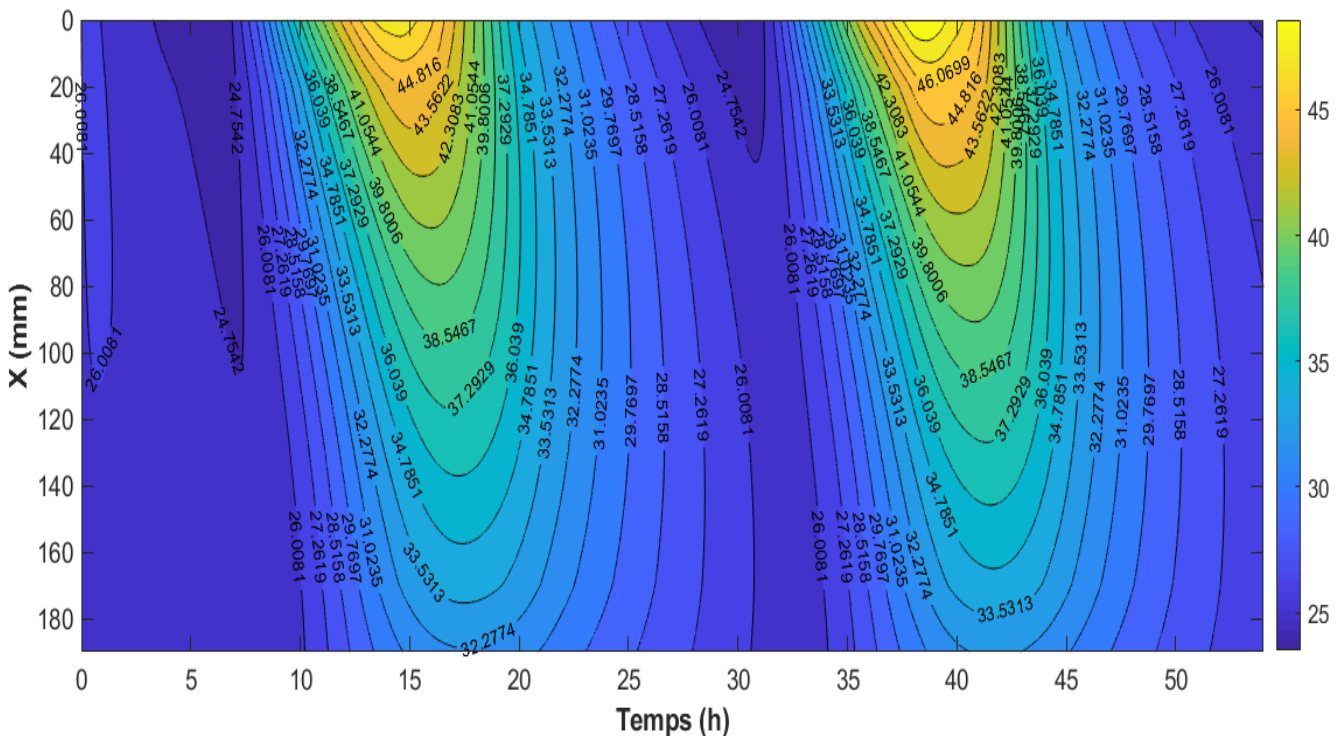


Figure III. 8: Distribution de températures dans le toit sans MCP au cours du temps.

La figure III.8 donne la distribution de température dans le toit sans MCP en fonction du temps. La face supérieure du toit est la plus exposée à la température. Les plus grandes valeurs de températures,

sur cette face, sont enregistrées, pour les deux journées étudiées, de 13h00 à 17h00. Cela est dû aux rayonnements solaires et aux températures ambiantes élevées durant cette période de la journée. La plus grande température 49.83 °C est obtenue à environ 15h00 de la deuxième journée. Alors, que pour la face intérieure les plus grandes valeurs de températures sont enregistrées de 15h00 à 22h00. Là, la plus grande valeur est de 32.46°C est obtenue à environ 18h00 de la deuxième journée.

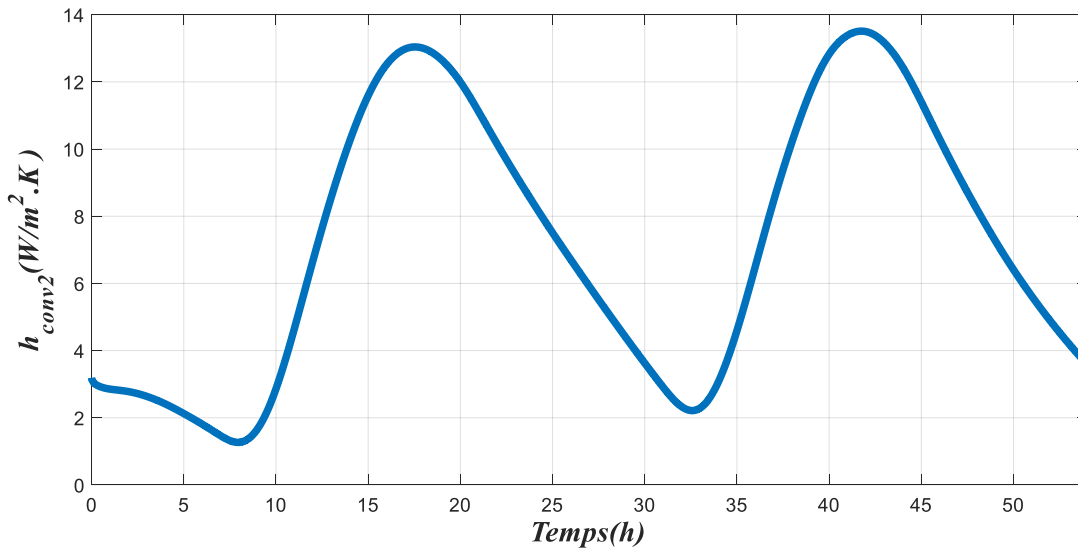


Figure III. 9: Variation du coefficient de convection intérieur au cours du temps, pour un toit sans MCP.

La figure III.9 présente la variation du coefficient de convection intérieur en fonction du temps. Ce facteur dépend, uniquement, de la température de la face basse du toit du fait que la température $T_{\infty 2}^k$ est supposée constante. Ainsi, il enregistre les plus grandes valeurs, pour les deux journées étudiées, de 15h00 à 22h00. La valeur maximale est de 13.51 W/m².K alors que la valeur moyenne est de 7.17 W/m².K.

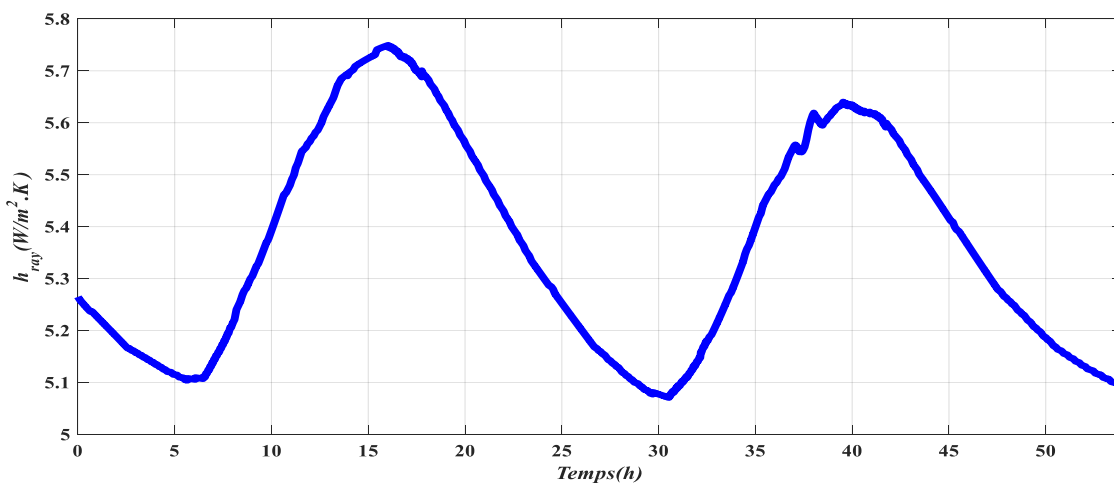


Figure III. 10: Variation du coefficient d'échange par rayonnement au cours du temps, pour un toit sans MCP.

Sur la figure III.10, l'évolution du coefficient d'échange par rayonnement, pour un toit sans MCP est tracée. On constate que la plus grande valeur est $5.75 \text{ W/m}^2.\text{K}$, la plus petite est $5.07 \text{ W/m}^2.\text{K}$ alors que la valeur moyenne est égale à $5.36 \text{ W/m}^2.\text{K}$.

III.4.2 Performances énergétiques du toit avec MCP

Dans cette section, seront présentés les résultats issus de la simulation de l'effet de l'incorporation d'une couche de MCP, d'épaisseur de 15mm, dans le toit comme c'est mentionné dans le chapitre précédent.

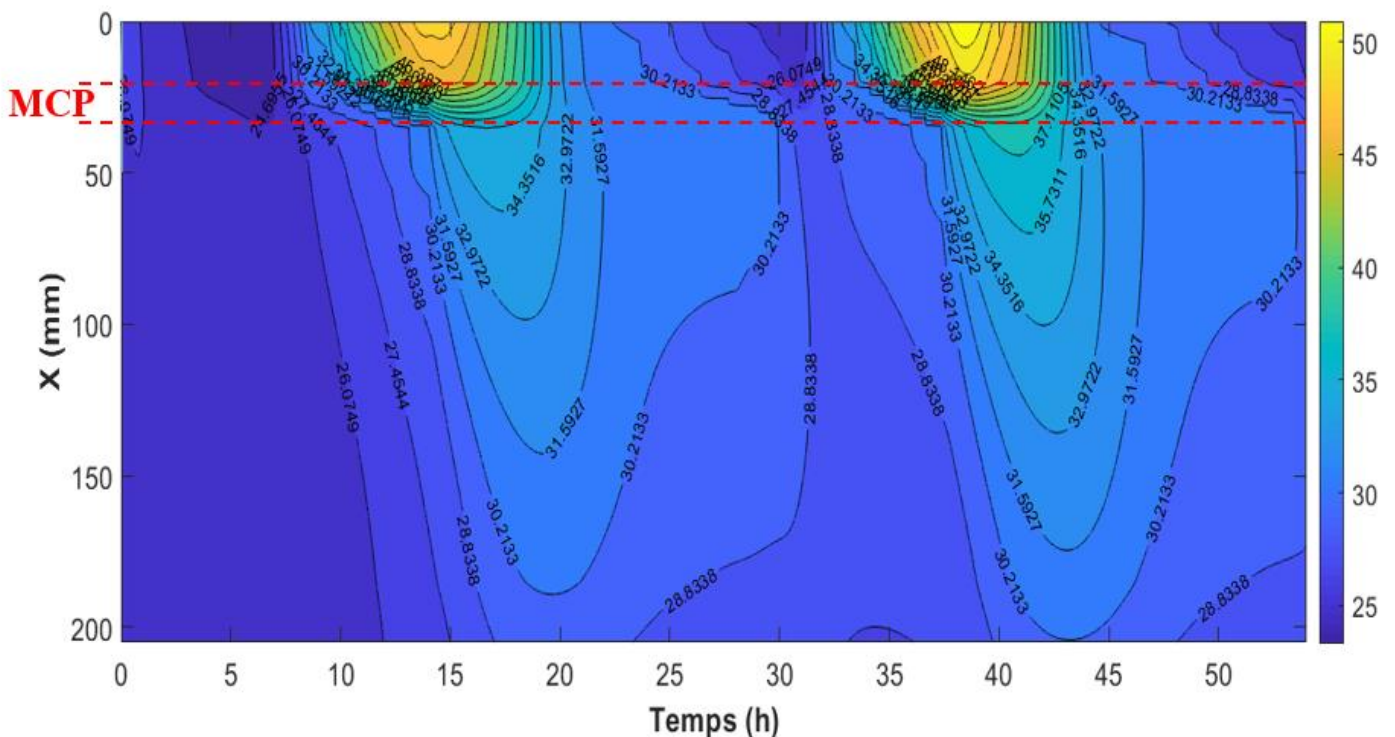


Figure III. 11: Distribution de températures dans le toit avec MCP au cours du temps.

La distribution de température dans un toit avec MCP, est présentée sur la figure III.11. On constate les températures maximales, sont enregistrées de 14h00 à 17h00, comme pour le cas précédent. De plus, la température maximale dans la face supérieure du toit ($x=0$) a augmenté de 49.83°C , pour le cas sans MCP, à 52.28°C , pour ce cas. Cela, peut être expliquer, par le changement de phase de la phase solide à la phase liquide durant cette période de la journée. En revanche, la température minimale dans toit à passer de 23.50°C à 23.31°C .

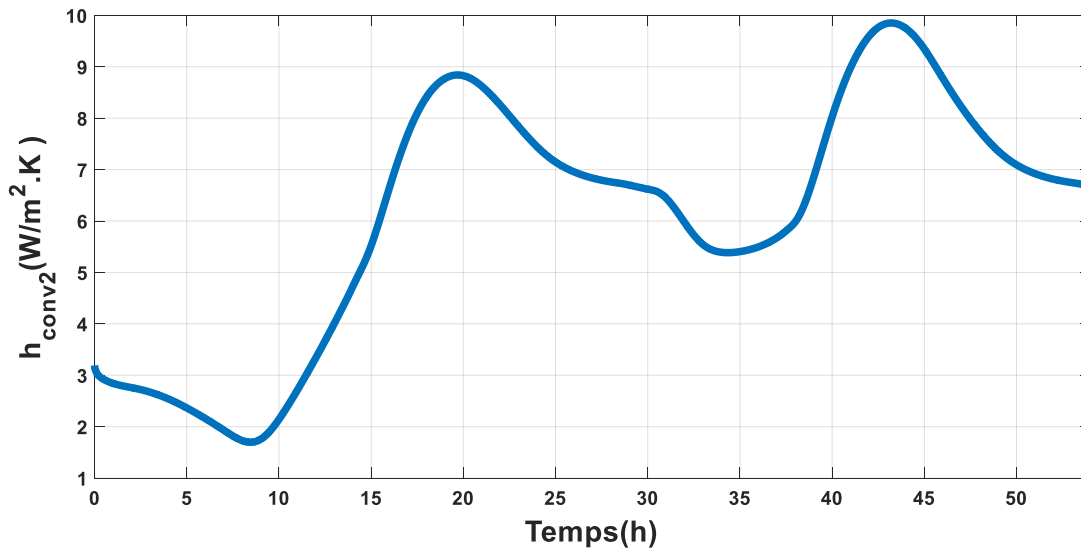


Figure III. 12: Variation du coefficient de convection intérieure au cours du temps, pour un toit avec MCP.

La variation du coefficient de convection intérieure en fonction du temps pour un toit avec MCP est présentée sur la figure III.12. Pour ce cas, la valeur maximale est de $9.85 \text{ W/m}^2.\text{K}$ alors que la valeur moyenne est de $6.10 \text{ W/m}^2.\text{K}$. Ces valeurs, sont inférieures à celle trouvée pour le premier cas ce qui indique que la température de la face intérieure a diminué.

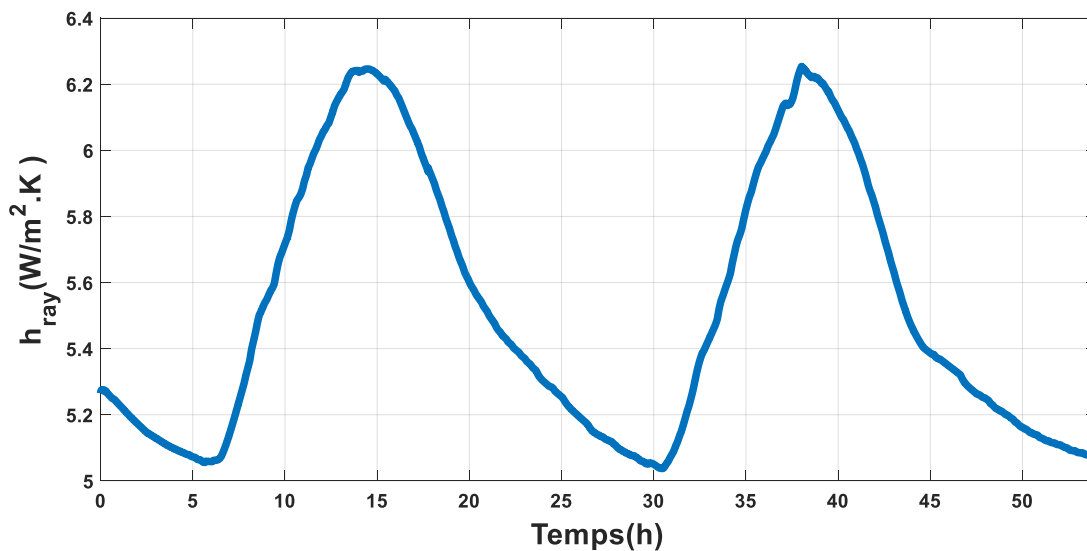


Figure III. 13: Variation du coefficient d'échange par rayonnement au cours du temps, pour un toit avec MCP.

Les valeurs de coefficient d'échange par rayonnement, pour un toit avec MCP, sont supérieures à celles trouvées pour le premier cas. Ce qui indique que la température de la face supérieure du toit a augmenté par l'incorporation d'une couche de MCP, suite au changement de phase de ce dernier.

III.4.3 Comparaison entre les deux cas

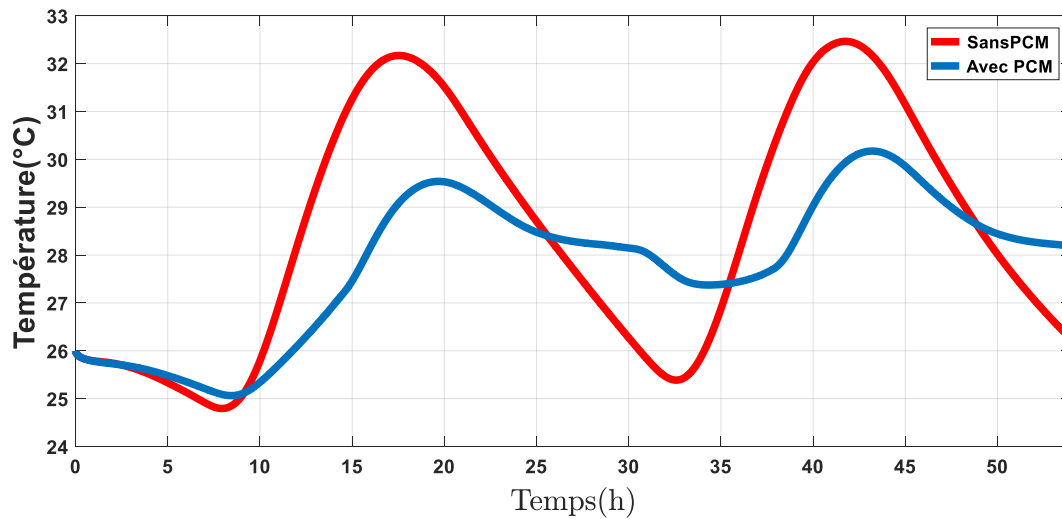


Figure III. 14: Variation de la température de la face intérieure du toit, pour les deux cas étudiés.

La figure III.14 donne une comparaison entre la température de la face inférieure du toit avec et sans MCP. Tout d'abord, on remarque que l'intégration d'une couche de MCP dans le toit a diminué la température de cette face, ainsi la valeur moyenne a passé de 28.49°C à 27.82°C. Ce qui réduit par conséquent la pénétration de la chaleur à travers le toit. En effet, l'énergie totale gagnée Q (J/m^2), durant la période estivale, a l'expression suivante [22] :

$$Q = \int_{t=0}^{t=t_D} h_{conv2}(t)(T_{x=L}(t) - T_{\infty2}) dt \quad (III.1)$$

Cette amélioration est la conséquence directe de l'augmentation de l'épaisseur du toit d'une part, du changement de phase du MCP de l'autre part. Ce dernier a absorbé, dans les heures de pointe (d'environ 13h00 à presque 20h00), une partie de la quantité de chaleur reçue de l'extérieur empêchant, ainsi, sa pénétration. Ce qui permet, non seulement de réduire la facture du confort thermique, mais aussi d'un peu linéariser la consommation de l'énergie durant la journée.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans un monde cruel où les pays se luttent pour la réduction de la facture de la consommation d'énergie, il est indispensable d'utiliser de manière rationnelle les ressources énergétiques. Notamment, au secteur du bâtiment, qui représente le plus grand consommateur d'énergie à l'échelle mondiale [7]. Malgré que de nombreux chercheurs ont proposé de technologies innovantes afin de réduire la consommation d'énergie dans ce domaine, l'incorporation des matériaux à changement de phases dans les enveloppes de bâtiments semble être la solution la plus prometteuse.

Dans ce travail, nous avons étudié l'effet de l'intégration d'une couche de MCP dans la toiture d'une maison sur les dépenses énergétiques liées au confort thermique durant la période estivale. Le choix de la ville de Chlef était comme lieu d'études, est motivé par le fait qu'elle est comme l'une des régions intérieures les plus chaudes dans notre pays.

Au terme de cette étude, nous pouvons dégager les constatations suivantes :

- Avec une couche de MCP d'une épaisseur de 15 mm, il est possible de réduire la température moyenne de la surface intérieure de la toiture d'environ 0.7 °C durant la période estivale.
- Réduire la température de la surface intérieure de la toiture, dans les heures de pointes (de 13h00 à 17h00) de plus de 2.2°C. Ce qui permet, ainsi, de réduire la consommation d'électricité durant cette période.
- L'incorporation d'une couche de MCP, permet non seulement de réduire la facture de confort mais aussi d'éviter la surconsommation de l'électricité durant les heures de pointe.

Les perspectives ouvertes par cette étude sont les suivantes :

- Etudier l'effet de l'emplacement de la couche de MCP dans la toiture ;
- Analyser l'influence du choix du MCP.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] 2. S. Y. Yanqiu Huang1, «Numerical analysis on phase change progress and thermal performance,» *BUILD SIMUL*, pp. 69-85, 2023.
- [2] S. M. Al-Yasiri Q, «Case study on the optimal thickness of phase change material incorporated composite roof under hot climate conditions,» vol. 14, n° %100522, 2021a.
- [3] S. B. E. Ango, «Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment : développement d'un système actif à matériaux à changement de phase,» Thèse de doctorat, Université de Paris (France), 2011.
- [4] R. W. Y. W. C. Z. Qian Wang, «Parametric analysis of using PCM walls for heating loads reduction,» vol. 172, n° %1328-336, 2018.
- [5] [En ligne]. Available: <https://www.euradif.fr/conseils/quelles-solutions-contre-les-deperditions-de-chaleur-de-votre-logement/>. [Accès le 19 juin 2024].
- [6] N. Nahar, «Performance of different passive techniques for cooling of buildings in arid regions,» vol. 38, n° %1109-116, 2002.
- [7] M. S. Qudama Al-Yasiri, «Incorporation of phase change materials into building envelope for thermal comfort and energy saving: A comprehensive analysis,» *Journal of Building Engineering*, vol. 36, 2021.
- [8] L. J. W. S. e. a. Park JH, «Optimization of phase change materials to improve energy performance within thermal comfort range in the South Korean climate,» vol. 185, n° %112–25, 2019.
- [9] W. S. C. S. e. a. Park JH, «Analysis of energy retrofit system using latent heat storage materials applied to residential buildings considering climate impacts,» vol. 169, n° %1 114904, 2020.
- [10] S. Y. M. A. Y. W. M. K. Z. Z. Yanqiu Huang, «Numerical analysis on phase change progress and thermal performance of different roofs integrated with phase change material (PCM) in,» *Building Simulation*, vol. 16, pp. 69-85, 2023.
- [11] M. F. e. .. G. Chen, «Effects of different multiple PCMs on the performance of a latent thermal energy storage system,» vol. 27, n° %1n°5-6, pp. 994-1000, 2007.
- [12] P. V. T. e. R. N. d. O. T. . T. M. Rocha, «A timeline of the phase-change problem for latent thermal energy storage systems: A review of theoretical approaches from the 1970's to 2022,» vol. 250, n° %1248-284, 2023.
- [13] M. Deffass, «Intégration des matériaux a changement de phase (MCPs) comme système de stockage de la chaleur,» Université de Jijel (Algérie), 2021.
- [14] F. BENMOUSSA, «Stockage de l'énergie thermique: Etude et optimisation des procédés,» chez *Thèse de doctorat*, 2018.
- [15] M. Deffass , «Intégration des matériaux a changement de phase (MCPs) comme système de stockage de la chaleur,» Thèse de doctorat, Université de Jijel (Algérie), 2021.
- [16] S. Guichard, «Contribution à l'Étude des Parois Complexes intégrant des Matériaux à Changement de Phase : Modélisation, Expérimentation et Évaluation de la performance énergétique globale,» chez *Thèse de doctorat*, 2013.
- [17] B. S. A. Benhamza, «Simulation numérique d'un capteur solaire plan utilisant des matériaux a changement de phase,» chez *mémoire de master*, 2016.
- [18] H. R. O. M. J. C. R. M. C. Necati Ozisik, *Finite Difference Methods in Heat Transfer*, Second Edition, Taylor & Francis Group, LLC, 2017.
- [19] A. a. B. K. a. B. R. Mokhtari, «Architecture et confort thermique dans les zones arides Application au cas de la ville de Béchar,» *Revue des Énergies Renouvelables*, vol. 11, pp. 2-307, 06 2008.

Références bibliographiques

- [20] «La prime énergie,» [En ligne]. Available: <https://www.laprimenergie.fr/les-travaux/lisolation-thermique/tout-savoir-sur-la-deperdition-thermique>. [Accès le 16 05 2024].
- [21] S. P. Aly, S. Ahzi et N. B. Ben, «Two-dimensional finite difference-based model for coupled irradiation and heat transfer in photovoltaic modules,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 180, pp. 289-302, 2018.
- [22] M. Izquierdo-Barrientos, J. Belmonte, D. Rodríguez-Sánchez, A. Molina et J. Almendros-Ibáñez, «A numerical study of external building walls containing phase change materials (PCM),» *Applied Thermal Engineering*, vol. 47, pp. 73-85, 2012.
- [23] S. Guichard, «Contribution à l'Étude des Parois Complexes intégrant des Matériaux à Changement de Phase : Modélisation, Expérimentation et Évaluation de la performance énergétique globale,» Thèse de doctorat, Université de la Réunion (France), 2013.
- [24] I. Sarbu et C. Sebarchievici, «Solar Heating and cooling Systems: Chapter 4 - Thermal Energy Storage,» *Fundamentals, Experiments and Applications*, pp. 99-138, 2017.
- [25] S. Djeneba, «Effet de l'intégration d'une couche de matériau à changement de phase (MCP) dans un mur de bâtiment sur les performances énergétiques,» mémoire de fin d'étude master académique en énergétique, département de génie mécanique, université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, Mostaganem, 2023.
- [26] [En ligne]. Available: <https://www.sonelgaz.dz/fr/3566/demande-en-electricite>. [Accès le 10 juin 2024].
- [27] [En ligne]. Available: <https://fr.weatherspark.com/y/45833/M%C3%A9t%C3%A9o-moyenne-%C3%A0-Chlef-Alg%C3%A9rie-tout-au-long-de-l'ann%C3%A9e#Figures-ColorTemperature>. [Accès le 1 Juin 2023].
- [28] [En ligne]. Available: <https://www.laprimenergie.fr/les-travaux/lisolation-thermique/tout-savoir-sur-la-deperdition-thermique>. [Accès le 10 juin 2024].
- [29] A. BENKHALED, «distributions statistiques des pluies maximales annuelles dans la région du cheliff comparaison des techniques et des résultats» *Revue Courrier du Savoir*, n°08, juin 2007, pp. 83-91. Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie, 2007.
- [30] https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_-RT31_EN_18042024.PDF [Accès le 10 juin 2024].
- [31] D. SOIBA, «effet de l'intégration d'une couche de matériau à changement de phase (MCP) dans un mur de bâtiment sur les performances énergétiques,» mémoire de fin d'étude master académique en énergétique, Département de Génie Mécanique, Université de Mostaganem 2023.
- [32] Q. Wang et R. W. W. Zhao Hai, «Parametric analysis of using PCM walls for heating loads reduction,» *Energy and Buildings*, vol. 172, pp. 328-336, 2018.
- [33] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen et D. Buddhi, «Review on thermal energy storage with phase change materials and applications,» *Renewable and sustainable energy*, vol. 13, n° 12, pp. 318-345, 2009.
- [34] B. Zalba, J. M. Marín, L. F. Cabeza et H. Mehling, «Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, n° 13, pp. 251-283, 2003.
- [35] J. Lei, J. Yang et E.-H. Yang, «Energy performance of building envelopes integrated with phase change materials for cooling load reduction in tropical Singapore,» *Applied Energy*, vol. 162, pp. 207-217, 2016.
- [36] N. Soares, A. R. Gaspar, P. Santos et J. J. Costa, «Multi-dimensional optimization of the incorporation of PCM-drywalls in lightweight steel-framed residential buildings in different climates,» *Energy and Buildings*, vol. 70, pp. 411-421, 2014.

- [37] E. Tunçbilek, . M. Arıcı, M. Krajčák, S. Nižetić et H. Karabay, «Thermal performance based optimization of an office wall containing PCM under intermittent cooling operation,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 179, n° %1115750, 2020.
- [38] M. Fang et . G. Chen, «Effects of different multiple PCMs on the performance of a latent thermal energy storage system,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, n° %15-6, pp. 994-1000, 2007.
- [39] T. . T. M. Rocha, P. V. Trevizoli et R. N. de Oliveira, «A timeline of the phase-change problem for latent thermal energy storage systems: A review of theoretical approaches from the 1970's to 2022,» *Solar Energy*, vol. 250, pp. 248-284, 2023.
- [40] B. Németh, «Power consumption of model houses with and without PCM plaster lining using different heating methods,» *Energy and buildings*, vol. 284, n° %1112845, 2023.
- [41] F. A. Shams, N. Rafa, T. Mehnaz, B. Ahmed, N. Islam, M. Mofijur, A. T. Hoang et G. Shafiullah, «Integration of phase change materials in improving the performance of heating, cooling and clean energy storage systems: An overview,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 364, n° %1132639, 2022.
- [42] S. Hasnain, «Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques,» *Energy Conversion and Management*, vol. 39, n° %111, pp. 1127-1138, 1998.
- [43] R. Velraj, R. Seeniraj, B. Hafner, C. Faber et K. Schwarzer, «Heat transfer enhancement in a latent heat storage system,» *Solar Energy*, vol. 65, n° %13, pp. 171-180, 1999.
- [44] R. Sharma , P. Ganesan , V. Tyagi , H. Metselaar et S. Sandaran , «Developments in organic solid–liquid phase change materials and their applications in thermal energy storage,» *Energy Conversion and Management*, vol. 95, pp. 193-228, 2015.
- [45] S. D. SHARMA, H. KITANO et K. SAGARA, «Phase Change Materials for Low Temperature Solar Thermal,» vol. 29, pp. 31-64, 2004 .
- [46] O. Imghoure, N. Belouaggadia, M. Ezzine, R. Lbibb et Z. Younsi, «Performance evaluation of phase change materials for thermal comfort in a hot climate region,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 186, n° %1116509, 2021.
- [47] R. Baetens , P. J. Bjørn et A. Gustavsen, «Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review,» *Energy and Buildings*, vol. 42, n° %19, pp. 1361-1368, 2010.
- [48] A. Kasaeian, L. Bahrami, F. Pourfayaz, E. Khodabandeh et W.-M. Yan, «Experimental studies on the applications of PCMs and nano-PCMs in buildings: A critical review,» *Energy and Buildings*, vol. 154 , pp. 96-112, 2017 .
- [49] V. V. Tyagi et D. Buddhi, «PCM thermal storage in buildings: A state of art,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, n° %16, pp. 1146-1166, 2007.
- [50] I. Sarbu et A. Dorca, «Review on heat transfer analysis in thermal energy storage using latent heat storage systems and phase change materials,» *International Journal of Energy Research*, vol. 43, n° %11, pp. 29-64, 2019.
- [51] A. Abhat, «Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials,» *Solar Energy*, vol. 30, n° %14, pp. 313-332, 1983.
- [52] M. M. Kenisarin, «High-temperature phase change materials for thermal energy storage,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, n° %13, pp. 955-970, 2010.
- [53] S. A. Memon, «Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 31, pp. 870-906, 2014.
- [54] L. Royon, L. Karim et A. Bontemps, «Thermal energy storage and release of a new component with PCM for integration in floors for thermal management of buildings,» *Energy and Buildings*, vol. 63, pp. 29-35, 2013.

Références bibliographiques

- [55] S. Bellan, J. Gonzalez-Aguilar, M. Romero, M. M. Rahman, D. Y. Goswami, E. K. Stefanakos et D. Couling, «Numerical analysis of charging and discharging performance of a thermal energy storage system with encapsulated phase change material,» vol. 71, n° %11, pp. 481-500, 2014.
- [56] A. Joulin, L. Zalewski, S. Lassue et H. Naji, «Experimental investigation of thermal characteristics of a mortar with or without a micro-encapsulated phase change material,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 66, n° %11–2, pp. 171-180, 2014.
- [57] Algerie presse service, «Le secteur du bâtiment, premier consommateur d'énergie en Algerie,» 13 Février 2019. [En ligne]. Available: <https://www.aps.dz/economie/85470-le-secteur-du-batiment-premier-consommateur-d-energie-en-algerie>. [Accès le 09 Février 2023].
- [58] F. BENMOUSSA, «Stockage de l'énergie thermique: Etude et optimisation des procédés,» Thèse de doctorat, Université de Batna 2 (Algérie), 2018.
- [59] M. Martinelli, «Stockage d'énergie thermique par changement de phase – Application aux réseaux de chaleur,» Thèse de doctorat, Université grenoble alpes (France), 2017.
- [60] Z. Ait Hammou, «Un accumulateur échangeur de chaleur hybride pour la gestion simultanée des énergies solaires et électrique,» Thèse de Doctorat, Université de Sherbrooke (Canada), 2006.