



N° d'ordre : M...../GM/2023

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Thème

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

Présenté par :

❖ SOIBA Djénéba

Soutenu le 25 / 06 / 2023 devant le jury composé de :

Président	Pr. RETIEL Nouredine	Université de Mostaganem UMAB
Examineur	Dr. OULD SAID Belkacem	Université de Mostaganem UMAB
Encadrant	Dr. FLITTI Abdelmadjid	Université de Mostaganem UMAB

Année Universitaire : 2022 / 2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Louange à Allah, je tiens tout d'abord à remercier Allah le tout puissant et miséricordieux pour la volonté, la santé et la patience qu'Il m'a accordé durant toutes ces années d'étude.

Je remercie chaleureusement mes parents pour leur contribution, leur soutien moral et financier et leur encouragement, j'exprime également ma gratitude à mon cher et tendre époux pour sa patience, sa résignation et ses encouragements tout au long de mon parcours universitaire.

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 Pr. RETIEL Noureddine pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury mon travail ainsi que le Dr. OULD SAID Belkacem, grand merci à eux pour leur présence et leur lecture attentive de ce travail ce 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.

Mes remerciements vont aussi à l'endroit du Dr. MEDJAHED Bendida pour son aide.

Grand merci à tous les corps professoraux qui ont eu à me prendre depuis le primaire en passant par le secondaire et le lycée jusqu'à l'université.

Merci beaucoup à mes trois familles de cœur algériennes à savoir : la famille TAHLAITI, la famille MECHLOUF et la famille CHENINE.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à mes frères et sœurs, à mes amis, à mes proches, aux chauffeurs de bus de notre université et à tous ceux qui ont contribué de près comme de loin à la réalisation de ce travail.

SOIBA Djénéba

Dédicaces

Je dédie ce travail à

*Mon papa et ma maman qui m'ont toujours soutenu dans tout
ce que j'ai entrepris qu'Allah les bénisse et les garde en bonne
santé*

Mon mari qui a toujours été un ami fidèle et sincère

Mes frères et sœurs

Mes amis

Et tous mes camarades de promotion

Merci et encore une fois de plus merci à vous tous

Umm Fâtimah

Résumé

D'après plusieurs études, le secteur du bâtiment est considéré comme le plus grand consommateur d'énergie. En été plus de 41% de cette énergie consommée est orientée vers la climatisation. Face aux enjeux énergétiques actuels, les acteurs du bâtiment cherchent à adopter des techniques innovantes afin de réduire cette consommation. L'intégration des matériaux à changement de phase dans les murs figure parmi les techniques les plus prometteuses.

Dans ce contexte s'inscrit ce travail, et vise à étudier, par la méthode des différences finies, l'effet de l'intégration d'une couche de matériau à changement de phase dans les murs extérieurs d'un bâtiment, supposé situé à la ville de Chlef, sur l'amélioration de l'efficacité énergétique durant la période estivale. Trois configurations (mur sans MCP et deux configurations différentes pour celui avec MCP) de mur ont été examinées. Afin d'évaluer les performances énergétiques, pour les cas étudiés, la méthode enthalpique explicite a été implémentée sous l'environnement Matlab.

Les résultats de la simulation trouvés ont montré que l'intégration d'une couche de MCP dans le mur est très bénéfique quant à la réduction de la consommation d'énergie. L'exploitation optimale de ce matériau passe par un choix judicieux de son emplacement dans le mur ainsi que de l'épaisseur de la couche.

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

Abstract

According to several studies, the building sector is considered to be the biggest consumer of energy. In summer, over 41% of this energy is used for air conditioning. Faced with today's energy challenges, the building industry is looking to adopt innovative techniques to reduce this consumption. Integrating phase-change material into walls is one of the most promising techniques.

The aim of this work is to use the finite-difference method to study the effect of integrating a layer of phase-change materials into the external walls of a building, assumed to be located in the town of Chlef, on improving energy efficiency during the summer period. Three wall configurations (wall without PCMs and two different configurations for the wall with PCMs) were examined. In order to evaluate the energy performance for the cases studied, the explicit enthalpy method was implemented in the Matlab environment.

The simulation results showed that incorporating a layer of PCM into the wall is highly beneficial in terms of reducing energy consumption. Optimum use of this material depends on a judicious choice of its position in the wall and the thickness of the layer.

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

ملخص

وفقاً لعدة دراسات، يعتبر قطاع البناء أكبر مستهلك للطاقة. في الصيف، يتم توجيه أكثر من 41% من هذه الطاقة المستهلكة نحو تكييف الهواء. في مواجهة تحديات الطاقة الحالية، يسعى الفاعلين في قطاع البناء إلى اعتماد تقنيات مبتكرة لتقليل هذا الاستهلاك. يعد دمج مواد تغيير الطور في الجدران أحد أكثر التقنيات الواعدة. في هذا السياق، يندرج هذا العمل والذي يهدف إلى دراسة، بطريقة الفروق المحدودة، تأثير دمج طبقة من مواد متغيرة الطور في الجدران الخارجية لمبنى، يفترض أنه يقع في مدينة الشلف، على كفاءة استهلاك الطاقة خلال فترة الصيف. تم فحص ثلاثة تركيبات للجدار (تركيبية بدون طبقة مواد متغيرة الطور والأخرتين بوجودها مع اختلاف موضعها). من أجل تقييم نجاعة الدمج، بالنسبة للحالات المدروسة، تم زرع طريقة المحتوى الحراري الصريح في بيئة ماتلاب.

أظهرت نتائج المحاكاة التي تم العثور عليها أن تضمين طبقة من مواد متغيرة الطور في الجدار مفيد للغاية في تقليل استهلاك الطاقة. يتطلب الاستخدام الأمثل لهذه المادة اختياراً حكيماً لموقعها في الجدار وكذلك سمك الطبقة. **الكلمات المفتاحية:** مواد متغيرة الطور، طريقة المحتوى الحراري الصريح، الجدار، طريقة الفروق المحدودة.

Nomenclature

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]
$T_{\infty1}$	Température ambiante du milieu extérieur	[°C]
$T_{\infty2}$	Température ambiante du milieu intérieur	[°C]
V	Vitesse du vent	[m/s]
Δt	Pas temporel	[s]
Δx	Pas spatial	[m]
λ	Coefficient d'échange par conduction	[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
z	Paroi

Liste des tableaux

Tableau I.1: Température de changement de phase et chaleur latente de quelques paraffines	8
Tableau I.2: Les critères à respecter lors du choix d'un MCP	10
Tableau III.1: Propriétés thermophysiques des matériaux du modèle physique.	27

Liste des figures

Figure I.1: Principe de stockage des matériaux à changement de phase	5
Figure I.2: Exemple d'un cycle thermochimique de stockage de chaleur.	6
Figure I.3: Classification des matériaux à changement de phase	7
Figure I.4: Paraffine RT60 de Rubitherm	8
Figure II.1: Mur sans MCP.	12
Figure II.2: Schémas des deux configurations étudiées	13
Figure II.3: L'illustration des trois modes de transfert pour un mur	14
Figure III.1: Evolution de la demande de l'énergie électrique en Algérie	22
Figure III.2: Température horaire moyenne à Chlef	23
Figure III.3: Estimation de la variation de la température ambiante en fonction du temps.....	24
Figure III.4: Estimation de la variation de la vitesse du vent en fonction du temps.....	24
Figure III.5: Estimation de la variation du flux du rayonnement solaire intercepté par le mur en fonction du temps.....	25
Figure III.6: Variation de la température apparente du ciel en fonction du temps.	25
Figure III.7: Variation du coefficient convectif externe en fonction du temps.....	26
Figure III.8: Organigramme du programme.	28
Figure III.9: Distribution de températures dans le mur sans MCP au cours du temps.	29
Figure III.10: Variation du coefficient de convection intérieure au cours du temps.	30
Figure III.11: Variation du coefficient d'échange par rayonnement au cours du temps.	30
Figure III.12: Variation du flux de chaleur instantané au cours des 30h.	31
Figure III.13: Distribution de températures au cours du temps pour : la configuration 1 et e = 12 mm.	32
Figure III.14: Variation du coefficient h_{conv2} pour : la configuration 1 et e=12 mm.....	32
Figure III.15: Variation du flux \dot{Q} pour : la configuration 1 et e = 12 mm.....	33
Figure III.16: Distribution de températures au cours du temps pour : la configuration 2 et e = 12 mm.	34
Figure III.17: Variation du coefficient h_{conv2} pour : la configuration 2 et e =12 mm.....	34
Figure III.18: Variation du flux \dot{Q} pour : la configuration 2 et e = 12 mm.....	35
Figure III.19: Variation du flux \dot{Q} en fonction de l'épaisseur de la couche de MCP pour la configuration 1.	35
Figure III.20: Variation du flux \dot{Q} en fonction de l'épaisseur de la couche de MCP pour la configuration 2.	36

Tables des matières

Remerciements.....	i
Dédicaces	iii
Résumé.....	iii
Abstract	iii
Nomenclature	iv
Liste des tableaux.....	v
Liste des figures	vi
Tables des matières	vii
Introduction générale	1
Chapitre I : Matériau à changement de phase	
I.1. Introduction	3
I.2. Etat de l’art	3
I.3. Le stockage de l’énergie thermique.....	4
I.3.1. Le stockage par chaleur sensible	4
I.3.2. Le stockage par chaleur latente	4
I.3.3. Le stockage thermochimique de l’énergie thermique.....	6
I.4. Classification des MCP utilisés dans les bâtiments.....	6
I.4.1. Les MCP inorganiques	7
I.4.2. Les MCP organiques	7
I.4.2.1. Les paraffines	8
I.4.2.2. Les non-paraffines	9
I.4.3. Les MCP eutectiques	9
I.5. Les critères de sélection du MCP	9
I.6. Synthèse des travaux dans le secteur du bâtiment.....	10
Chapitre II : Modélisation du transfert thermique dans un mur comportant une couche de MCP	
II.1. Introduction	12
II.2. Présentation du modèle physique du mur	12
II.3. Hypothèses simplificatrices de base.....	13
II.4. Analyse du transfert de chaleur et résolution numérique.....	14
II.4.1. Analyse du transfert thermique	14
II.4.2. Formulation mathématique du problème de changement de phase	16
II.4.2.1. La méthode enthalpique	17
II.4.2.2. Discrétisation par la méthode des différences finies.....	18
II.5. Formulation des équations	19

II.6. Densité de flux de chaleur ou flux instantané de chaleur gagné	21
--	----

Chapite III : Resultats et discussion

III.1. Introduction	22
III.2. Données météorologiques de la ville de Chlef	22
III.3. Caractéristiques des matériaux sélectionnés	26
III.4. Organigramme du programme élaboré	27
III.5. Performances énergétiques du mur sans MCP	28
III.6. Performances énergétiques du mur avec MCP	31
III.6.1. Configuration 1	31
III.6.2. Configuration 2	33
III.6.3. Effet de l'épaisseur de la couche du MCP sur le flux de chaleur instantané moyen gagné... 35	
Conclusion générale	37
Références bibliographiques	38

Introduction générale

Introduction générale

De nos jours, l'allure à laquelle s'effectue l'avancement du réchauffement climatique causé par les émissions de gaz à effet de serre est très inquiétante pour l'humanité. Le changement climatique global est l'un des fléaux contre lequel se bat l'humanité, elle n'est autre que la conséquence directe de l'activité humaine à travers la pollution atmosphérique. En effet, généralement la production d'énergie est réalisée soit par énergie fossile (charbon, gaz...) ou soit par énergie nucléaire qui sont très polluants. En vue de cette situation afin de maintenir le confort thermique dont l'être humain a besoin, on a tendance à beaucoup consommer l'énergie électrique. Avec 41% de la consommation totale d'énergie, l'Agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie (APRUE) a indiqué que le secteur du bâtiment est le premier consommateur d'énergie en Algérie [1]. Au vu des enjeux primordiaux, le recours à la conception bioclimatique des enveloppes du bâtiment est nécessaire car elle s'intègre directement dans une démarche de maîtrise de l'énergie. De telles enveloppes ne doivent en aucun cas recourir à des systèmes coûteux en énergie (chauffage ou climatisation) et doivent dans la mesure du possible, limiter une demande de production d'énergie importante afin de ne plus agir de manière néfaste sur l'environnement. Afin de pallier à ce problème, à ce jour, les acteurs du bâtiment mettent en place plusieurs techniques d'isolation thermiques telles que l'intégration des matériaux à changement de phase (MCP) dans les constructions. Ces MCP sont utilisés pour maintenir le confort par l'intermédiaire du contrôle de la température. Ainsi, ils permettent de réduire la consommation d'énergie, mais également de faire des économies sur la facture d'électricité. De ce fait, ils ont une sorte d'impact sur les performances énergétiques. Pendant la période estivale, la population algérienne est exposée à une variation très importante de température et ce d'année en année, c'est dans ce cadre que le choix fut porté sur la ville de Chlef qui fait partie des zones au climat chaud de ce pays.

Dans le but d'étudier numériquement l'effet de l'intégration d'une couche de MCP dans les murs du bâtiment sur les performances énergétiques de cette zone, un script développé sous l'environnement Matlab fut réalisé et une estimation des données météorologiques de la ville a été faite avec le logiciel « Meteonorm 8 ».

C'est dans cet objectif que le manuscrit sera décomposé en trois grandes parties :

- La première sera axée sur une généralité quant aux matériaux à changement de phase dans le secteur du bâtiment.

Introduction générale

- Le deuxième chapitre portera sur la modélisation du transfert de chaleur plus concrètement lorsqu'il y'a apparition du changement de phase. Cette partie sera le fil conducteur du travail et permettra de mettre en évidence les méthodes numériques.
- Et enfin la troisième partie portera sur les résultats obtenus et leur interprétation. Dans cette étude les principales questions qu'on se posera sont les suivantes :
 - L'intégration de ce matériau est-elle bénéfique quant à la réduction du transfert de chaleur vers l'intérieur ?
 - Quel est l'emplacement idéal de la couche du MCP dans le mur pour les conditions climatiques de Chlef afin de réduire la consommation d'énergie ?
 - Et enfin quelle est l'épaisseur optimale de cette couche dans le mur ?

Chapitre I

Les matériaux à changement de phase

Chapitre I : Les matériaux à changement de phase

I.1. Introduction

Afin de réduire les coûts liés au confort thermique dans les bâtiments, plusieurs travaux de recherche préconisent d'intégrer une couche de MCP dans les murs [2]. Cette solution s'articule sur la capacité de ces matériaux, à stocker l'énergie thermique lors de leur fusion et à la restituer au cours de leur solidification selon les besoins.

Ce sont des matériaux dont le principe de fonctionnement est similaire à celui de la glace. En effet, de la même manière que la glace commence sa fonte à partir du 0°C et maintient cette même température jusqu'à ce qu'elle soit complètement fondue, le MCP, aussi, commence à fondre à la seconde où il atteint sa température de fusion et la fusion complète se fait à température quasi constante.

I.2. Etat de l'art

Des efforts de recherches récentes dans la littérature se sont concentrés sur la progression des matériaux à changement de phase qui peuvent fournir une meilleure enveloppe en termes d'efficacité et de durabilité. De nombreuses études ont examiné l'efficacité des matériaux à changement de phase en terme de confort thermique dans les zones climatiques chaudes [3].

D'après un ensemble d'études mené par [4] et [5], la sélection du matériau optimal passe par l'identification des matériaux, de leurs critères d'évaluation et du poids de chacun.

Wang et Zhao Hai [3] ont mené une étude dont l'objectif était d'optimiser, pour plusieurs types de MCP, l'épaisseur et l'emplacement de la couche dans le mur. Ainsi, ils ont constaté que l'incorporation de MCP a garanti une réduction de 34,9% et le gain d'énergie est passée de 4238 kJ à 2757 kJ.

Farid et *al.* [6], ont présenté une synthèse, des applications du MCP et de leurs propriétés thermophysiques, dans laquelle ils ont souligné que le critère de choix primordial d'un MCP, pour une application donnée, c'est son point de fusion.

D'après une étude paramétrique sur l'enveloppe d'un bâtiment dans les régions tropicales de Singapour menée par Lei et *al.* [7], l'intégration d'une couche du MCP, ayant une température de fusion de 28 °C, permet un gain énergétique allant de 21 à 32%. Ils ont, également, mentionné que l'amélioration de ce gain passe par un choix approprié du point de fusion.

Soares et *al.* [8], ont utilisé le logiciel EnergyPlus pour mener une étude d'optimisation multidimensionnelle de l'intégration du MCP dans les bâtiments résidentiels à ossature métallique légère pour sept climats européens. Ils ont trouvé que les économies d'énergie peuvent aller de 10 à 62% selon le climat et que la température de fusion idéale dépend des conditions ambiantes.

Les travaux de Tunçbilek et *al.* [9], ont montré que les performances du MCP varient en fonction de plusieurs paramètres tels que : la température de fusion, l'épaisseur de la couche et de l'emplacement. En outre, leurs résultats ont montré, pour le chauffage, que l'économie de l'énergie augmente au fur et à mesure que la couche du MCP s'approche de la surface intérieure du mur.

I.3. Le stockage de l'énergie thermique

Le stockage de l'énergie thermique consiste à accumuler une quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure [10]. Selon le mécanisme de stockage, on distingue les trois types suivants : le stockage par chaleur sensible, le stockage par chaleur latente, et le stockage thermochimique (réaction chimique) [11].

I.3.1. Le stockage par chaleur sensible

C'est lorsque l'énergie est stockée ou récupérée à la suite d'un changement de température de l'environnement de stockage. Sous pression constante, si l'on chauffe un corps de masse m et de capacité calorifique $c(T)$, solide ou liquide d'une température initiale T_1 à une température finale T_2 sans changement d'état alors l'énergie stockée E est sous forme de chaleur sensible et est donnée par la variation d'enthalpie [12]:

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

Afin de simplifier le problème on suppose que la capacité calorifique est indépendante de la température : $c(T)=\text{constante}=c$ alors l'équation (I.1) devient :

$$E = h_2 - h_1 = mc(T_2 - T_1) \quad (\text{I.2})$$

Avec :

- h L'enthalpie en [J] ;
- m La masse en [kg] ;
- c La capacité calorifique en [J/kg°C] ;

Pour le stockage sensible on distingue 2 cas :

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

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

Le choix de ce mode de stockage est intéressant lorsqu'on a un corps dont la masse et la capacité calorifique sont élevées et un écart de température assez important.

I.3.2. Le stockage par chaleur latente

Le stockage d'énergie thermique par chaleur latente est une solution fondée sur l'exploitation de l'énergie engagée lors du changement de phase d'un corps. Lorsqu'un corps subit un changement de sa phase physique, il absorbe ou libère une quantité de chaleur appelée la chaleur latente.

Ainsi, si un matériau à changement de phase (MCP), qui se trouve à l'état solide, est chauffé, une fois que sa température de fusion T_f est atteinte la transition à la phase liquide commence et la température du matériau demeure quasi-constante. Lors de ce changement, une quantité de chaleur est, en quelque sorte, stockée ou bien absorbée. Dès que l'état du matériau devient complètement liquide, sa température augmente de nouveau comme c'est illustré dans la figure I.1 [13]. En inversant le processus, le matériau restitue la quantité de chaleur absorbée.

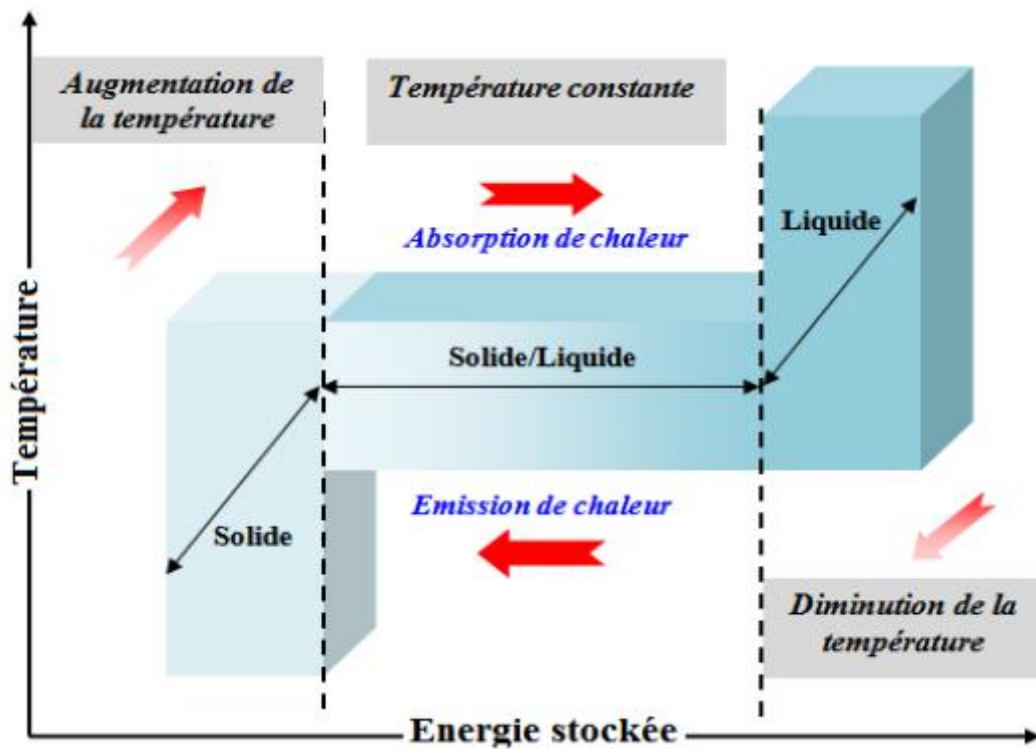


Figure I.1: Principe de stockage des matériaux à changement de phase [13].

La quantité de chaleur absorbée ou cédée pendant le processus de changement de phase est régie par l'équation ci-dessous :

$$q = mL_f \tag{I.3}$$

Dans certaines applications, il est possible que les deux procédés de stockage interviennent successivement. Si l'on considère une substance, servant de stockage thermique, initialement à la température T_1 qui est inférieure à sa température de fusion T_f , qui elle aussi est inférieure à la température finale T_2 alors le stockage se fera sous forme de chaleur sensible dans les phases solide et liquide et sous forme de chaleur latente dans la phase de transition. A pression constante l'énergie stockée E est égale à la variation d'enthalpie [14] :

$$E = h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_f} mc_{sol}(T)dT + mL_f(T_f) + \int_{T_f}^{T_2} mc_{liq}(T)dT \tag{I.4}$$

En supposant que les capacités calorifiques des corps sont indépendantes de la température alors l'équation (I.4) devient :

$$E = h_2 - h_1 = mc_{sol}(T_f - T_1) + mL_f(T_f) + mc_{liq}(T_2 - T_f) \quad (I.5)$$

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 $[J/kg]$.

Dans l'équation (I.5) le terme mL_f est très important par rapport aux autres termes de l'équation, cela vient du fait que l'énergie stockée par chaleur sensible est moins importante comparée à celle par chaleur latente [14].

Ainsi lorsqu'on a affaire à des masses et des écarts de température faibles ce type de stockage est très performant pour stocker de grandes quantités d'énergie.

I.3.3. Le stockage thermochimique de l'énergie thermique

Il est basé sur des réactions qui sont soit endothermiques (stockage de l'énergie) ou exothermiques (restitution de l'énergie). Généralement, il s'agit de réaction entre un sel et un liquide (hydrates) mais dans certains cas, afin d'améliorer les paramètres de transfert thermique, les matériaux réactifs (sels) peuvent être associés à une matrice (du cuivre, de l'aluminium,..) [15]. La figure I.2 schématise le cycle de fonctionnement de ce mode de stockage.

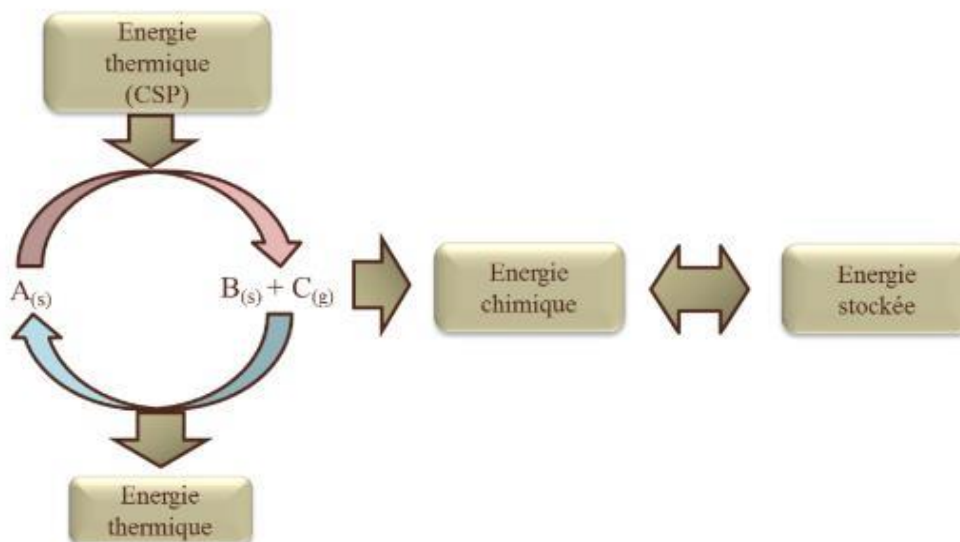


Figure I.2: Exemple d'un cycle thermochimique de stockage de chaleur [15].

I.4. Classification des MCP utilisés dans les bâtiments

Généralement, le changement de phase dans les MCP intégrés dans les murs des bâtiments, pour stocker l'énergie, est solide/liquide. Cela est justifié par leurs chaleurs latentes élevées ainsi que

leurs expansions volumiques réduites (<10%) lors de la fusion [14]. Selon leurs natures chimiques, les MCP sont classées en trois grands groupes : les MCP inorganiques, organiques et les eutectiques.

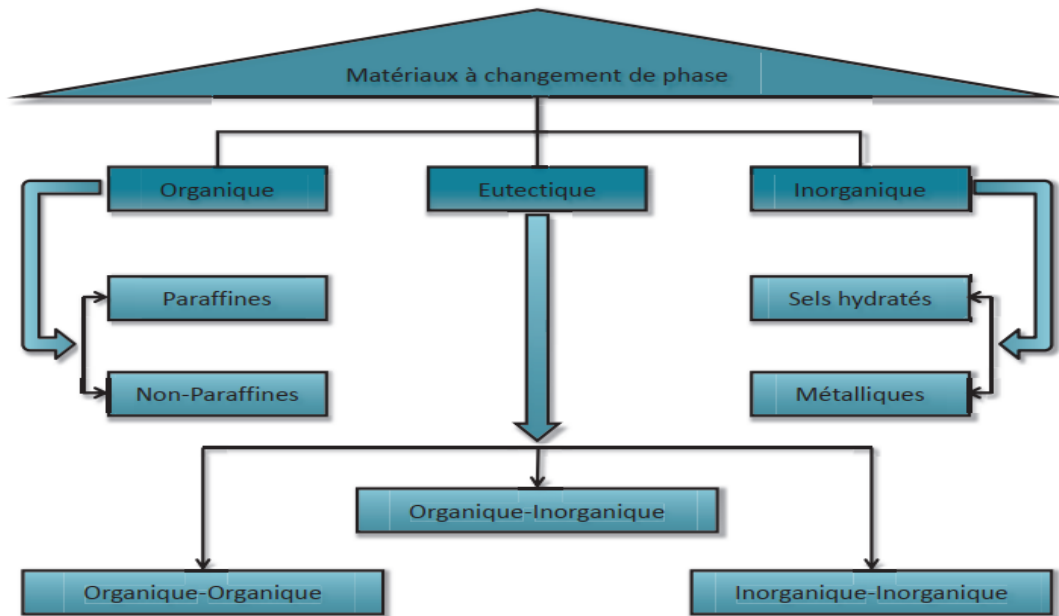


Figure I.3: Classification des matériaux à changement de phase [14].

I.4.1. Les MCP inorganiques

Utilisés pour le stockage d'énergie thermique dans des domaines à moyenne et haute température, les MCP inorganiques impliquent des sels hydratés, des sels fondus, des métaux et des alliages [16]. Ils sont ininflammables, leur accès est facile, leur prix d'investissement est abordable, ils ont une conductivité thermique élevée, leur fusion se fait dans une plage étroite (fusion nette) et leur chaleur latente est importante.

On n'a pas que des propriétés désirables dans ces matériaux, ils ont aussi des inconvénients tels que : la surfusion, la corrosion et la ségrégation qui nous oblige à utiliser des agents de nucléation afin d'être fiables [17].

I.4.2. Les MCP organiques

Parmi les MCP organiques on retrouve les paraffines, les non-paraffines et les acides gras qui sont fréquemment étudiés à cause de leur capacité élevée de chaleur latente, de leur température de changement de phase appropriée et de la stabilité de leur propriétés physicochimiques [18].

Par contre, ils sont inflammables et possèdent une faible conductivité thermique [15].



Figure I.4: Paraffine RT60 de Rubitherm [15].

I.4.2.1. Les paraffines

Constituées par des mélanges d'hydrocarbures saturés de la famille des alcanes, de formule générale C_nH_{2n+2} , les paraffines sont une famille des MCP organiques, elles ont des propriétés physiques qui sont assez semblables. Celles qu'on caractérise de liquides sont celles dont le nombre d'atomes de carbone se situe entre 5 et 15, les autres sont des solides cireux. La paraffine est beaucoup utilisée car non seulement : elle possède une chaleur latente raisonnablement élevée (de l'ordre de 200 kJ/kg) selon [13] mais aussi parce qu'elle est fiable, sûre, non-réactive selon [4] et [19], non-corrosive, possède un long cycle de fusion, s'incorpore facilement dans les systèmes de stockage d'énergie, elle est compatible avec tous les conteneurs en métal et enfin elle est chimiquement stable (à des températures inférieure à 500°C) [14]. Sa variation en volume et sa pression en vapeur sont faibles lors du changement de phase [13] et en ce qui concerne le coût, elles sont peu coûteuses.

En revanche, elles présentent, également, certains inconvénients tels que : l'inflammabilité, une faible conductivité thermique qui provoque une diminution du taux de stockage/déstockage de la chaleur pendant les cycles de fusion/solidification et enfin l'incompatibilité avec les conteneurs en plastiques. Néanmoins, une légère modification des propriétés physiques et de l'unité de stockage permet de réduire ces propriétés non désirables [20]. Sharma et *al.* [4], ont établi une liste exhaustive et bien détaillée de quelques paraffines avec leurs principales propriétés physiques. À titre d'exemple, on a repris, dans le tableau I.1, les propriétés de trois alcanes de cette liste.

Tableau I.1: Température de changement de phase et chaleur latente de quelques paraffines [4].

Nombre d'atomes de carbone	Température de fusion (°C)	Chaleur latente de fusion (kJ/kg)
14	5.5	228
16	16.7	237.1
18	28	244

I.4.2.2. Les non-paraffines

De propriétés très différentes il s'agit de la plus grande famille des matériaux à changement de phase. Ces matériaux ont plus d'inconvénients que d'avantages.

I.4.3. Les MCP eutectiques

Ils sont formés par un mélange d'un ou de plusieurs MCP que ça soit organique, inorganique ou des deux à la fois, avec une température ou une plage étroite de fusion/solidification [11]. En général, ils sont un mélange des deux c'est-à-dire organique et inorganique. Le principal avantage de ce type de MCP est sa chaleur latente élevée [21, 22, 23]. Par contre ils sont coûteux et présentent des problèmes de surfusion [15].

I.5. Les critères de sélection du MCP

Le choix d'un matériau à changement de phase est considéré comme une étape cruciale dans l'amélioration de l'efficacité énergétique d'un bâtiment [24].

Même s'il existe de nombreux MCP disponibles, en choisir un reste toujours difficile pour les constructeurs de bâtiments car chaque matériau a ses propres propriétés thermophysiques, cinétiques et chimiques [2]. Pour les applications de construction, il est recommandé que la plage de température soit comprise entre 15-30°C selon [25] et 20-32°C selon [26] qui sont la gamme de confort thermique. Selon Sarbu et Dorca [27], le choix du MCP pour toute application est influencé par trois facteurs fondamentaux à savoir : la température de fusion, la chaleur latente de fusion et les propriétés thermophysiques. Des paramètres tels que la densité, la conductivité thermique et la capacité thermique spécifique sont considérés comme des facteurs primaires importants qui peuvent influencer les performances globales.

Le choix du MCP approprié est conditionné par des critères à savoir thermodynamiques, physiques, cinétiques, chimiques et économiques [28]. Une liste très complète des principales caractéristiques accompagnant le choix d'un MCP est présentée par Abhat [29] et Kenisarin [30] comme on peut le voir dans le tableau I.2.

Tableau I.2: Les critères à respecter lors du choix d'un MCP [13].

Thermiques	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Une température de fusion dans la gamme de températures de fonctionnement du système ; ✓ Une chaleur latente de transition élevée ; ✓ Une conductivité thermique élevée pour un bon transfert thermique.
Physiques	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Une densité importante ; ✓ Une faible variation volumique durant le processus de changement de phase.
Cinétiques	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Le recours à l'utilisation d'additifs est nécessaire pour réduire la surfusion ; ✓ Le taux de cristallisation doit être important.
Chimiques	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Une stabilité chimique à long terme des cycles de fusion/solidification ; ✓ La compatibilité avec les matériaux de construction ; ✓ La dangerosité du produit doit être minimisée (toxicité, inflammabilité, explosion ...).
Economiques	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Le coût est un critère très important car on cherche toujours les matériaux qui sont à des prix abordables ; ✓ Les matériaux doivent être disponibles en grande quantité.

En respectant la thématique de ce travail et l'ensemble des critères susmentionnés, on peut opter pour les MCP à transformation solide/liquide du groupe des MCP organiques plus précisément « la cire de paraffine » qui est, généralement, utilisée dans le secteur du bâtiment.

I.6. Synthèse des travaux dans le secteur du bâtiment

Au cours des 20 dernières années, de nombreux scientifiques se sont intéressés à la recherche de méthode appropriée afin d'intégrer les MCP non seulement dans les matériaux mais aussi dans différents éléments de construction. Pour le chauffage ou le refroidissement d'un bâtiment, l'utilisation des MCP peut se faire de trois manières différentes [14] à savoir: l'intégration dans les murs du bâtiment, l'intégration dans les éléments de construction autres que les murs et enfin l'intégration dans les unités de stockages à chaud et/ou à froid.

Parmi les trois méthodes d'intégration citées précédemment, la plus utilisée est celle dans les murs car non seulement la zone d'échange de chaleur est importante, mais également la mise en œuvre est pratique et simple. On a deux méthodes d'intégration des MCP dans les murs qui sont « l'immersion »

et « l'attachement » [14]. Pour la méthode « d'attachement », le MCP est directement intégré dans les panneaux muraux au lieu des murs de construction principale, ce qui permet de rendre esthétique l'enveloppe du bâtiment lors de sa finalisation. Tandis que « l'immersion » consiste à intégrer les MCP dans les matériaux de construction de l'enveloppe du bâtiment tels que : le plâtre, les briques et le béton. La plus répandue d'entre les deux méthodes est « l'attachement » [14].

L'immersion est faite soit directement ou par encapsulation (que ça soit macro ou micro). En ce qui concerne la dernière manière, les MCP doivent être encapsulés avant leur intégration dans la construction [31, 32]. Il a été démontré que la micro-encapsulation est la mieux adaptée car le MCP est encapsulé dans des polymères et la dimension de la capsule étant de l'ordre du micromètre, joue un rôle de protection en empêchant non seulement l'écoulement du MCP à la phase liquide mais aussi le contact direct entre le MCP et le matériau de construction [33, 34].

Chapitre II

Modélisation du transfert thermique d'un mur comportant une couche de MCP

Chapitre II : Modélisation du transfert thermique d'un mur comportant une couche de MCP

II.1. Introduction

Afin de prévoir la quantité d'énergie qu'un système doit échanger avec l'extérieur pour passer d'un état d'équilibre à un autre, l'utilisation des équations de la thermodynamique s'impose. Dans le but de comprendre l'évolution des grandeurs caractéristiques, en particulier la différence de température entre l'état d'équilibre initial et celui final, la thermocinétique (ou thermique) se propose de faire la description quantitative dans le temps ainsi que dans l'espace.

II.2. Présentation du modèle physique du mur

Pendant la période estivale, on observe une forte augmentation de température susceptible de nuire au confort thermique des occupants dans différentes habitations. Dans ces conditions, nul ne peut empêcher les gains de chaleur à l'intérieur des demeures, afin d'essayer de maintenir le confort thermique, on est obligé d'investir dans le refroidissement de l'air intérieur, de ce fait les dépenses liées à ce refroidissement vont augmenter. Afin de pallier à ce problème, dans ce travail une étude numérique sur un mur incorporant du MCP sera faite pour essayer de minimiser les gains de chaleur à l'intérieur du bâtiment et, par la même occasion, réduire le prix des factures liées aux systèmes de refroidissement.

Le modèle physique choisi, dans la présente étude, est à la base un mur de 260 mm d'épaisseur composé de deux couches de briques creuses de 100 mm chacune avec une couche d'isolant de 60 mm entre elles.

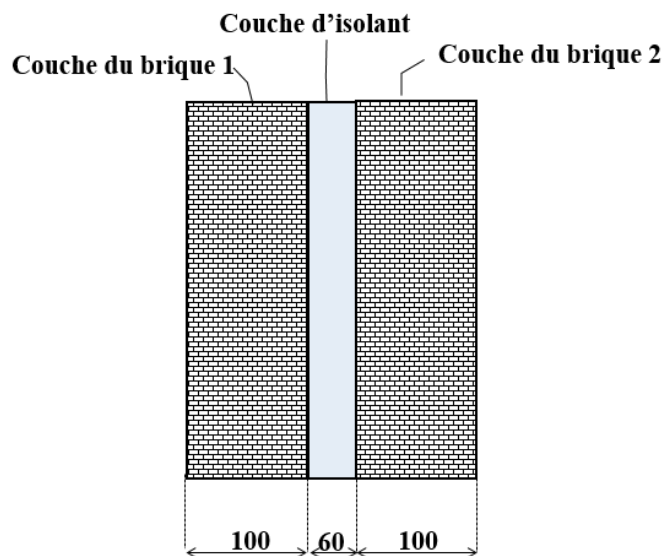


Figure II.1: Mur sans MCP.

Chapitre II Modélisation du transfert thermique d'un mur comportant une couche de MCP

Afin d'observer l'impact que ce matériau, précédemment cité, a sur le transfert thermique vers l'intérieur du bâtiment, une couche de MCP d'épaisseur e sera interposée entre l'une des deux couches de brique et la couche de l'isolant dont l'épaisseur sera réduite à $60-e$ mm.

A ce stade la question qu'on se pose c'est, quel est l'emplacement optimal de cette couche de MCP dans le mur afin de résoudre le problème auquel on fait face ? Deux cas de figures se présentent, la configuration 1 qui consiste à mettre cette couche entre le côté interne du mur et l'isolant, soit la deuxième configuration dans laquelle elle se trouve entre le côté externe et l'isolant.

Les résultats de l'étude numérique nous éclaireront sur la meilleure configuration à adopter.

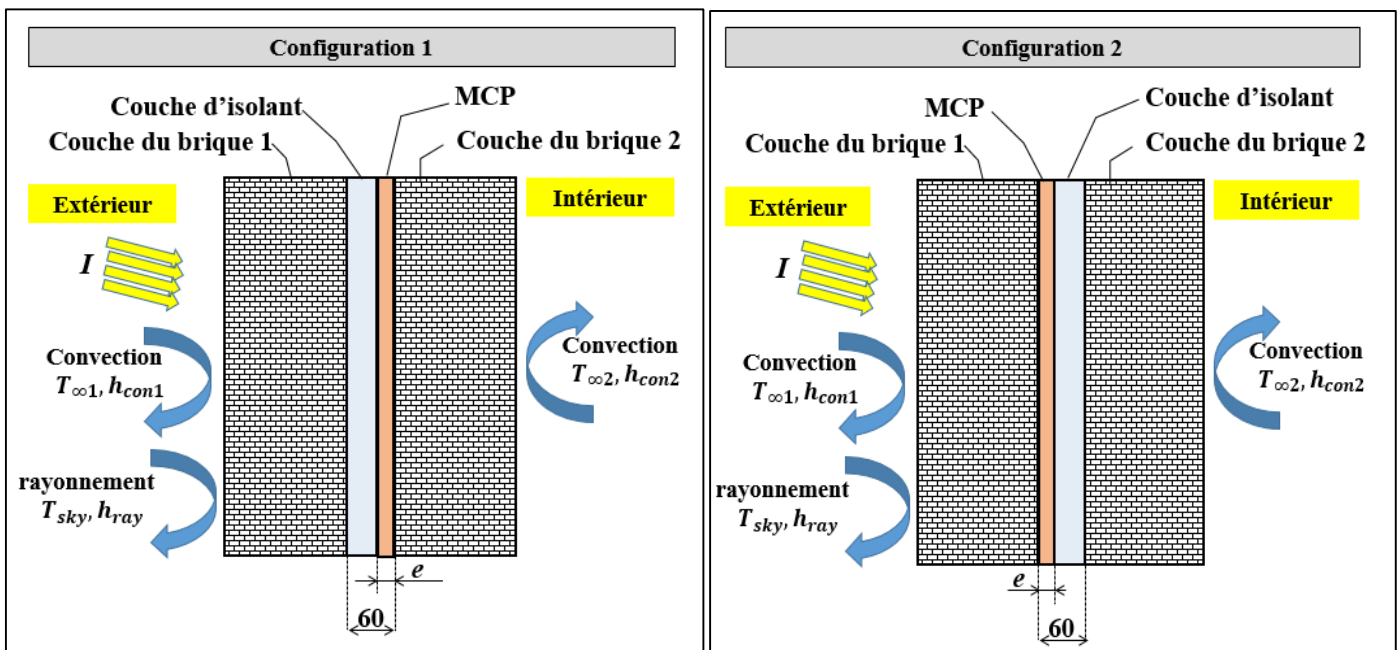


Figure II.2: Schémas des deux configurations étudiées.

II.3. Hypothèses simplificatrices de base

Dans le but de modéliser le problème physique qui fait l'objet de l'étude, il est indispensable d'avoir recours à des hypothèses qui faciliteront les calculs.

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 mur se fait uniquement par conduction ;
- Le transfert est unidirectionnel ;
- La variation du volume dans le MCP lors de la transition de phase est négligeable.

II.4. Analyse du transfert de chaleur et résolution numérique

II.4.1. Analyse du transfert thermique

Le transfert d'énergie est l'interaction d'un système avec l'extérieur selon les principes fondamentaux de la thermodynamique [35]. Le transfert par conduction, convection et enfin par rayonnement sont les trois modes de transfert qu'on retrouve au sein d'un matériau. La propagation de la chaleur au sein du corps concerné est la conduction. La convection quant à elle intervient entre une surface et un fluide. Et enfin le rayonnement est issu de l'interaction entre une onde électromagnétique et le matériau, on le retrouve également dans le vide. Ce mode devient non négligeable au sein des solides à hautes températures [36].

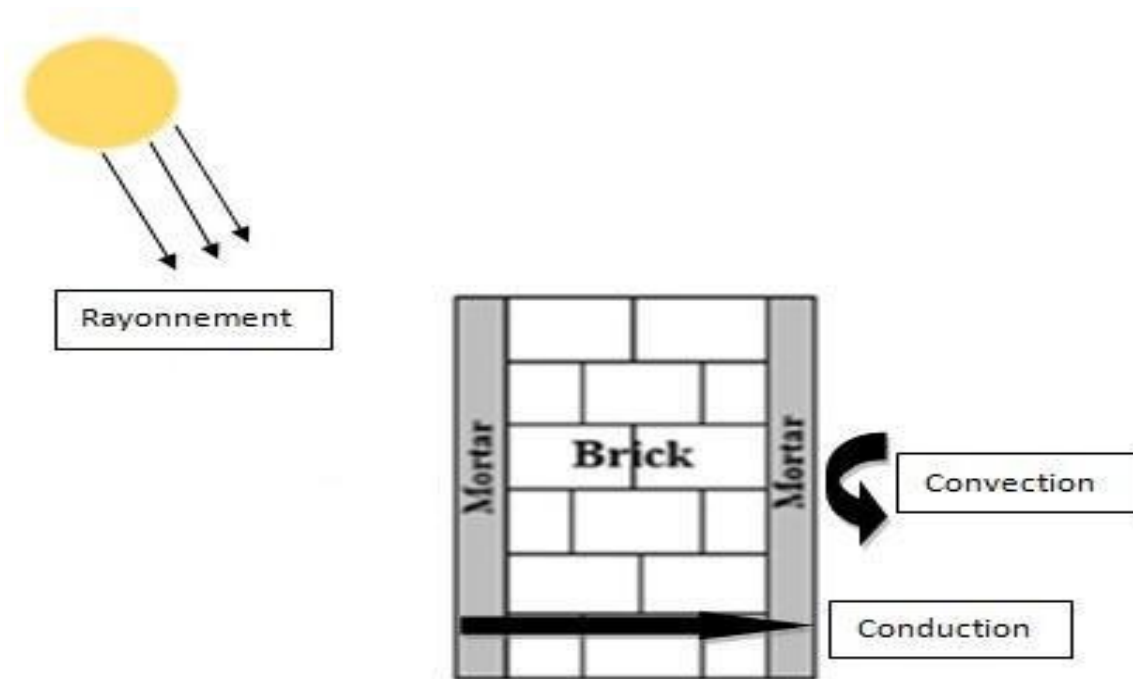


Figure II.3: L'illustration des trois modes de transfert pour un mur [35].

Le transfert par conduction est régi par :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \vec{\nabla} T) + s \quad (\text{II.1})$$

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:

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

Pour étudier le transfert thermique à travers les différentes parois, un volume de contrôle est défini autour de chaque nœud et est analysé à l'aide de bilans énergétiques pour élaborer un ensemble

Chapitre II Modélisation du transfert thermique d'un mur comportant une couche de MCP

d'équations à résoudre afin d'obtenir la température, à l'instant t , à chaque nœud. Le bilan énergétique du premier nœud, situé sur la face extérieure du mur est selon [37] :

$$\frac{\Delta x}{2} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{x=0} = \alpha I - h_c (T_{x=0} - T_{\infty 1}) + \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\frac{\Delta x}{2}} \quad (\text{II.3})$$

Où ρ est la densité du matériau de la paroi, c la capacité thermique spécifique. Le terme αI correspond à la fraction de l'énergie solaire incidente sur la surface du mur qui est absorbée, avec une valeur de $\alpha = 0.6$ [37].

Quant au deuxième terme du membre de droite de la relation (II.3), il représente le transfert thermique par convection et rayonnement de la surface du mur vers l'environnement. Ce terme peut être positif comme il peut être négatif, tout dépend du moment de l'année dans lequel on se trouve. Par exemple lors d'une journée d'été où la température de l'environnement extérieur est supérieure à celle de la surface du mur, ce terme est positif ; en revanche pendant l'hiver où on a l'inverse il est négatif. Le coefficient h_c est la somme des deux coefficients de transfert par convection et par rayonnement [37].

$$h_c = h_{conv1} + h_{ray} \quad (\text{II.4})$$

Defraeye et al. [38], ont conclu, après avoir étudié le coefficient d'échange convectif pour l'extérieur d'une surface de bâtiment pour différentes corrélations, qu'en fonction des conditions auxquelles le système est soumis, les formules à utiliser, pour calculer ce coefficient, sont différentes. Néanmoins pour notre étude l'expression de l'équation (II.5) sera utilisée [37].

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

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

Le coefficient d'échange par rayonnement est calculé avec l'équation (II.6).

$$h_{ray} = \varepsilon \sigma (T_{sk}^2 + T_{x=0}^2) (T_{sk} + T_{x=0}) \quad (\text{II.6})$$

Où

Chapitre II Modélisation du transfert thermique d'un mur comportant une couche de MCP

- ε est l'émissivité ($\varepsilon = 0.9$ [37]).
- σ est la constante de Stefan-Boltzmann : $\sigma = 5.675 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
- T_{sk} est la température apparente du ciel, calculée à l'aide de la relation suivante [39]:

$$T_{sk} = 0.0552T_{\infty 1}^{1.5} \quad (\text{II.6.a})$$

Dans notre étude, en se basant sur le travail de Aly et *al.* [39], le bilan énergétique du nœud θ , donné par l'équation (II.3), est légèrement modifié comme suit :

$$\frac{\Delta x}{2} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{x=0} = \alpha I - h_{con1}(T_{x=0} - T_{\infty 1}) - h_{ray}(T_{x=0} - T_{sk}) + \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\frac{\Delta x}{2}} \quad (\text{II.7})$$

Le bilan énergétique de l'autre face du mur, celle qui se trouve en contact avec l'intérieur, est traduit par l'équation suivante [37]:

$$\frac{\Delta x}{2} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{x=L} = -h_{conv2}(T_{x=L} - T_{\infty 2}) - \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L-\frac{\Delta x}{2}} \quad (\text{II.8})$$

Concernant le calcul du coefficient d'échange convectif interne, de nombreuses divergences peuvent être trouvées dans la littérature. Néanmoins dans le cadre de ce travail, c'est l'équation présentée par [37] basée sur des calculs expérimentaux qui sera retenue.

$$h_{conv2} = \frac{1.823}{D^{0.121}} (T_{x=L} - T_{\infty 2}) \quad (\text{II.9})$$

Où D est le diamètre hydraulique qui est calculé en supposant un mur carré de 3 m, à l'aide de la relation suivante [37]:

$$D = \frac{4S}{P} \quad (\text{II.10})$$

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

II.4.2. Formulation mathématique du problème de changement de phase

De nombreuses solutions analytique sont proposées pour résoudre les cas les plus simples en ce qui concerne les problèmes de changement de phase dans la littérature. Etant donné que ces solutions de la littérature s'appliquent dans le cas où le milieu est considéré comme semi-fini alors

Chapitre II Modélisation du transfert thermique d'un mur comportant une couche de MCP

elles ne suffisent pas lorsqu'on s'intéresse à des problèmes un peu plus complexes. Afin de traiter le phénomène de changement de phase en milieu fini il faut recourir au calcul numérique.

Malgré l'existence, dans la littérature, de plusieurs méthodes numériques pour la résolution du problème de changement de phase [40], la méthode enthalpique et celle de la capacité thermique apparente sont les plus rencontrées [41].

Dans le cadre du présent travail, on a opté pour la méthode enthalpique afin d'éviter la divergence de la méthode de la capacité apparente remarquée dans la zone de transition pour les chaleurs latentes élevées [41].

II.4.2.1. La méthode enthalpique

Le problème de changement de phase devient plus simple avec l'introduction de la méthode enthalpique. C'est une méthode qui nous permet de déterminer le champ de température sans connaître la progression du front de température dans le temps. Ainsi, lorsqu'il y'a existence d'une zone pâteuse, elle nous permet de résoudre les problèmes de changement de phase pour des géométries complexes [41]. Pour la résolution des problèmes de Stefan, c'est l'une des méthodes à domaine fixe les plus populaires [42].

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 [42]:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla(\lambda_p(\nabla T)) \quad (\text{II.11})$$

Où H est l'enthalpie volumétrique totale, en $[\text{J}/\text{m}^3]$; t est le temps, en $[\text{s}]$; λ_p est la conductivité thermique du MCP à la phase p , en $[\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}]$ et enfin T est la température en $[\text{°C}]$. L'enthalpie volumétrique totale est la somme de la chaleur sensible et latente du MCP, c'est-à-dire :

$$H(t) = h(t) + \rho_l f(t)L_f \quad (\text{II.12})$$

Où h est l'enthalpie volumétrique sensible, en $[\text{J}/\text{m}^3]$; ρ_l est la masse volumique du MCP à l'état liquide, en $[\text{kg}/\text{m}^3]$; f est la fraction massique fondue ; et L_f est la chaleur latente de fusion, en $[\text{J}/\text{kg}]$.

L'expression de l'enthalpie volumétrique sensible est :

$$h = \int_{T_f}^T \rho_p c_p dT \quad (\text{II.13})$$

Avec c_p la chaleur spécifique du MCP à la phase p en $[\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}]$; T_f la température de fusion en $[\text{°C}]$.

Chapitre II Modélisation du transfert thermique d'un mur comportant une couche de MCP

Dans le cas d'un changement de phase isotherme, la fraction massique fondue est donnée par [42]:

$$f = \begin{cases} 0, & \text{si } T < T_f \text{ (solide)} \\ 0 - 1, & \text{si } T = T_f \text{ (mélange)} \\ 1, & \text{si } T > T_f \text{ (liquide)} \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Suite aux équations (II.12) et (II.13), l'enthalpie du MCP est [42] :

$$H = \int_{T_f}^T \rho_s c_s dT, \quad T < T_f \text{ (solide)} \quad (\text{II.15})$$

$$H = \rho_l f L_f, \quad T = T_f \text{ (mélange)} \quad (\text{II.16})$$

$$H = \int_{T_f}^T \rho_l c_l dT + \rho_l L_f \quad T > T_f \text{ (liquide)} \quad (\text{II.17})$$

En ce qui concerne la température, la résolution de ces trois dernières équations nous permet d'écrire [42]:

$$T = \frac{T_f + H}{\rho_s c_s}, \quad H < 0 \text{ (solide)} \quad (\text{II.18})$$

$$T = T_f, \quad 0 \leq H \leq \rho_l L_f \text{ (mélange)} \quad (\text{II.19})$$

$$T = \frac{T_f + (H - \rho_l L_f)}{\rho_l c_l}, \quad H > \rho_l L_f \text{ (solide)} \quad (\text{II.20})$$

II.4.2.2. Discrétisation par la méthode des différences finies

La méthode de différences finies (MDF) figure parmi les méthodes numériques les plus répandues utilisées pour la résolution des équations différentielles partielles. Cette méthode est basée sur l'évaluation des dérivées partielles d'une fonction en un point donné par combinaison d'un nombre fini des valeurs, de cette fonction, en points voisins en espace ou en temps [43]. Ce qui impose la discrétisation du domaine étudié à l'aide d'une grille définie par ses nœuds.

Dans ce travail, pour la résolution numérique de la formulation enthalpique donnée par la formule (II.11), par la méthode des différences finies, le mur est subdivisé en n segments égaux, chacun de largeur $\Delta x = L/n$.

En utilisant le schéma explicite, l'équation (II.11) 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 :

$$\frac{H_i^{k+1} - H_i^k}{\Delta t} = \lambda_p \frac{T_{i+1}^k - 2T_i^k + T_{i-1}^k}{\Delta x^2} \quad (\text{II.21})$$

- 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 convient de noter que la condition suivante doit être satisfaite pour la stabilité de l'équation (II.21) :

$$\frac{\Delta t}{\Delta x^2} \leq \frac{c_p \rho_p}{\lambda_p} \quad (\text{II.22})$$

II.5. Formulation des équations

La démarche générale de la méthode enthalpique explicite, utilisée dans ce travail, pour une période donnée de durée t_D , comporte les étapes suivantes :

1. **Initialisation $k=0$** : calculer les enthalpies volumétriques totales à chaque nœud H_i^0 à partir des conditions initiales.
2. Calculer, à l'instant t_{k+1} , les enthalpies volumétriques totales à chaque nœud H_i^{k+1} à l'aide de l'équation (II.21).
3. Calculer les températures à chaque nœud T_i^{k+1} (pour les nœuds qui appartiennent à la couche du MCP, en fonction de la valeur de H_i^{k+1} à choisir la relation appropriée parmi les trois relations (II.18), (II.19) et (II.20).
4. Si $t_{k+1} \geq t_D$ **arrêter sinon** incrémenter : $k=k+1$, et aller à 2.

Pour obtenir ces températures on doit avoir une équation pour chaque nœud. L'équation du nœud est obtenue à partir de l'équation (II.11).

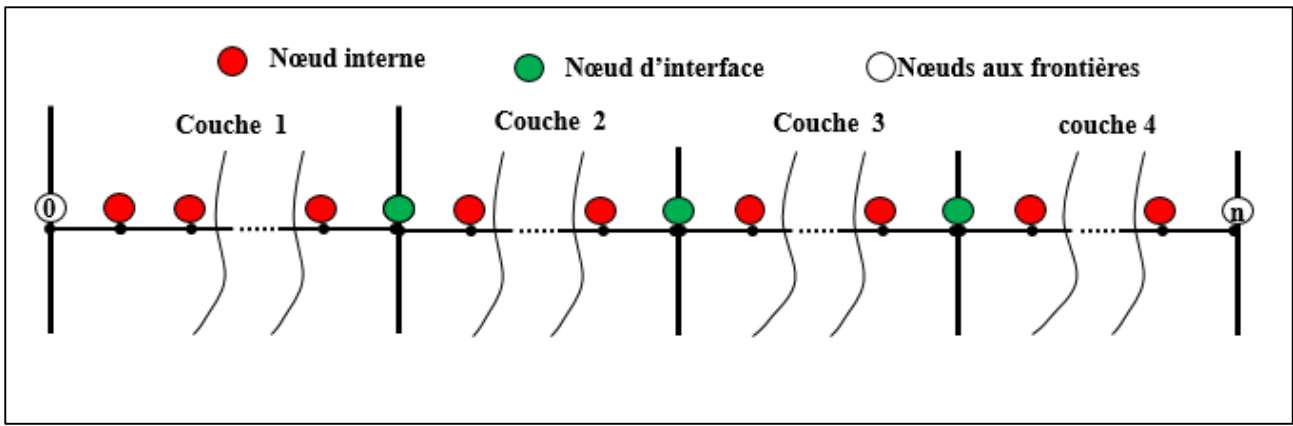


Figure II.4: Les trois types de nœuds issus de la discrétisation du mur.

La formulation de différence finie des nœuds internes est obtenue directement à partir de l'équation (II.21) :

$$H_i^{k+1} = H_i^k + \left(\frac{\lambda_p \Delta t}{\Delta x^2} \right) (T_{i-1}^k - 2T_i^k + T_{i+1}^k) \quad (\text{II.23})$$

Pour les nœuds de frontières, les équations (II.7) et (II.8) nous permettent d'écrire :

$$H_0^{k+1} = H_0^k + \left(\frac{2\lambda_b \Delta t}{\Delta x^2} \right) T_1^k - \left(\frac{2\lambda_b \Delta t}{\Delta x^2} + \frac{2h_{con1} \Delta t}{\Delta x} + \frac{2h_{ray} \Delta t}{\Delta x} \right) T_0^k + \left(\frac{2\Delta t}{\Delta x} \right) (h_{conv1} T_{\infty 1} + h_{ray} T_{sk} + \alpha I) \quad (\text{II.24})$$

$$H_n^{k+1} = H_n^k + \left(\frac{2\lambda_b \Delta t}{\Delta x^2} \right) T_{n-1}^k - \left(\frac{2\lambda_b \Delta t}{\Delta x^2} + \frac{2h_{conv2} \Delta t}{\Delta x} \right) T_n^k + \left(\frac{2\Delta t}{\Delta x} \right) (h_{conv2} T_{\infty 2}) \quad (\text{II.25})$$

Pour un nœud d'interface qui se trouve entre les deux couches A et B, son enthalpie volumétrique sensible est calculée à l'aide de la relation suivante :

$$H_i^{k+1} = H_i^k + \left(\frac{\lambda_A \Delta t}{\Delta x^2} \right) T_{i-1}^k - \left(\frac{\Delta t}{\Delta x^2} \right) (\lambda_A + \lambda_B) T_i^k + \left(\frac{\lambda_B \Delta t}{\Delta x^2} \right) T_{i+1}^k \quad (\text{II.26})$$

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

$$f_i^k = \begin{cases} 0, & \text{si } H_i^k < 0 \\ \mathbf{min} \left(1, \frac{H_i^k}{\rho_l L_f} \right) & \text{si } H_i^k > 0 \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Puis la conductivité thermique du MCP à ce nœud est calculé comme suit [41] :

$$\lambda_i^k = (1 - f_i^k)\lambda_s + f_i^k\lambda_l \quad (\text{II.28})$$

Pour calculer, enfin, l'enthalpie volumétrique sensible correspondante à l'aide de la relation suivante :

$$H_i^{k+1} = H_i^k + \left(\frac{\lambda_{i-1}^k \Delta t}{\Delta x^2} \right) T_{i-1}^k - \left(\frac{\Delta t}{\Delta x^2} \right) (\lambda_{i-1}^k + \lambda_{i+1}^k) T_i^k + \left(\frac{\lambda_{i+1}^k \Delta t}{\Delta x^2} \right) T_{i+1}^k \quad (\text{II.29})$$

II.6. Densité de flux de chaleur ou flux instantané de chaleur gagné

Le flux thermique de chaleur instantané gagné pendant la période estivale, $\dot{Q}(t)$, est défini comme le flux de chaleur à travers la face intérieure du mur pour chaque instant de temps et il a l'expression suivante [37] :

$$\dot{Q}(t) = h_{conv2}(t)(T_{x=L}(t) - T_{\infty2}) \quad (\text{II.30})$$

L'énergie totale gagnée Q (J/m^2), toujours pour la période estivale, est obtenue par l'intégration du flux de chaleur gagné sur la durée de la période de temps t_D .

$$Q = \int_{t=0}^{t=t_D} \dot{Q} dt \quad (\text{II.31})$$

Le flux de chaleur instantané gagné moyen (\bar{Q} en W/m^2) est calculé en divisant l'énergie totale gagnée par la durée de la période de temps t_D .

$$\bar{Q} = \frac{Q}{t_D} \quad (\text{II.32})$$

Chapitre III

Résultats et discussion

Chapitre III : Résultats et discussion

III.1. Introduction

Contrairement à certains pays européens, la consommation d'énergie électrique en Algérie durant la période estivale est plus importante à celle enregistrée pendant la période hivernale. Cette consommation augmente d'année en année, comme c'est indiqué sur la figure III.1, à cause des changements climatiques qui engendrent des températures plus élevées, des sécheresses intenses et des graves incendies.

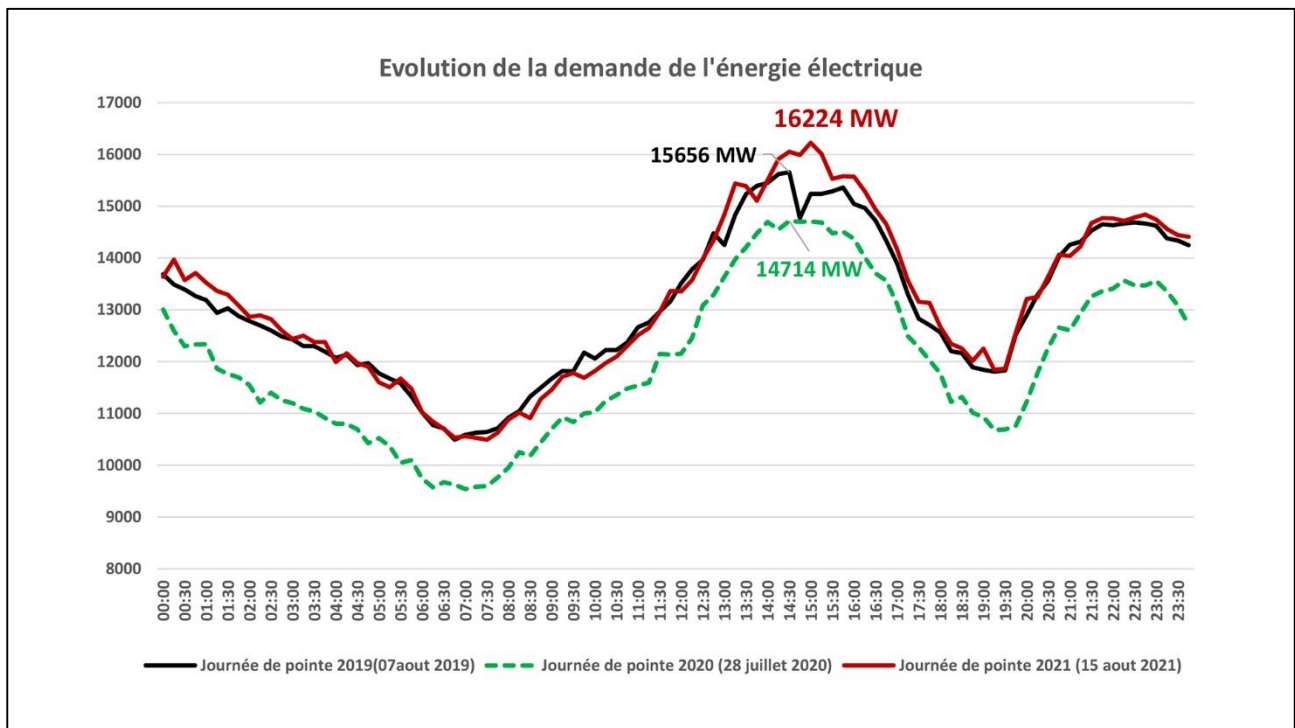


Figure III.1: Evolution de la demande de l'énergie électrique en Algérie [44].

Il est clair que la plus grande partie de l'énergie électrique consommée, en été, est destinée à la climatisation. Ainsi, afin d'alléger les factures, il est primordial d'assurer une bonne isolation dans les immeubles. Dans ce travail, l'intérêt fut porté sur l'amélioration des performances énergétiques des murs par l'intégration d'une couche de MCP dans ces derniers.

Dans ce chapitre, nous présenterons les principaux résultats issus des simulations, des trois cas étudiés (mur sans MCP, deux configurations pour le mur avec MCP), faites à l'aide d'un script que nous avons développé sous l'environnement Matlab.

III.2. Données météorologiques de la ville de Chlef

La ville de Chlef a un climat semi-aride qui se caractérise par un été très chaud et un hiver pluvieux et froid [45].

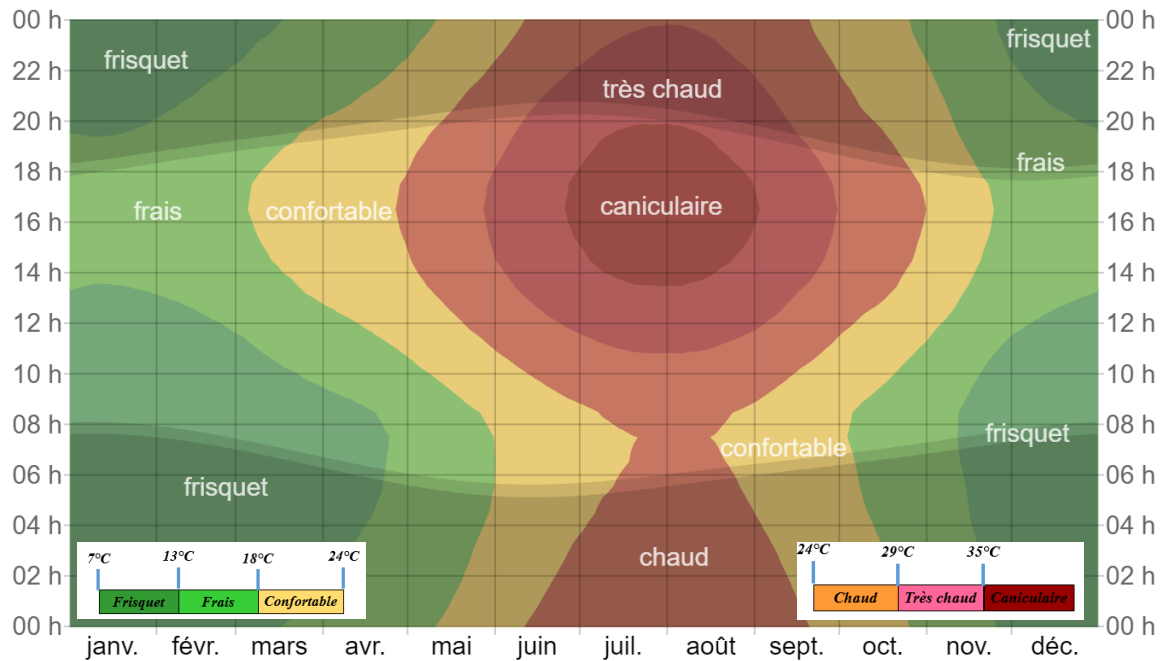


Figure III.2: Température horaire moyenne à Chlef [45].

Afin de générer les données météorologiques de cette ville, le logiciel « Meteonorm 8 », qui permet d'estimer les données météorologiques pour différents climats et différentes zones géographiques dans le monde, fut utilisé.

Pour générer les données de ladite ville avec ce logiciel, on passe par plusieurs étapes telles que :

- Introduire les coordonnées GPS (Latitude et longitude) de la ville puis la sélectionner ;
- Choisir l'orientation approprié du plan : comme notre étude porte sur un mur vertical supposé orienté vers le sud, on a choisi un angle d'inclinaison égal à 90° et un angle d'azimut nul et les autres paramètres sont laissées sur leurs valeurs par défaut ;
- L'enregistrement des données météorologiques.

Ce logiciel a permis d'estimer les données météorologiques de la ville de Chlef pour l'année en cours. Cette estimation, qui est basée sur les données antérieures, donne les valeurs recherchées à chaque minute.

De toutes ces données, on a pris les données d'une période de 30h de durée de la période estivale. Cette période s'étend du minuit (00h00min) du 11 Août 2022 à six heures du matin du lendemain (06h00min).

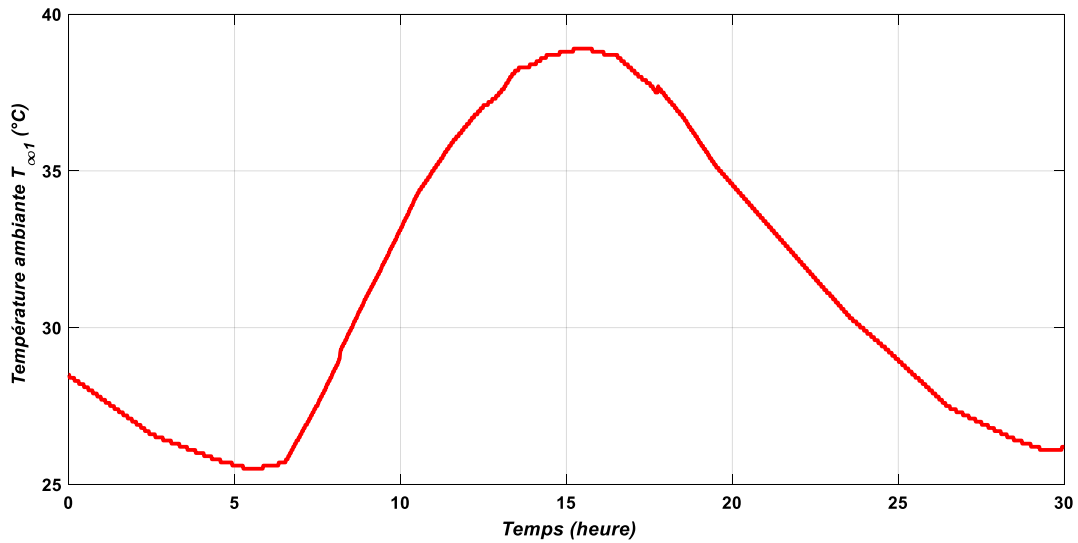


Figure III.3: Estimation de la variation de la température ambiante en fonction du temps.

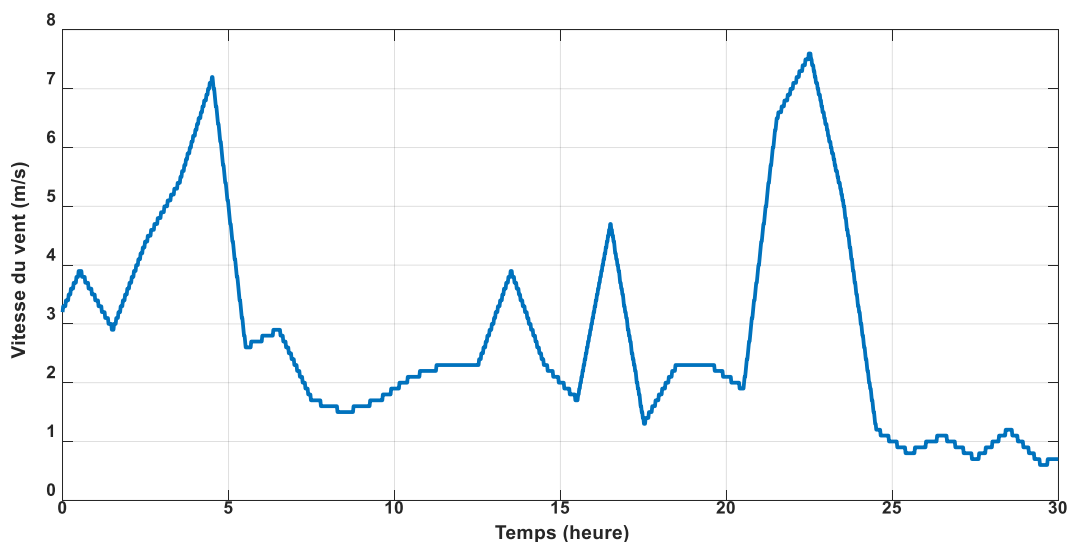


Figure III.4: Estimation de la variation de la vitesse du vent en fonction du temps.

Sur les figures III.3 et III.4 sont tracés, respectivement, les variations de la température ambiante et de la vitesse du vent au cours de la période étudiée. La température ambiante maximale de cette période (38,9°C) est enregistrée de 15h13min à 15h47min, alors que les valeurs maximales des vitesses du vent (>7m/s) sont enregistrées de 21h56 min à 22h46min.

La figure III.3 montre que la température ambiante, pour la journée du 11 Aout 2022, est supérieure à 35° C de 10h50min à 19h33min ce qui concorde parfaitement avec les données du « WeatherSpark » présentées par la figure III.1 [45]. Pour la vitesse du vent « WeatherSpark », pour cette même période,

il donne des valeurs qui fluctuent au tour d'une valeur moyenne qui est égale à environ 11.72 km/h, soit 3.06 m/s, dont la valeur maximale 5.56 m/s est enregistrée entre 15h00 et 19h00 [45]. Cependant, la valeur moyenne des vitesses de vent donnée par la figure III.4 est égale à 2.87 m/s ce qui est proche de la valeur moyenne donnée par « WeatherSpark ».

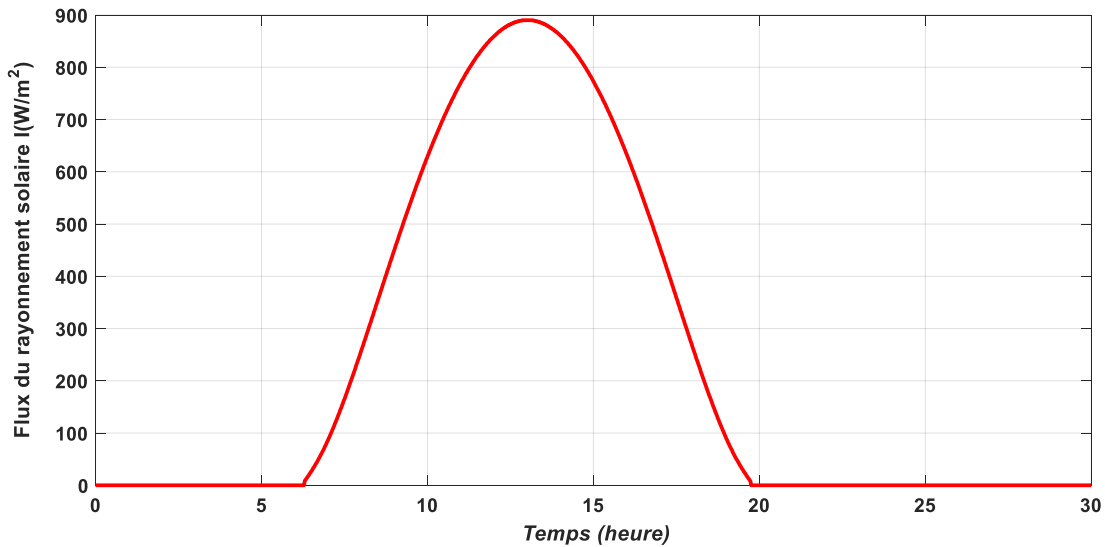


Figure III.5: Estimation de la variation du flux du rayonnement solaire intercepté par le mur en fonction du temps.

La figure III.5 présente la variation du flux du rayonnement solaire intercepté par le mur au cours de la période étudiée. La valeur maximale est égale à 890 W/m^2 , et est enregistrée de 12h51min à 13h11min. cette valeur est très proche de la valeur maximale que donne « WeatherSpark » pour cette journée qui est égale à 900 W/m^2 [45].

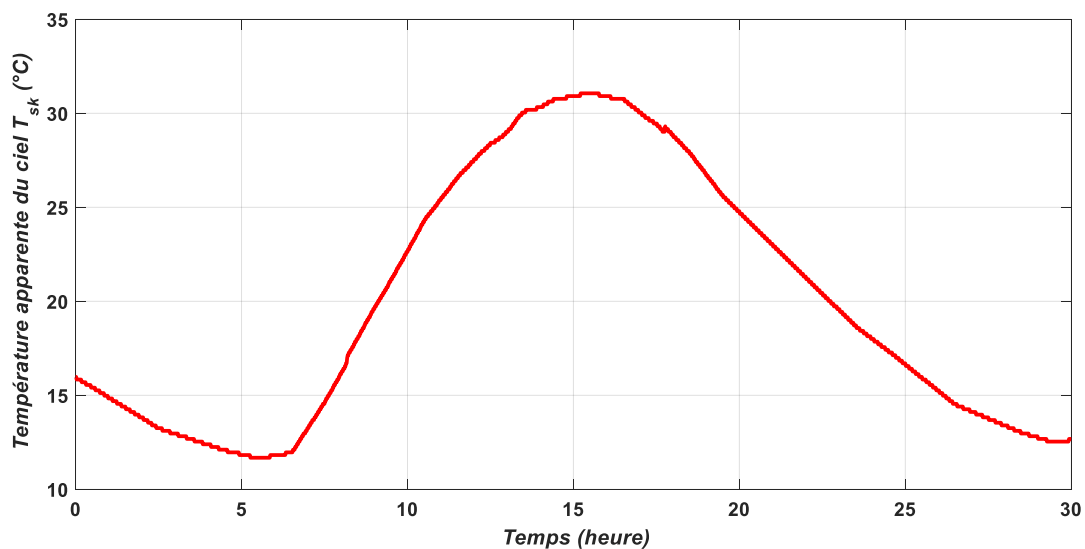


Figure III.6: Variation de la température apparente du ciel en fonction du temps.

La figure III.6 donne la variation de la température apparente du ciel en fonction du temps pour la période étudiée. Cette courbe est obtenue par l'injection des valeurs de la température ambiante dans l'équation (II.6.a).

Comme le calcul du coefficient convectif externe h_{conv1} à chaque instant se base, uniquement, sur la valeur de la vitesse du vent à ce même instant (voir l'équation (II.5)), la variation de ce coefficient en fonction du temps, durant la période étudiée, est identique pour les trois cas étudiés.

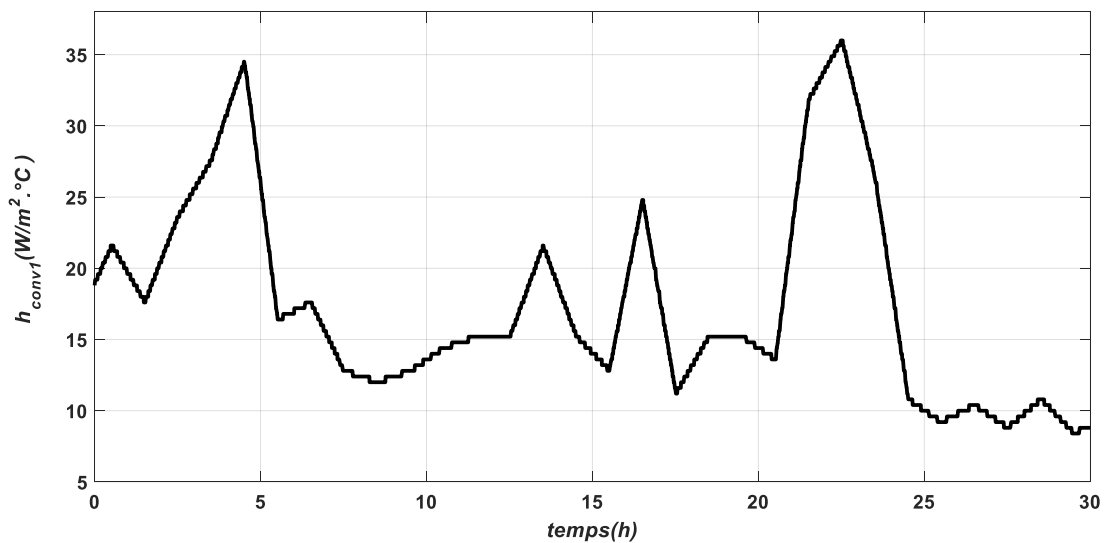


Figure III.7: Variation du coefficient convectif externe en fonction du temps.

Sur la figure III.7 est présentée la variation du coefficient h_{conv1} en fonction du temps. La plus grande valeur est égale à $35.99 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, la plus petite valeur est égale à $8.4 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ et enfin la valeur moyenne de ce coefficient, pour la période étudiée est égale à $17.46 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$.

III.3. Caractéristiques des matériaux sélectionnés

Le mur étudié à la base est constitué de deux couches de brique séparées par un isolant (l'une des normes de construction algérienne pour les murs extérieurs). Cet isolant nous permet de minimiser la consommation d'énergie et maintenir un confort thermique optimal en empêchant pour la climatisation, le froid de s'échapper de la pièce. Dans l'optique de performer au max le mur, une couche de paraffine (MCP) dont la température de fusion est $T_f = 29,2^\circ\text{C}$ et la chaleur latente $L_f = 131,7 \text{ kJ/kg}$ fut intégrée afin que la climatisation soit plus efficace et moins coûteuse. Le tableau ci-dessous nous donne des informations relatives aux propriétés thermophysiques des matériaux choisis.

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

Matériaux	λ (W/m °C)	ρ (kg/m ³)	c (J/kg °C)
Briques [37]	0.4	920	1000
Isolant [37]	0.038	32	1140
MCP			
Solide [46]	0.358	865	1934
Liquide [46]	0.148	780	2196

III.4. Organigramme du programme élaboré

Afin de mener à bien ce travail, un script Matlab qui nous permet de visualiser pour les configurations étudiées, les distributions de température dans le mur, la variation des coefficients d'échange et les gains thermiques a été développé. La figure III.8 présente l'organigramme du programme élaboré. Cet organigramme donne, en réalité un aperçu assez général du programme, en effet certains petits détails n'y sont pas mentionnés.

Le programme fait appelle à une fonction, qui n'apparait pas dans l'organigramme. Cette fonction, qu'on a créée afin de faciliter la manipulation, est la fonction « *conditions aux limites* », qui contient les données météorologiques de la ville de Chlef , elle calcule et renvoi les conditions aux limites à l'instant t_k .

Comme le schéma explicite impose une condition de stabilité, qui est donnée par la relation II.22, les propriétés thermophysiques des matériaux du modèle physique du mur, données par le tableau III.1, ont conduit à choisir les pas suivants : $\Delta t = 1s$ et $\Delta x = 2mm$, ce qui donne un maillage de 131 Nœuds.

Il reste à signaler, que la température à l'intérieur $T_{\infty 2}^k$, dans ce travail, est supposée fixe et est égale à 24°C. on a supposé également que le mur, initialement, se trouve à une température uniforme égale à 26°C.

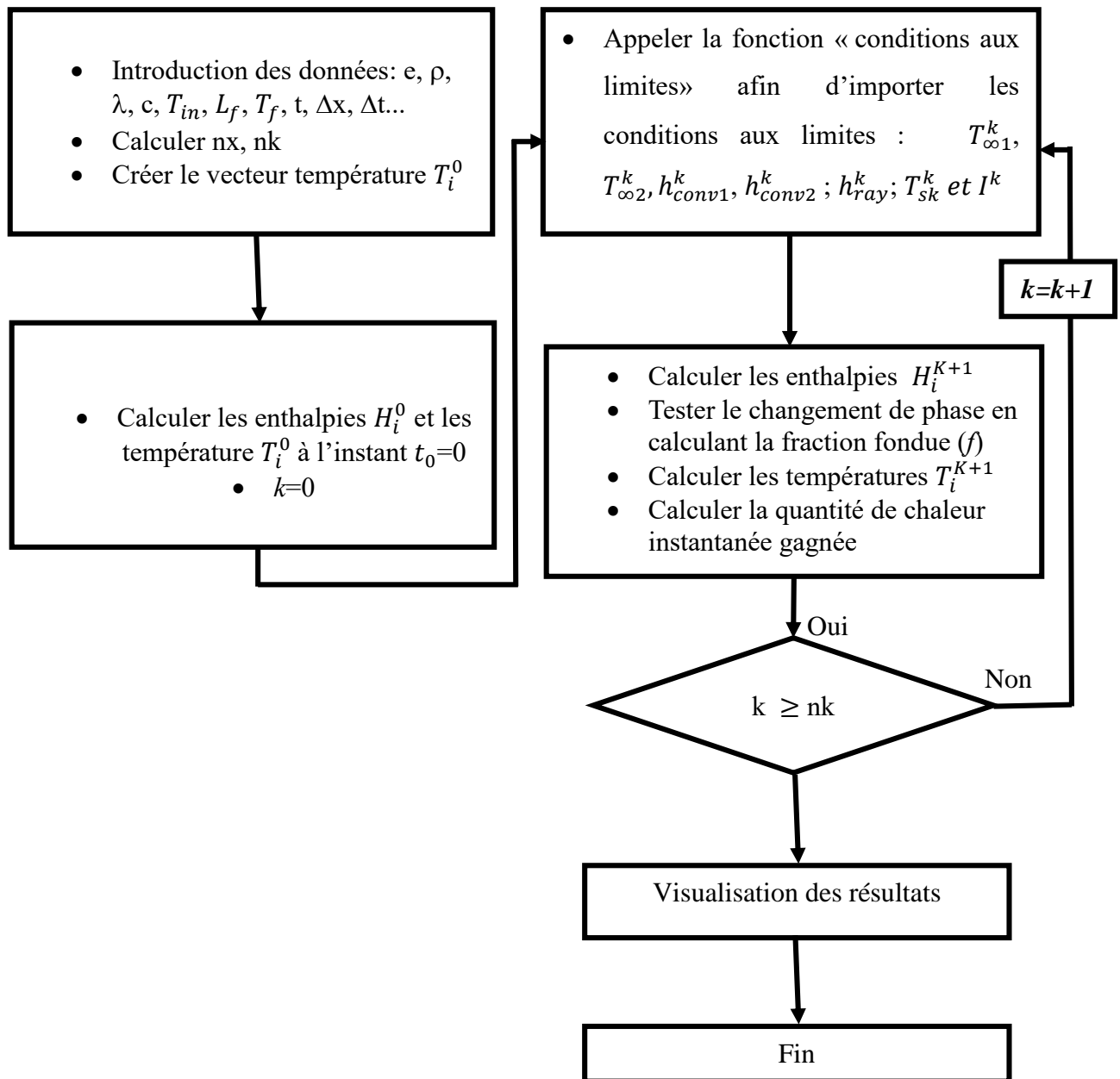


Figure III.8: Organigramme du programme.

III.5. Performances énergétiques du mur sans MCP

Afin d'examiner l'efficacité de l'intégration d'une couche de MCP dans le mur sur le coût du confort thermique, il en découle, naturellement, d'étudier les performances énergétiques de ce dernier en l'absence de cette couche. Ainsi, pour ce cas, la distribution de température dans le mur, le coefficient de convection intérieure, coefficient d'échange par rayonnement et le flux thermique instantané gagnés vont être calculés et visualisés.

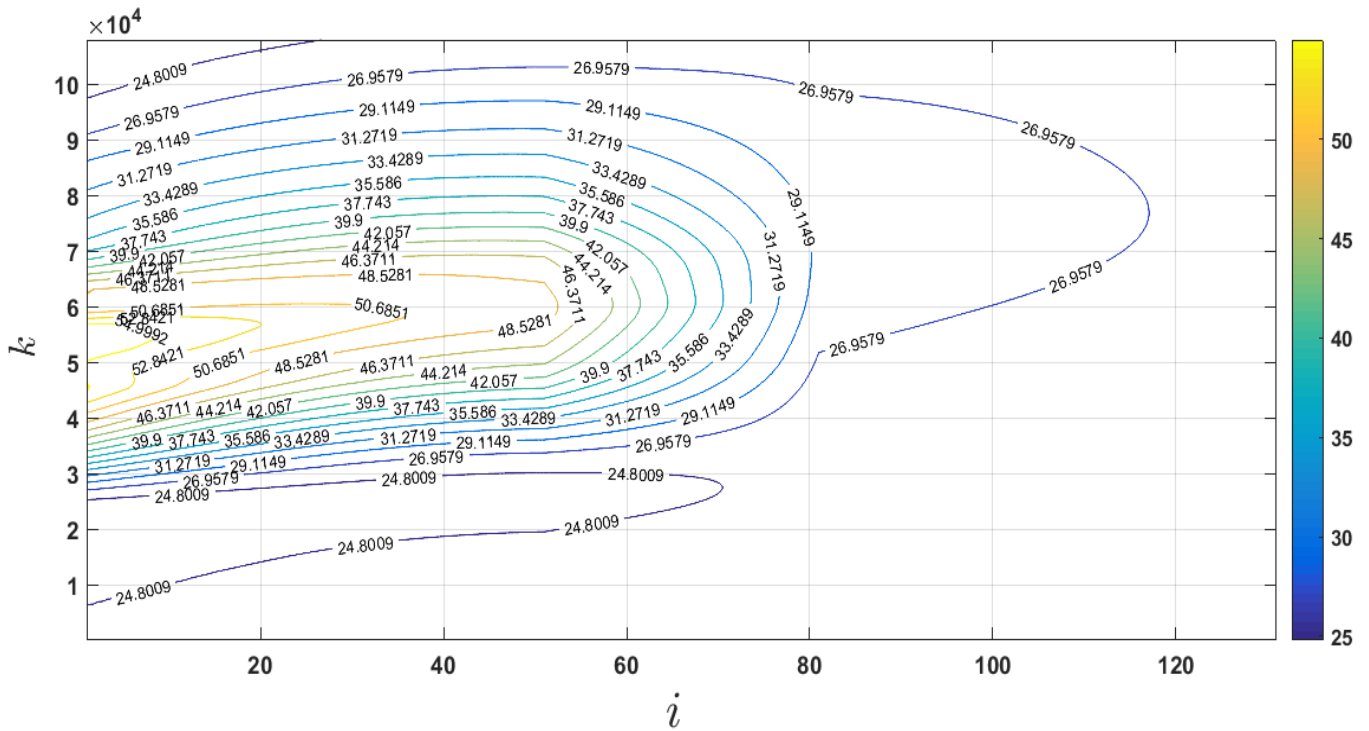


Figure III.9: Distribution de températures dans le mur sans MCP au cours du temps.

Sur la figure III.9 est illustrée la distribution de températures dans le mur sans MCP en fonction du temps. La face externe du mur est la face la plus sollicitée, elle enregistre les plus grandes valeurs de température, le maximale est égale à 54.99°C, est atteint de 13h55min à 16h40 min. Cela est dû à la combinaison des effets de rayonnements solaire et des températures ambiantes élevées lors cette tranche de la journée. Ce qui explique la consommation excessive de l’électricité qu’enregistre, à chaque été, les services de Sonelgaz (voir figure III.1) durant cette tranche horaire. Une fois que la nuit tombe, la disparition du rayonnement solaire, d’une part, le maintien de la température $T_{\infty 2}^k$ à 24°C de l’autre part, le mur se refroidit progressivement jusqu’à atteindre une température minimale de 26.41°C.

La variation du coefficient de convection interne en fonction du temps est présentée sur la figure III.10. Ce coefficient est, étroitement, lié à la température de la face interne du mur. A cause des conditions initiales supposées ainsi que de la variation des conditions aux limites, il diminue progressivement, de minuit jusqu’à 10h30 min. La situation s’inverse de 10h30min à 21h30min, où il enregistre sa plus grande valeur qui est égale à 3.74 W/m²°C.

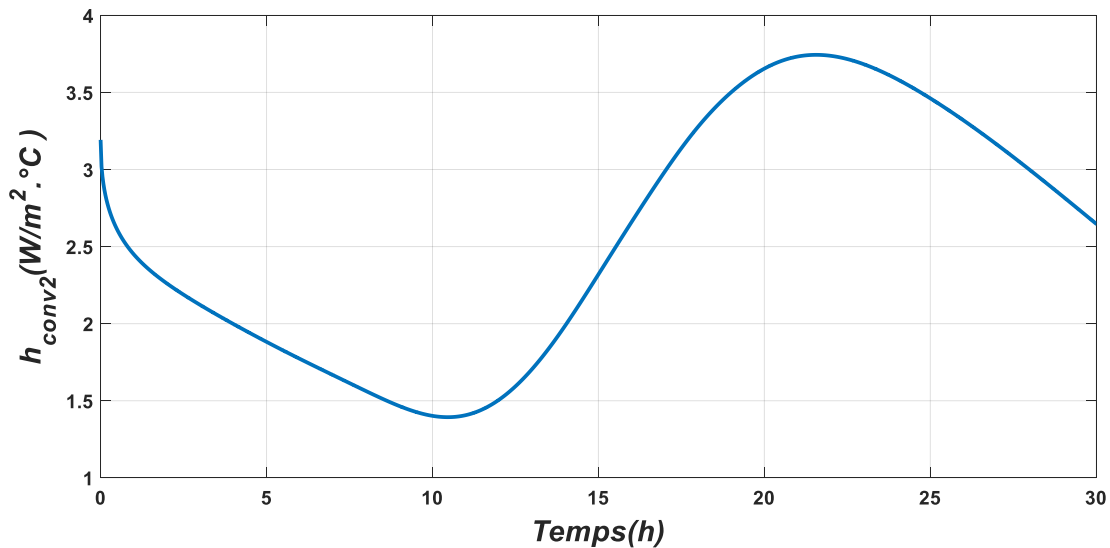


Figure III.10: Variation du coefficient de convection intérieur au cours du temps.

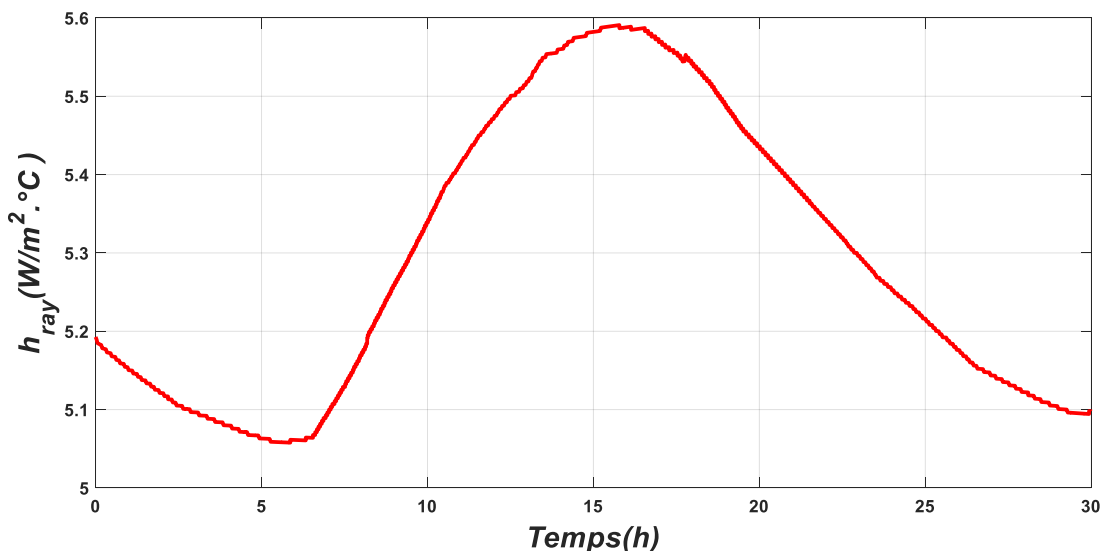


Figure III.11: Variation du coefficient d'échange par rayonnement au cours du temps.

L'allure de la courbe de variation du coefficient d'échange par rayonnement en fonction du temps est semblable à celle de la température apparente du ciel, comme on peut le constater sur les figures III.6 et III.11. Le pic est atteint pour une valeur de $5.59 W/m^2 \cdot ^\circ C$ vers 15h30min.

Sur la figure III.12, l'évolution du flux de chaleur instantané gagné $\dot{Q}(t)$, pour un mur sans MCP est tracée. Ce flux diminue de 00h00min jusqu'à 10h, puis on observe une augmentation jusqu'à 21h, ensuite il diminue jusqu'à 6h du lendemain. Ces constatations sont les mêmes que celles faites pour le coefficient d'échange par convection interne. Ce qui est une conséquence logique du calcul

du $\dot{Q}(t)$ qui se base sur h_{conv2} . L'allure de la variation journalière de ce flux est comparable à celle trouvée par Izquierdo-Barrientos et *al.* [37], durant 6 jours du mois de juillet à la ville de Madrid.

La valeur maximale de ce flux est de 8.78 W/m^2 alors qu'Izquierdo-Barrientos et *al.* [37], ont trouvé une valeur maximale d'environ 7 W/m^2 pour un mur sans MCP orienté vers le sud. Cependant, leur modèle physique du mur est différent et les conditions climatiques de Chlef sont plus sévères.

Le flux de chaleur instantané gagné (\bar{Q}), d'un mur sans MCP pour la période étudiée, est égal à 4.52 W/m^2 .

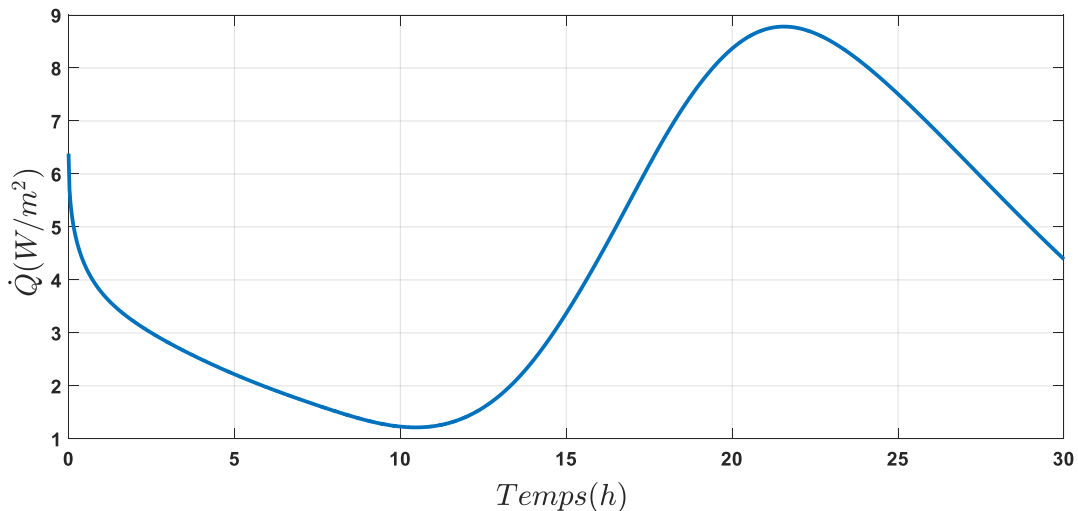


Figure III.12: Variation du flux de chaleur instantané au cours des 30h.

III.6. Performances énergétiques du mur avec MCP

Etant donné que, la position de la couche de MCP dans le mur a de l'influence sur le comportement thermique, de ce fait deux configurations différentes, illustrées à la figure II.2 sont proposées :

III.6.1. Configuration 1

Pour cette configuration, la couche de MCP, d'épaisseur e est égale à 12mm, est placée du côté interne du mur, directement après la brique et avant l'isolant. Là, aussi, comme pour la configuration sans MCP, les plus grandes valeurs de températures dans le mur sont enregistrées pour l'après-midi comme illustré dans la figure III.13. La température maximale atteinte est de 54.94°C et celle minimale est de 26.4°C . En raison du fait que le MCP n'a pas subi de changement de phase, seule une petite diminution de température dans le mur est observée.

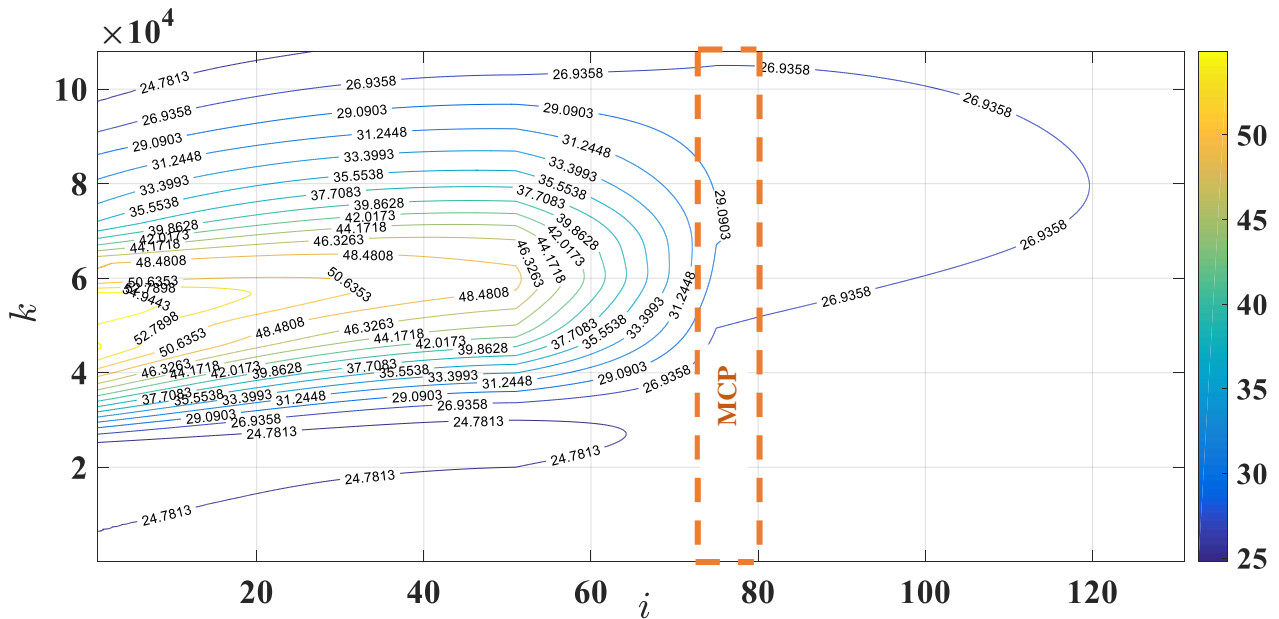


Figure III.13: Distribution de températures au cours du temps pour : la configuration 1 et $e = 12$ mm.

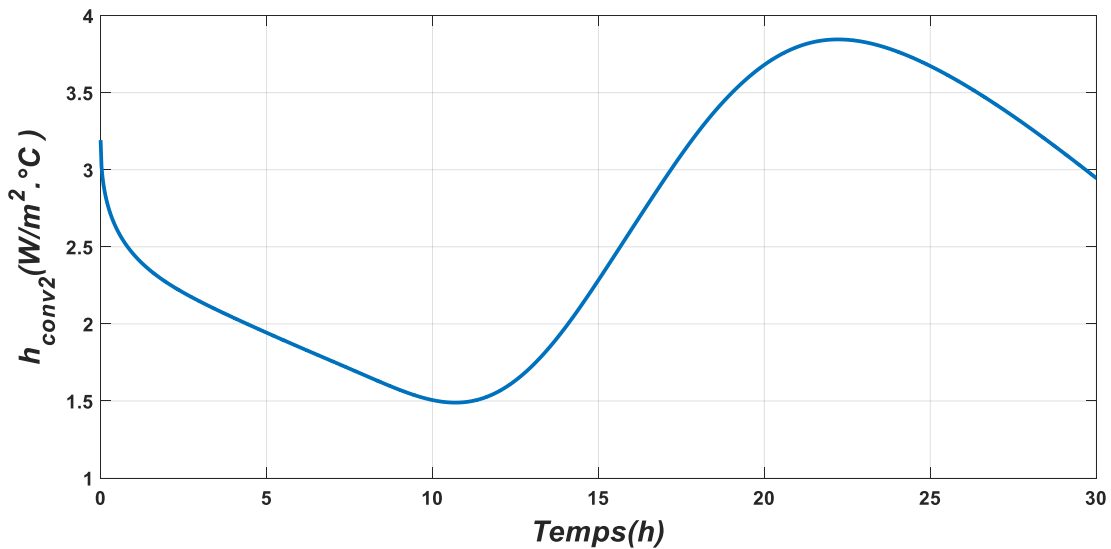


Figure III.14: Variation du coefficient h_{conv2} pour : la configuration 1 et $e=12$ mm.

La variation du coefficient h_{conv2} pour cette configuration, illustrée par la figure III.14, s’effectue exactement de la même manière que celle observée dans la configuration précédente avec un léger changement dans les valeurs, maximale qui est passée de 3.74 à 3.84 $W/m^2\text{°C}$ et minimale qui elle aussi est passée de 1.39 à 1.49 $W/m^2\text{°C}$.

A cause des niveaux de températures obtenus pour ce cas qui sont semblables à ceux obtenus précédemment, la variation du coefficient d’échange par rayonnement, dans cette situation, est quasiment identique à celle présentée sur la figure III.12.

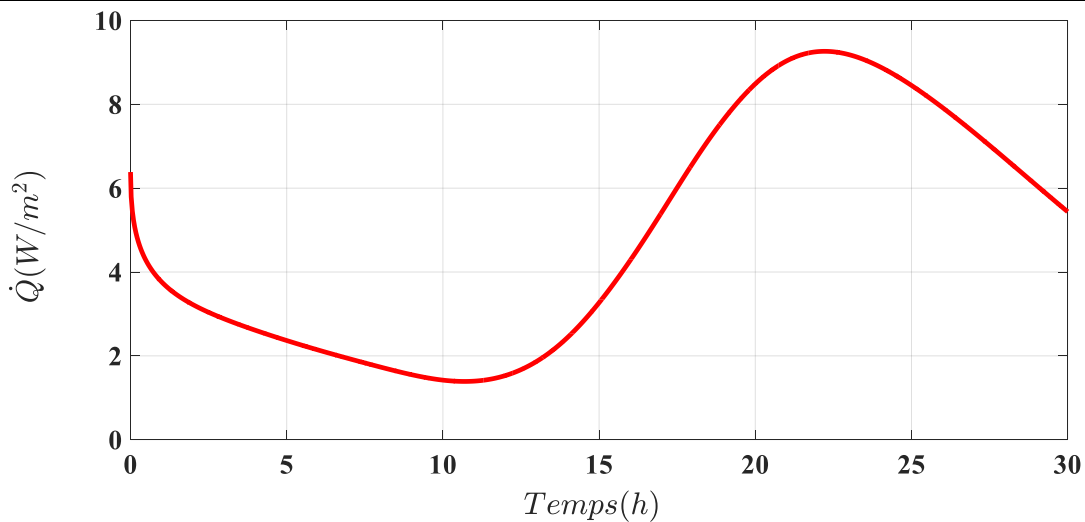


Figure III.15: Variation du flux \dot{Q} pour : la configuration 1 et $e = 12$ mm.

Les gains de chaleur instantanés maximale et minimale sont, respectivement, pour cette configuration 1.39 et 9.26 W/m² ce qui n'est pas bon à savoir étant donné que le but escompté de l'intégration du MCP est de réduire au maximum ces gains-là. Dans le même contexte, le flux thermique total instantané moyen est passé de 4.52 W/m² (configuration sans MCP) à 4.82 W/m².

III.6.2. Configuration 2

Cette configuration a été faite de sorte qu'une couche MCP, de 12mm d'épaisseur, soit interposée entre la couche de brique externe du mur et celle de l'isolant.

Sur la figure III.16 est illustrée la distribution de températures dans le mur en fonction du temps induite par cette configuration. La température maximale, est passée de 54.99°C (configuration sans MCP) à 52.34°C.

La température de la face interne du mur marque une légère augmentation à partir de 15h00 jusqu'à atteindre une valeur maximale de 25.25°C. contrairement aux deux autres cas étudiés, où l'augmentation est plus remarquable et la valeur maximale est de 26.41°C. Cette amélioration est la conséquence directe du changement de phase du MCP qui 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.

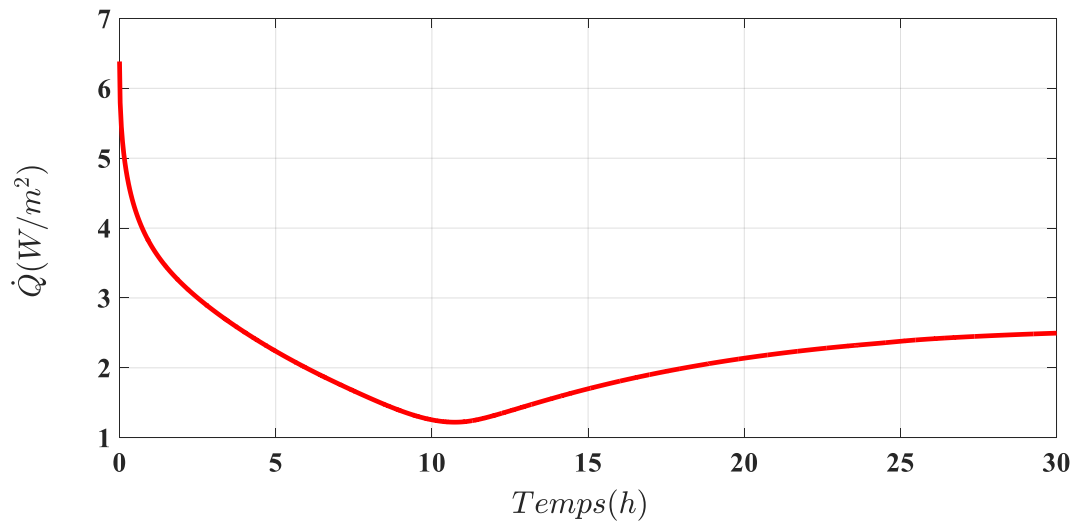


Figure III.18: Variation du flux \dot{Q} pour : la configuration 2 et $e = 12$ mm.

Pour cette configuration le flux instantané maximal gagné au cours du temps est très en baisse comparé aux deux autres configurations, comme c'est montré sur la figure III.18. Le minimal enregistré est 1.22 W/m^2 . Le même constat est fait pour le flux total moyen qui est passé de 4.52 W/m^2 (configuration sans MCP) et 4.82 W/m^2 (configuration 1) à 2.15 W/m^2 .

III.6.3. Effet de l'épaisseur de la couche MCP sur le flux de chaleur instantané moyen gagné

Pour une exploitation rationnelle du MCP, le choix de l'épaisseur aussi est crucial, raison pour laquelle on a fait varier les épaisseurs de la couche MCP dans le but d'observer son impact sur le transfert thermique.

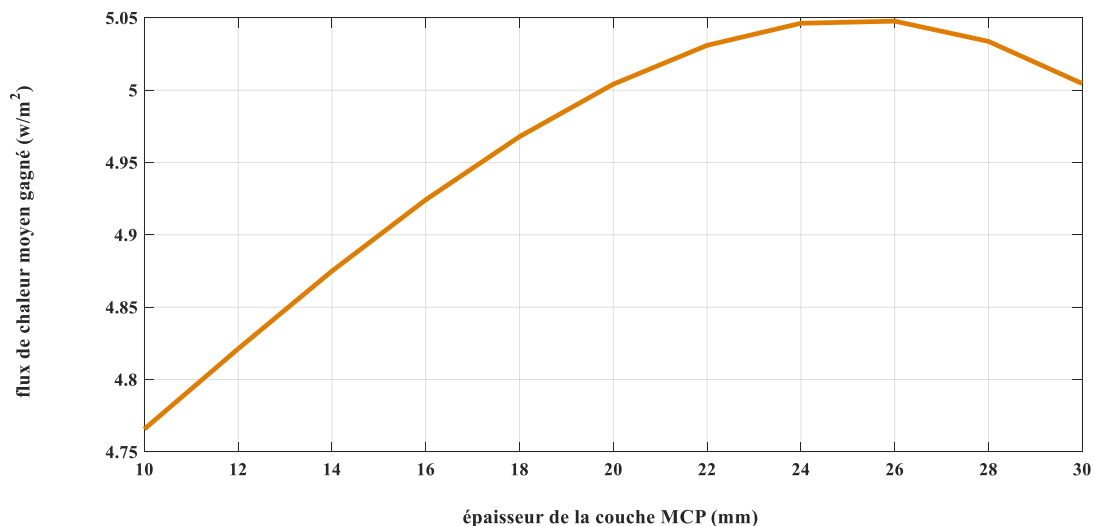


Figure III.19: Variation du flux \bar{Q} en fonction de l'épaisseur de la couche de MCP pour la configuration 1.

Le graphe III.19 indique que, pour la configuration 1, les gains de chaleur augmentent au fur et à mesure que l'épaisseur de la couche de MCP augmente jusqu'à une épaisseur de 26 mm, ce qui n'est autre que la conséquence du fait qu'il y'a pas eu de changement de phase et on a diminuer l'épaisseur de l'isolant, lorsqu'on dépasse cette épaisseur la situation commence à s'inverser.

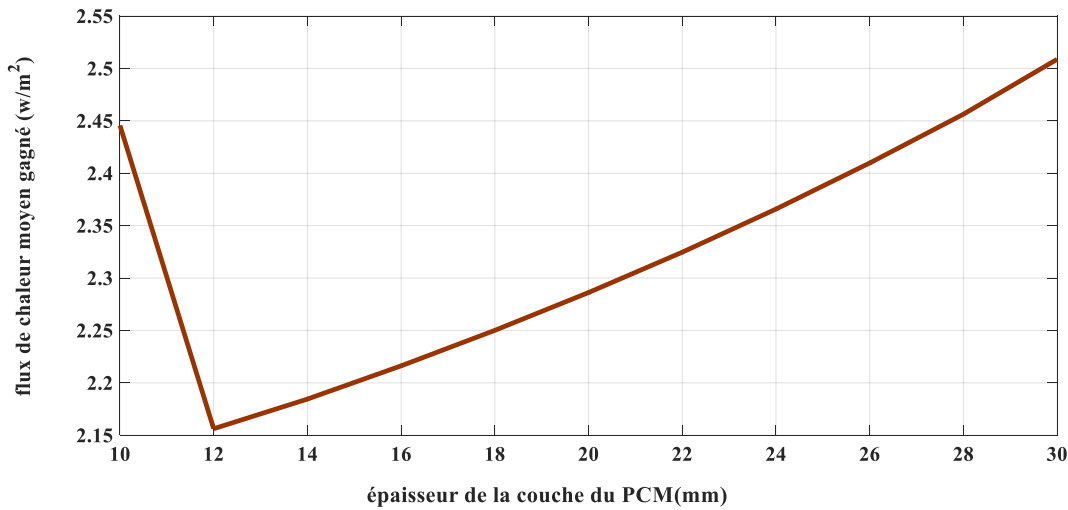


Figure III.20: Variation du flux \bar{Q} en fonction de l'épaisseur de la couche de MCP pour la configuration 2.

La configuration 2 présente, pour toute la gamme des épaisseurs étudiées, des valeurs de flux \bar{Q} inférieures de plus de 2,45 W/m² à celles obtenues pour l'autre configuration. Le plus faible flux \bar{Q} , qui est égal à 2,15 W/m², est enregistré pour une épaisseur de 12mm. Pour l'épaisseur 12mm un changement de phase a été observé, du fait que le MCP stocke la chaleur lors de sa fusion et l'empêche ainsi de rentrer à l'intérieur de la pièce, la réduction des gains thermiques est observée même avec la réduction de l'épaisseur. Ainsi, l'adoption de la configuration 2 favorise la réduction du coût de la climatisation dans la période estivale.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de cette étude était de mettre en évidence l'effet de l'intégration d'une couche de MCP, dans un mur d'un bâtiment, sur la réduction de la facture du confort thermique pendant la période estivale. Au cours de ce travail, la méthode enthalpique explicite a été implanté sous l'environnement Matlab afin d'évaluer et de comparer les gains thermiques engendrés par trois configurations de mur. Deux configurations d'entre-elles comportent une couche de MCP. Le choix de la ville de Chlef, comme lieu géographique de l'étude, était motivé par son été très chaud qui enregistre parfois de fortes caniculaires avec des températures dépassant 44 degrés. L'estimation des données météorologiques de cette ville a été faite à l'aide du logiciel « Meteonorm 8 ».

En vue des résultats obtenus pour les trois configurations étudiées les constats suivants ont été faites :

- L'intégration du MCP dans le mur influe positivement sur les performances énergétiques avec la réduction de la consommation d'énergie et par la même occasion la réduction du coût de facture liée à la climatisation.
- Le choix de l'emplacement du MCP dans le mur est très important, car au lieu de réduire, il peut contribuer à l'augmentation de la consommation d'énergie lorsqu'il est mal positionné. L'emplacement optimal dans cette étude, pour un mur vertical orienté vers le sud fut trouvé pour lorsque le MCP a été très proche de l'extérieur.
- Le choix de l'épaisseur aussi est très important afin d'observer la performance du matériau à changement de phase. Les résultats de la simulation indiquent que pour les conditions imposées dans cette étude l'épaisseur optimal de la couche du MCP est égale à 12 mm.

Afin de pouvoir récolter les résultats, il a fallu « un processeur : Intel Core i5 3^e génération avec une mémoire vive de 8 Go RAM », le programme a pris environ 14min21s pour effectuer l'exécution pour 131 nœuds et un pas temporel de 1s.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Algerie presse service, «Le secteur du bâtiment, premier consommateur d'énergie en Algérie,» 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].
- [2] 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°9, pp. 1361-1368, 2010.
- [3] 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.
- [4] 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°2, pp. 318-345, 2009.
- [5] 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°3, pp. 251-283, 2003.
- [6] M. M. Farid, A. M. Khudhair, S. A. K. Razack et S. Al-Hallaj, «A review on phase change energy storage: materials and applications,» *Energy Conversion and Management*, vol. 45, pp. 1597-1615, 2004.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] E. Tunçbilek, . M. Arıcı, M. Krajčík, 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°115750, 2020.
- [10] 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°5-6, pp. 994-1000, 2007.
- [11] 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.
- [12] M. Deffass , «Intégration des matériaux à changement de phase (MCPs) comme système de stockage de la chaleur,» Thèse de doctorat, Université de Jijel (Algérie), 2021.
- [13] F. BENMOUSSA, «Stockage de l'énergie thermique: Etude et optimisation des procédés,» Thèse de doctorat, Université de Batna 2 (Algérie), 2018.
- [14] 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 Reunion (France), 2013.
- [15] M. Jadal, «Caractérisation thermique d'un échangeur-stockeur constitué d'un matériau à changement de phase dans une structure conductrice,» Thèse de doctorat, Université de Nantes (France), 2020.
- [16] B. Németh, «Power consumption of model houses with and without PCM plaster lining using different heating methods,» *Energy and buildings*, vol. 284, n°112845, 2023.

- [17] 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.
- [18] 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°132639, 2022.
- [19] S. Hasnain, «Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques,» *Energy Conversion and Management*, vol. 39, n°11, pp. 1127-1138, 1998.
- [20] 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°3, pp. 171-180, 1999.
- [21] M. Martinelli, «Stockage d'énergie thermique par changement de phase – Application aux réseaux de chaleur,» Thèse de doctorat, Université grenoble alpes (France), 2017.
- [22] 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.
- [23] S. D. SHARMA, H. KITANO et K. SAGARA, «Phase Change Materials for Low Temperature Solar Thermal,» vol. 29, pp. 31-64, 2004 .
- [24] 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°116509, 2021.
- [25] 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 .
- [26] V. V. Tyagi et D. Buddhi, «PCM thermal storage in buildings: A state of art,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, n°6, pp. 1146-1166, 2007.
- [27] 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°1, pp. 29-64, 2019.
- [28] 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.
- [29] A. Abhat, «Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials,» *Solar Energy*, vol. 30, n°4, pp. 313-332, 1983.
- [30] M. M. Kenisarin, «High-temperature phase change materials for thermal energy storage,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, n°3, pp. 955-970, 2010.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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°1, pp. 481-500, 2014.

Références bibliographiques

- [34] 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°1–2, pp. 171-180, 2014.
- [35] H. BENAMMAR , «Etude numérique de la performance thermique des murs avec intégration d'un matériau à changement de phase (MCP),» Mostaganem (Algérie), 2021.
- [36] M. BENREKIA , «Analyse thermique d'un système de stockage de l'énergie solaire dans un immeuble résidentiel,» Médéa (Algérie), 2021.
- [37] 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 .
- [38] T. Defraeye, B. Blocken et J. Carmeliet, «Convective heat transfer coefficients for exterior building surfaces: Existing correlations and CFD modelling,» *Energy Conversion and Management*, vol. 52, n°1, pp. 512-522, 2011.
- [39] 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.
- [40] H. R. O. M. J. C. R. M. C. Necati Ozisik, *Finite Difference Methods in Heat Transfer*, Second Edition, Taylor & Francis Group, LLC, 2017.
- [41] 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 Reunion (France), 2013.
- [42] I. Sarbu et C. Sebarchievici, «Solar Heating and cooling Systems: Chapter 4 - Thermal Energy Storage,» *Fundamentals, Experiments and Applications*, pp. 99-138, 2017.
- [43] G. Ciulla, V. Lo Brano, M. Cellura, V. Franzitta et D. Milone, «A finite difference model of a PV-PCM system,» *Energy Procedia*, vol. 30, pp. 198-206, 2012.
- [44] [En ligne]. Available: <https://www.sonelgaz.dz/fr/3566/demande-en-electricite>. [Accès le 1 Juin 2023].
- [45] [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 01 Juin 2023].
- [46] O. Souci et S. Houat, «Numerical study of thermos physical properties of a hollow brick filled by the PCM,» *Journal of Materials and Environmental Sciences*, vol. 8, n°6, pp. 2213-2220, 2017.