

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE AMAR THELIDJI- LAGHOUAT
FACULTE DE
TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE
GENIE MECANIQUE



MEMOIRE MASTER DE FIN D'ETUDES

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie mécanique

Spécialité : énergie renouvelable

Thème

Étude numérique du comportement thermique transitoire d'un mur incorporant un matériau à changement de phase

Présenté par :

- ALLOUT Mohamed Djelloul
- LAGHOUATI Ahmed

Devant le jury composé de :

Président :	Dr. SAHEL.Djamel	Université AT Laghouat
Examineur :	Dr. BENHOUIA.Lamine	Université AT Laghouat
Encadreur :	Dr. BELLAHCENE.Lahcene	Université AT Laghouat

Année Universitaire : 2023/2024

Dédicace

A ma très chère mère

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

A mon très cher père

Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

A mes très chers frères FATHI et TAREK et MARAM et AYA

Puisse Dieu vous donne santé, bonheur, courage et surtout réussite.

A mes amis ABDELHAMID et ABDELBAKI et MOUTASEM et MEBAREK

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.

A mon encadrer BELLAHCENE Lahcene

ALLOUT Mohamed Djelloul

Dédicace

A ma très chère mère

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

A mon très cher père

Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

*A mes très chers frères RACHID et ABDELKADER et OMAR
et HADJER et OMALKHAER*

Puisse Dieu vous donne santé, bonheur, courage et surtout réussite.

A mes amis NAKMOUCH.M et LAMEID.A et TAHER.B

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.

*A mon encadrer **BELLAHCENE Lahcene***

LAGHOUATI Ahmed

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier dieu le tout puissant pour la volonté, la santé, la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années d'études.

*Nous remercie en particuliers notre encadreur **BELLAHCENE Lahcene** qui nous inspiré le sujet et guidé à ce travail nous le remercie pour sa disponibilité et ses encouragements.*

Nous remercions vont aux membres de jury qui ont accepté de juger notre travail et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce dernier.

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribués de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

ملخص:

في الوقت الحالي، عادةً ما يُستخدم دمج المواد المتغيرة الطور (PCMs) في الغلاف في عدة أنواع من المباني حول العالم. وفي الجزائر، يمكن إدخال هذا النوع من المواد في الإنشاءات المستقبلية. وبالتالي فإن تعزيز أساليب البناء القائمة على الموارد المتاحة يتطلب التفكير في تكامل واختيار المواد المستخدمة في البناء. الهدف من هذا العمل هو دراسة السلوك الحراري لخليط PCM- Plâtre مع تحسين كفاءة استخدام الطاقة في المباني والراحة الحرارية لشاغليها. تمت دراسة المشكلة الفيزيائية باستخدام كود حساب CFD ANSYS Fluent 16 (ديناميكيات الموائع الحسابية) بناءً على طريقة الحجم المحدود. تم اختيار طريقة المحتوى الحراري والمسامية لنمذجة تخزين الطاقة بالحرارة الكامنة في ظل ظروف بيئية متغيرة. يعتبر جدار الجبس PCM عبارة عن خليط متجانس، ويفترض أن تكون الخواص الحرارية ثابتة.

الكلمات المفتاحية: مواد تغير الطور، CFD، غلاف المبنى، تخزين الحرارة.

Résumé:

Actuellement, l'intégration des Matériau à changement de phase (MCPs) dans l'enveloppe est largement utilisée dans plusieurs types de bâtiment dans le monde. En Algérie, ce type de matériaux peut être introduit dans les futures constructions. Promouvoir donc des modes constructifs issus des ressources existantes, nécessite une réflexion sur l'intégration et le choix des matériaux employés pour la construction. L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement thermique d'un mélange de MCP-Plâtre tout en visant l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments et le confort thermique pour les occupants. Le problème physique a été étudié en utilisant le code de calcul CFD ANSYS Fluent 16 (Computational Fluide Dynamics) basé sur la méthode des volumes finis. La méthode enthalpie-porosité a été choisie pour modéliser le stockage de l'énergie par chaleur latente sous des conditions environnementales variables. La paroi en (MCP) est considérée comme étant un mélange homogène, les propriétés thermiques sont supposées constantes.

Mots clés : Matériaux à changement de phase, CFD, l'enveloppe du bâtiment, stockage de la chaleur.

Abstract:

Currently, the integration of phase change materials (PCMs) into the envelope is usually used in several types of buildings around the world. In Algeria, this type of material can be introduced into future constructions. Promoting construction methods based on existing resources therefore requires reflection on the integration and choice of materials used for construction. The objective of this work is to study the thermal behavior of a mixture of PCM-Plaster while aiming to improve the energy efficiency of buildings and thermal comfort for occupants. The physical problem was studied using the CFD calculation code ANSYS Fluent 16 (Computational Fluid Dynamics) based on the finite volume method. The enthalpy-porosity method was chosen to model energy storage by latent heat under variable environmental conditions. The PCM-Plaster wall is considered to be a homogeneous mixture, the thermal properties are assumed to be constant.

Key words: Phase change materials, CFD, building envelope, heat storage.

Table des matières

Contenu

Introduction générale:	1
Chapitre I Généralité sur le transfert de chaleur	
I. Introduction:	3
I.1. Notions de base :	3
I.1.1 La chaleur : :.....	3
I.1.2 Flux de chaleur et densité de flux de chaleur : :.....	4
I.1.3. La Température : :.....	4
I.1.4. Unités de chaleur : :.....	5
I.2. Transfert de chaleur :	5
I.3. Modes de transfert de chaleur :	6
I.3.1. Transfert de chaleur par conduction : :.....	6
I.3.1.1. Définition : :.....	6
I.3.1.2. Applications : :.....	7
I.3.2. Transfert de chaleur par Convection : :.....	7
I.3.2.1. Définition : :.....	7
I.3.2.2. Applications : :.....	9
I.3.3. Transfert de chaleur par Rayonnement :	9
I.3.3.1. Définition : :.....	9
I.3.3.2. Applications :.....	10
Références bibliographiques	11
Chapitre II Généralités sur les matériaux à changement de phase	
Introduction :	14
II.1 Les différents types de stockage :	14
II.1.1. Stockage chimique:.....	14
II.1.2. Stockage mécanique:.....	14
II.1.3. Stockage électrique:.....	14
II.1.4. Stockage thermique:.....	14
II.2. Le stockage d'énergie par chaleur latente dans les MCP :	15
II.2.1. Principe : :.....	15
II.2.2. Stockage d'énergie thermique:.....	15
II.2.3. Stockage par chaleur sensible:.....	16
II.2.4. Stockage par chaleur latente:.....	16
II.3. Matériau à changement de phase :	17
II.4 Les différents types de changements d'état :	18
II.5. Types des matériaux à changement de phase (MCP) :	19

Table des matières

II.5.1. Les MCP organiques : :.....	19
II.5.1.1 Les paraffine : :.....	20
II.5.1.2 Non paraffines : :.....	20
II.5.2 Les MCP inorganiques : :.....	21
II.5.2.1 Les hydrates salins : :.....	22
II.5.2.2 Métaux et alliages : :.....	22
II.5.2.3.Eutectique : :.....	22
II.5.3. Avantages et inconvénients des MCP organiques et inorganiques :.....	23
II.6 Critères de choix d'un matériau à changement de phase	23
II.6.1. Propriétés thermiques.....	23
II.6.2 Propriétés physiques:.....	24
II.6.3 Propriétés cinétiques:.....	24
II.6.4. Propriétés chimiques:.....	24
II.6. 5.Aspects économiques:.....	25
II.7.Applications des MCP:.....	25
II.7.1. Domaine électronique:.....	25
II.7.2 Domaine mécanique:.....	25
II.7.3 Domaine médicales:.....	25
II.7.4. L'industrie textile:.....	25
II.7.5. Domaine des routes:.....	26
II.7.6 Les MCP dans les rideaux : :.....	26
II.7.7 Application aux bâtiments:.....	26
Conclusion:.....	27
Références bibliographiques:.....	28
Chapitre III Etude Théorie du changement de phase solide-liquide	
III.1. Introduction : :.....	27
III.2. Théorie du changement de phase solide-liquide : :.....	27
III.3. présentation ANSYS fluent:.....	29
III.3.1. Fonctionnalités et capacités d'ANSYS.....	29
III.3.2.Utilisation pratique.....	29
III.4. Méthodes numériques : :.....	30
III.4.1 Méthode à maillage mobile : :.....	31
III.4.2 Méthode à maillage fixe : :.....	31
III.4.2.1 Méthode du c_p apparent : :.....	32
III.4.2.2 Méthode enthalpique : :.....	33
Conclusion : :.....	34

Table des matières

Références bibliographiques:.....	36
Chapitre IV Résultats et discussions	
IV.1. Introduction:.....	38
IV.2. Etude numérique de la solidification-fusion d'un mélange "Plâtre-MCP".....	38
IV.3. Cas d'une paroi plane opaque :.....	39
VI.4. Résultats et discussion :.....	41
IV.5. Conclusion:.....	48
Conclusion générale:.....	50
Références bibliographiques:.....	52

Liste des figures

N°	Titre	page
Figure I. 1	chemin de propagation de la chaleur dans un mur [2]	4
Figure I. 2	énergie cinétique des corps froid et chaud [3]	5
Figure I. 3	illustration des trois modes de transfert thermique [6]	6
Figure I. 4	Transfert de chaleur par conduction [8].	7
Figure I. 5	Transfert de chaleur par convection entre un fluide et un solide [9]	8
Figure I. 6	Transfert de chaleur par rayonnement [11]	10
Figure II. 1	les différentes méthodes de stockage de l'énergie thermique [1]	15
Figure II. 2	Les schémas suivants expliquent les cycles de stockage et de décharge de l'énergie [1]	17
Figure II. 3	Exemple de MCP : a. Paraffine, b. Eau [1]	17
Figure II. 4	Paraffine [6]	19
Figure II. 5	Acide stéarique (acide gras) [7]	20
Figure III. 1	Représentation de l'interface de changement de phase solide-liquide. [1]	27
Figure III. 2	Représentation de l'enthalpie en fonction de la température. [1]	28
Figure IV. 1	Conditions aux limites du modèle étudié.	40
Figure IV. 2	Variation de la température et flux de chaleur dans la phase solide (17 °C – 23°C)	42
Figure IV. 3	Variation de la température et le flux de chaleur dans la phase liquide (29 °C – 38°C)	43
Figure IV. 4	Variation de la température et flux de chaleur dans la phase solide vers liquide (17 °C – 38°C)	44
Figure IV. 5	Variation de températures superficielles à l'extérieur (a) et à l'intérieur (b)	45
Figure IV. 6	Variation de températures superficielles à l'extérieur (a) et à l'intérieur (b)	46
Figure IV. 7	Variation d'une fraction liquide en fonction de temps	47

Liste des tableaux

N°	Titre	page
Tableau II-1	Principales caractéristiques des différentes catégories du MCP [5]	18
Tableau II-2	Propriétés thermiques de certains MCP inorganiques [8]	20
Tableau II-3	Une liste de quelques Eutectiques [1]	22
Tableau II-4	Principaux avantages et inconvénients de chaque type de MCP	22
Tableau IV.1	Propriétés thermo physiques de mélange plâtre + MCP [3]	40

Nomenclature

T	:	<i>Température</i>	$[^{\circ}\text{C}]$
H	:	<i>L'enthalpie</i>	$[\text{J}\cdot\text{Kg}^{-1}]$
T_1	:	<i>Température initiale</i>	$[^{\circ}\text{C}]$
T_F	:	<i>Température de fusion</i>	$[^{\circ}\text{C}]$
T_2	:	<i>Température finale</i>	$[^{\circ}\text{C}]$
C_{sol}	:	<i>Capacité thermique massique à l'état solide</i>	$[\text{J}\cdot\text{Kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
C_{liq}	:	<i>Capacité thermique massique à l'état liquide</i>	$[\text{J}\cdot\text{Kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
L_F	:	<i>Chaleur latente de changement de phase</i>	$[\text{J}\cdot\text{Kg}^{-1}]$
H_{sol}	:	<i>Enthalpie massique du solide</i>	$[\text{J}\cdot\text{Kg}^{-1}]$
H_{liq}	:	<i>Enthalpie massique du liquide</i>	$[\text{J}\cdot\text{Kg}^{-1}]$
T_s	:	<i>Température de solide</i>	$[\text{K}]$
T_l	:	<i>Température de liquide</i>	$[\text{K}]$
Q	:	<i>Quantité de chaleur</i>	$[\text{J}/\text{m}^3]$
T	:	<i>Temps</i>	$[\text{s}]$
L	:	<i>Chaleur spécifique</i>	$[\text{J}/\text{Kg}]$
λ	:	<i>Conductivité thermique</i>	$[\text{w}/\text{m}/\text{k}]$
\emptyset	:	<i>Flux de chaleur</i>	$[\text{w}/\text{m}^2]$
Δt	:	<i>Pas de temps</i>	$[\text{min}]$

Introduction générale

Introduction générale

Les matériaux changement de phase (MCP) sont des éléments de stockage de chaleur latente lors du processus de fusion et de sa restitution pendant la solidification en conservant une température constante [1, 2]. Ces matériaux possèdent une densité importante de stockage d'énergie et une capacité à maintenir une température constante tout en absorbant la chaleur pendant la fusion et en la restituant lors de la solidification [2]. Cet intérêt s'est développé dans le domaine de la gestion thermique et des systèmes d'énergie solaire des bâtiments et des serres. Les MCP fondent et se solidifient dans une large plage de températures, ce qui les rend attrayants pour diverses applications. Parmi ces matériaux, les cires de paraffine qui sont bon marché avec une densité de stockage thermique modérée et une faible conductivité thermique. Les sels hydratés sont des MCP avec une grande densité de stockage d'énergie et une plus grande conductivité thermique mais ils présentent un super-refroidissement et une ségrégation de phase à cause de leur asymétrie, posent de vraies limitations [3]. Alors le travail consiste à étudier l'effet du MCP sur le taux de transfert de chaleur dans un mur de bâtiment et le rôle du MCP sur le confort thermique à l'intérieur du bâtiment.

- Dans le premier chapitre présenté une généralité sur le phénomène du transfert de chaleur tel que (la chaleur, flux de chaleur, température...etc.) et aussi une notion sur les trois modes de transfert de chaleur (conduction, convection et rayonnement).
- Le deuxième chapitre est consacré à une revue bibliographique des travaux de recherche sur le stockage d'énergie thermique et les catégories de ce stockage, et nous avons également fait une définition complète aux matériaux à changement de phase et leur application.
- Dans le troisième chapitre, nous présentons les différentes formulations mathématiques du phénomène du changement de phase solide-liquide. Avec présentation Un programme Ansys fluent, et Nous y présentons la simulation en 2D utilisé pour traiter ce problème et nous exposons sa validation numérique.
- Dans le dernier chapitre, nous avons simulé un mur contenant un mélange de MCP/ Plâtre à l'aide du programme Ansys Fluent 16. avec le résultat et discussion.

Chapitre I

Généralité sur le transfert de chaleur

Chapitre I Généralité sur le transfert de chaleur

I. Introduction

La thermodynamique nous apprend que l'énergie peut être transférée à partir d'interactions entre le système et son environnement, sous forme de chaleur et de travail. Cependant, la thermodynamique ne se préoccupe que de l'état initial et de l'état final du système à l'équilibre, et ne fournit aucune information sur la nature des interactions mises en jeu et sur l'évolution temporelle du système entre les deux états d'équilibre.

Un transfert de chaleur au sein d'un système ne se produit que s'il existe des gradients de température entre les différentes parties du système, ce qui implique que celui-ci n'est alors pas l'équilibre thermodynamique (la température n'est pas uniforme dans tout le système). Autours de la transformation du système vers un état d'équilibre final, la température va évoluer la fois en temps et en espace. Le but de l'analyse des transferts de chaleur est d'identifier quels sont les modes de transfert mis en jeu au cours de la transformation et de déterminer quantitativement comment varie la température en chaque point du système au cours du temps.

I.1. Notions de base :

I.1.1 La chaleur :

En physique, on appelle chaleur une forme particulière de l'énergie. Cette équivalence de la chaleur et du travail constitue le premier principe de la thermodynamique. Il en résulte qu'énergie, travail et quantité de chaleur ont une même unité : le joule

A la base de l'étude des transferts thermiques se trouvent les concepts de quantité de chaleur et de différence de température. Le transfert de chaleur d'une partie d'une substance à une autre partie, ou d'un corps à un autre corps, s'effectue sous forme d'énergie cinétique d'agitation moléculaire désordonnée. Ce transfert est le fait d'une différence de température entre les deux corps. La chaleur se propage spontanément du corps ayant la température la plus élevée vers celui ayant la température la plus basse, élevant ainsi la température de ce dernier, tout en abaissant la température du premier, dans la mesure où le volume des deux corps reste constant. Ceci constitue le second principe de la thermodynamique. Ce second principe met en évidence la notion d'irréversibilité : La chaleur ne pourra pas se propager d'un corps froid vers un corps chaud, sauf si on fournit un travail [1].

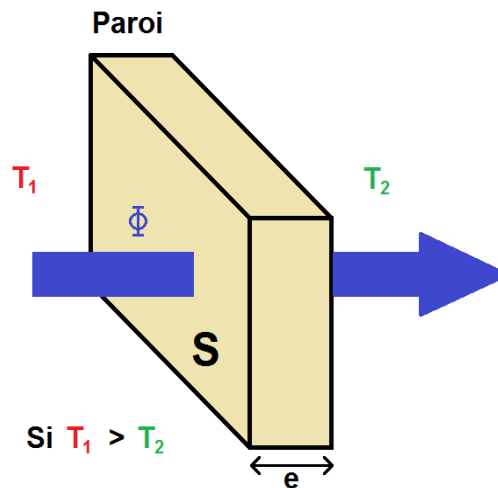


Figure I. 1: chemin de propagation de la chaleur dans un mur [2]

I.1.2 Flux de chaleur et densité de flux de chaleur :

Un flux de chaleur est une quantité d'énergie transférée sous forme de chaleur par unité de temps. C'est donc une puissance, exprimée en Watt (J/s) :

$$\Phi = \frac{Q}{t} \quad (\text{I.1})$$

En revanche, le flux de chaleur transférée par unité de surface est appelé

"densité de chaleur φ :

$$\varphi = \frac{\Phi}{S} \quad (\text{I.2})$$

I.1.3. La Température :

On appelle température la grandeur physique qui mesure le degré de chaleur d'un corps ou d'un milieu. Lorsque deux corps sont placés dans une enceinte adiabatique, le corps le plus chaud cède de la chaleur au corps le plus froid, jusqu'à ce que les deux corps aient la même température. On dit alors qu'on a atteint l'équilibre thermique

La température est une propriété thermodynamique du corps et mesure l'agitation microscopique de la matière. Selon la théorie cinétique, la température d'un corps est fonction de l'énergie cinétique moyenne de translation de ses molécules. L'énergie cinétique d'un corps est nulle à une température appelée zéro absolu [1].

Chapitre I Généralité sur le transfert de chaleur

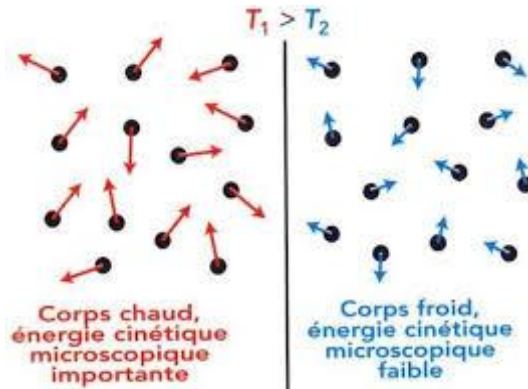


Figure I. 2 : énergie cinétique des corps froid et chaud [3]

I.1.4. Unités de chaleur :

On a vu qu'en physique, la quantité de chaleur est exprimée dans les mêmes unités que l'énergie et le travail, à savoir en joules (J). On utilise également la calorie (Cal), définie comme la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de 1 g d'eau de 14,5 °C à 15,5 °C sous une pression de 1 atm. L'énergie mécanique peut être convertie en chaleur par frottement, et le travail mécanique nécessaire pour produire une calorie s'appelle « l'équivalent mécanique de la calorie » [1].

On a : 1 Cal = 4,1855 J

I.2. Transfert de chaleur :

Chacun des trois modes de transmission de chaleur (conduction, convection et rayonnement) étant lui-même lié à un processus physique bien déterminé. En effet, comme l'énergie thermique d'un milieu matériel correspond à l'énergie cinétique de ses constituants fondamentaux, ayant une certaine liberté de mouvement (molécules, atomes, électrons libres, etc.), ceux-ci pourront échanger tout ou partiellement leur énergie thermique, c'est-à-dire gagner ou perdre de l'énergie cinétique :

- Soit par interaction directe avec les particules voisines (choc de molécules par exemple), ce qui correspond à la conduction.
- Soit par absorption ou émission de radiations électromagnétiques, ce qui correspond au rayonnement.
- Soit dans le cas d'un gaz ou d'un liquide, on considère également cette fois à l'échelle macroscopique, comme un mode de transfert de chaleur appelé convection, les échanges résultant de mélange de diverses parties d'un fluide à des températures différentes [4]

Chapitre I Généralité sur le transfert de chaleur

II.3. Modes de transfert de chaleur :

Trois modes de transferts thermiques distincts sont généralement identifiés : la conduction, mise en œuvre dans les solides, la convection nécessitant un écoulement et le rayonnement pour lequel l'énergie thermique est échangée par rayonnement électromagnétique.

Ces modes de transferts sont rarement présents seuls au sein d'un même système. Cependant, l'un d'entre eux est très souvent prédominant. [5]

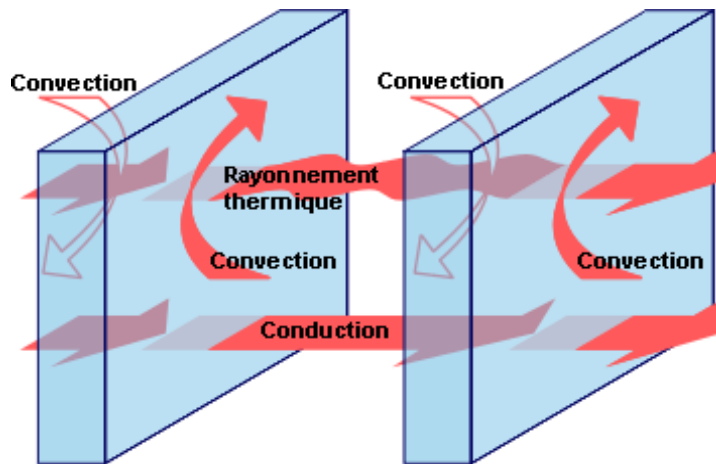


Figure I. 3 : illustration des trois modes de transfert thermique [6]

I.3.1. Transfert de chaleur par conduction :

I.3.1.1. Définition :

Le phénomène de transfert de chaleur à travers un ou plusieurs corps solides en contact direct est appelé conduction. La direction de ce flux thermique va toujours de l'élément le plus chaud vers le plus froid. L'importance de ce flux est directement corrélée à la conductivité thermique (λ) et à la différence de température entre les deux faces. En demi-saison, les températures intérieures et extérieures d'une habitation sont identiques ; puisqu'il n'y a pas de différence de température entre les deux surfaces, il n'y a pas de conduction de chaleur. La différence de température entre les faces intérieures et extérieures des parois est importante en hiver comme en été ; en conséquence, la chaleur se déplace à des vitesses variables du point chaud au point froid [7].

$$\bar{\varphi} = -\lambda \text{ grad} T^{\infty} \quad (\text{I.3})$$

Ou sous forme algébrique :

$$\varphi = -\lambda dT dx \quad (\text{I.4})$$

Chapitre I Généralité sur le transfert de chaleur

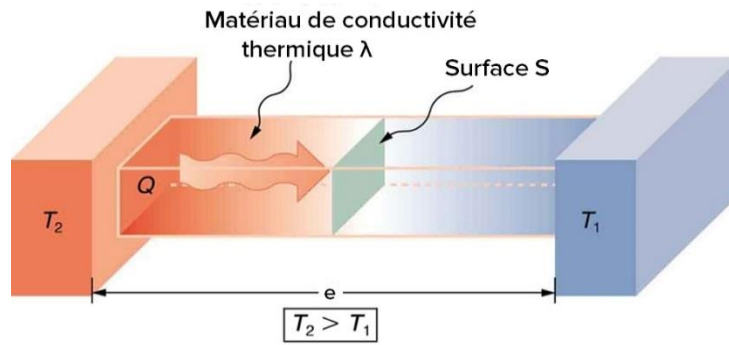


Figure I. 4 : Transfert de chaleur par conduction [8].

I.3.1.2. Applications :

Le transfert de chaleur par conduction caractérise tous les transferts de chaleur qui s'effectuent dans les parois séparant deux corps à des températures différentes. C'est le cas des surfaces d'échange des échangeurs de chaleur, mais c'est aussi celui des murs et vitrages d'un bâtiment, des cuves contenant des liquides chauds ou froids, des parois des fours, etc. [12]. Il est courant que les parois soient constituées de plusieurs matériaux ayant chacun un rôle spécifique (réfractaire, revêtement anticorrosion, isolant thermique, etc.) et qui sont des parois composites à travers lesquelles s'effectue le transfert de chaleur [1].

I.3.2. Transfert de chaleur par Convection :

I.3.2.1. Définition :

L'échange de chaleur entre une paroi et un fluide avec transport de la chaleur par le fluide en mouvement intervient quel que soit l'état du milieu considéré, solide, liquide, ou gazeux. Néanmoins, dans ces deux derniers cas, la possibilité de déformation importante que les fluides permettent aux différentes parties de ces milieux d'avoir, à l'échelle macroscopique, une liberté de mouvement importante et de même de transporter une quantité de chaleur directement, liée à leur capacité calorifique

Le mode de transfert de chaleur par convection est le plus important, mais aussi, il est le plus complexe parmi tous les autres modes, car il résulte de la superposition de deux phénomènes.

- Conduction entre les particules de fluide qui se rencontrent ;
- Mélange de ces particules par suite du mouvement d'ensemble du fluide.

Chapitre I Généralité sur le transfert de chaleur

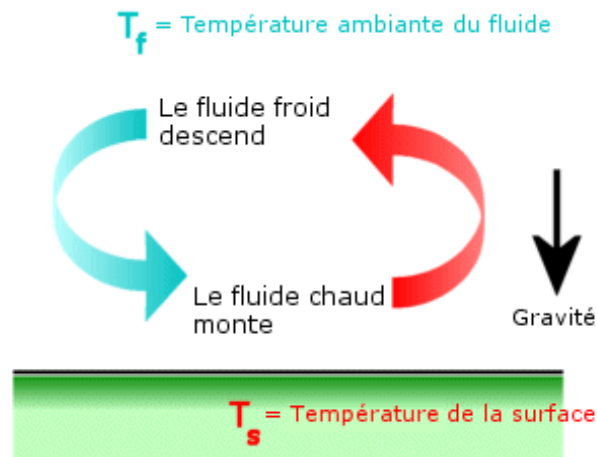


Figure I. 5 : Transfert de chaleur par convection entre un fluide et un solide [9]

La transmission de chaleur par convection est désignée, selon le mode d'écoulement du fluide, par convection libre ou convection forcée. Lorsqu'il se produit au sein du fluide des courants dus simplement aux différences de masse volumique, on dit que la convection est naturelle ou libre. Par contre, si le mouvement du fluide est provoqué par une action externe, telle une pompe ou un ventilateur, le processus est appelé convection forcée [9].

La transmission de chaleur par convection est désignée, selon le mode d'écoulement du fluide, par convection libre, convection forcée et convection mixte

- **Convection forcée :**

Le phénomène de convection forcée apparaît quand le mouvement du fluide est imposé par une cause mécanique extérieure (pompe, ventilateur, ...) au système.

- **Convection naturelle :**

Le phénomène de convection naturelle thermique apparaît spontanément, sous le seul effet des différences de masse volumique résultantes des différences de températures sur les frontières et d'un champ de forces extérieures (le champ gravitationnel, ...)

- **Convection mixte :**

La Convection mixte correspond au couplage des deux phénomènes précédents (convection naturelle et forcée) quand les vitesses d'écoulement, fictives, sont dues aux deux types de convections séparément.

Chapitre I Généralité sur le transfert de chaleur

$$\varphi = hs (T_p - T_{\infty}) \quad (I.5)$$

I.3.2.2. Applications :

Le rayonnement infrarouge est appliqué dans de très nombreux procédés industriels. Son action sur la matière est essentiellement thermique et les applications principales liées à ce rayonnement sont

- Le séchage (papiers, cartons, textiles, etc.) ;
- La cuisson (teintures, apprêts, enductions...) ;
- Le chauffage (avant formage de matériaux divers, traitements thermiques, soudage, chauffage de postes de travail...) ;
- Les polymérisations (encres, revêtements, emballages...) ;
- La stérilisation (flacons pharmaceutiques, produits alimentaires divers...) ;

Le rayonnement ultraviolet est constitué de photons dont l'énergie est de l'ordre de grandeur de l'énergie des liaisons atomiques. Ceux-ci agissent sur la matière par déplacement des électrons vers des niveaux énergétiques supérieurs. Lorsque la matière soumise au rayonnement y est sensible, il s'y produit des réactions chimiques. La partie du rayonnement ultraviolet absorbée par la matière et qui n'est pas utilisée à la réaction chimique est transformée en chaleur

Dans la pratique, cet échauffement reste faible et le rayonnement ultraviolet est principalement utilisé dans le domaine des réticulations de films plastiques et des polymérisations de produits organiques comme les encres d'imprimerie, les laques et vernis, opérations qui sont souvent appelées improprement séchages [1].

I.3.3. Transfert de chaleur par Rayonnement :

I.3.3.1. Définition :

Le rayonnement est un transfert thermique qui ne nécessite pas de milieu matériel par opposition aux deux autres. En effet, ce type de transfert thermique résulte de l'émission des rayons électromagnétiques transporte l'énergie. Ils sont émis par un corps chaud, tel que le soleil, et échauffent le corps qui les reçoit [10].

Chapitre I Généralité sur le transfert de chaleur

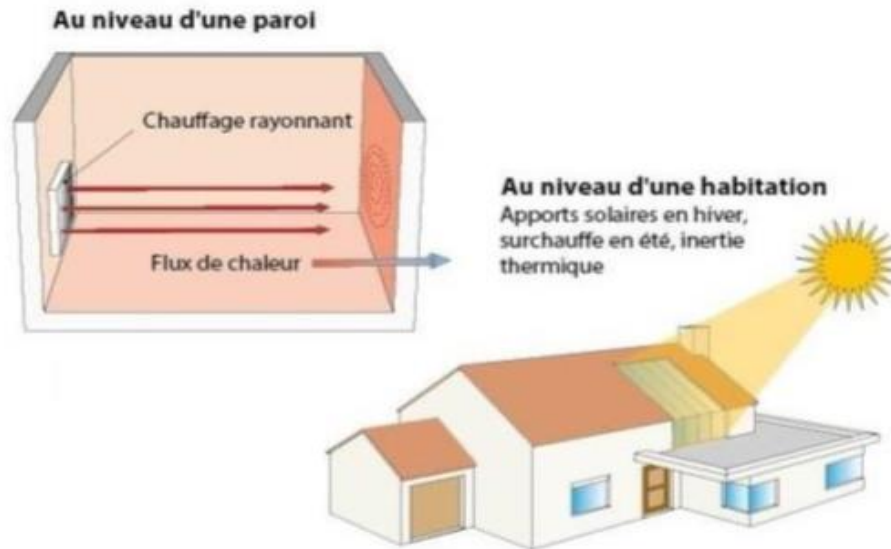


Figure I. 6 : Transfert de chaleur par rayonnement [11]

L'équation de bas utilisée pour exprimer le rayonnement est la loi de STEFAN BOLTZMANN

$$\Phi = \sigma \varepsilon S T^4 \quad (I.6)$$

Φ : Quantité de chaleur échangée

σ : Constante de STEFAN BOLTZMANN

ε : Emissivité thermique du matériau

S : Surface d'échange

T : Température

I.3.3.2. Applications :

Les applications du transfert de chaleur par convection sont beaucoup trop nombreuses pour que l'on puisse envisager de les citer toutes. Elles interviennent chaque fois que l'on chauffe ou que l'on refroidit un liquide ou un gaz, qu'il s'agisse de faire bouillir de l'eau dans une casserole, du radiateur de chauffage central, du radiateur associé au moteur d'une voiture ou de l'échangeur dans un procédé, évaporateur ou condenseur. La convection s'applique même si la surface d'échange n'est pas matérialisée par une paroi, ce qui est le cas des condenseurs par mélange ou des réfrigérants atmosphériques, voire des sècheurs à air chaud [1].

Références bibliographiques

❖ Référence Introduction générale :

- [1] H. Ma, N. Du, S. Yu, W. Lu, Z. Zhang, N. Deng, C. Li, Analysis of typical public, Energy and Buildings 136 (2017)139–150.
- [2] X. Lü, T. Lu, C J. Kibert, M. Viljanen, Modeling and forecasting energy consumption for heterogeneous buildings using a physical - statistical approach, Applied Energy 144 (2015) 261–275.
- [3] S. Semahi, Contribution méthodologique à la conception des logements à haute performance énergétique (HPE) en Algérie, Développement d'une approche de conception dans les zones arides et semi-arides, Mémoire de Magister, École Polytechniques d'Architecture et d'Urbanisme EPAU, Alger, 2013.

❖ Référence chapitre I :

- [1] Benammar.H<< étude numérique de la performance thermique des murs avec l'intégration d'un matériau a changement de phase (MCP)>> mémoire de fin d'étude master académique université Abdel Hamid ben badis – Mostaganem 2020-2021
- [2] https://www.methodephysique.fr/transfert_thermique_3d. Le - 28/04/2024 – (10:30H)
- [3] https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images_ le -28/04/2024-(10:37H)
- [4] Elgaroui.R << S. Krouma, O. Torki. Calcul de transfert de masse et de chaleur dans un fluide en écoulement dans une conduite à 90°. Projet d'ingénieur, université de Biskra (2003).>> / Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER
- [5] Odin Bulliard-Sauret, <<Étude expérimentale de l'intensification des transferts thermiques par les ultrasons en convection forcée. - Grenoble >> Mémoire de Thèse de l'Université de Grenoble, 2016]
- [6]<https://energieplus-lesite.be/techniques/froid-alimentaire7/vitrages-isolants-thermiques/>le 18/05/2024.
- [7] Khadmallah.S – Boughrara.Z<< <https://archenergie.fr/wp-content/uploads/2018/04/echanges-thermiques-d-une-paroiexplication.pdf> / mémoire de fin d'études
- [8] https://fr.khanacademy.org/science/physique-a-l-ecole/x6e8a541a302cdab5:physique-a-l-ecole-4e-annee-secondaire-1h/x6e8a541a302cdab5:physique-a-l-ecole-4e-1h-chaleur-et-energie-thermique/a/what-is-thermal-conductivity_Le 18/05/2024.
- [9] https://help.solidworks.com/2016/french/solidworks/cworks/c_Convection.htm. ____Le 18/05/2024.
- [10] Bendjaouane.S –Lemherzi.N << A. Chatelet, et al, " Architecture climatique, une contribution au développement durable " Tome 2, Concepts et dispositifs, Editions Edi sud, Aix-en-Provence, France. 1998, p19/ Mémoire de Fin d'étude En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil
- [11] <https://www.livres-forums-construction.fr/wp/2019/07/16/les-principes-de-la-thermiquedans-lhabitat/>

Chapitre II

Généralités sur les matériaux à changement de phase

Chapitre II Généralités sur les matériaux à changement de phase

Introduction :

Les matériaux à changement de phase (MCP) stockent l'énergie en changeant de phase solide- liquide (fusion) puis ils restituent la chaleur par le changement de phase liquide-solide (solidification). Ce stockage peut se faire sous deux formes :

Le stockage par la chaleur sensible (Stockage Thermique Sensible, STS) dans lequel la température des matériaux de stockage varie avec la quantité d'énergie stockée et le matériau ayant une grande capacité thermique. Le stockage par la chaleur latente (Stockage Thermique Latente, STL) qui utilise l'énergie emmagasinée ou restituée lorsqu'un corps change d'état (solide, liquide, gaz).

II.1 Les différents types de stockage :

II.1.1. Stockage chimique

Le stockage d'énergie par réactions chimiques est un procédé lors duquel les molécules d'adsorbat sont fixées par liaison covalente à la surface de l'adsorbant provoquant l'irréversibilité du mécanisme. Ce type de stockage consiste par exemple à utiliser l'énergie solaire pour initier une réaction chimique endothermique. La chaleur est stockée au sein du système et peut être restituée souvent à l'aide d'un catalyseur.

II.1.2. Stockage mécanique

Les systèmes du stockage d'énergie mécaniques comportent le stockage d'énergie gravitationnel, le stockage par l'hydro puissance pompé, le stockage d'énergie sous forme d'air comprimé et par volants.

II.1.3. Stockage électrique

- Supraconducteurs magnétiques : stockage électromagnétique.
- Photovoltaïque (batteries, accumulateur) - Stockage à très basse température.

II.1.4. Stockage thermique

L'utilisation différée de l'énergie est l'idée commune qui vient à l'esprit dès que l'on parle de stockage. Essentiellement trois modes de stockage thermique peuvent être envisagés : le stockage par chaleur sensible, le stockage par chaleur latente, le stockage thermochimique (Figure II. 1)[1].

Chapitre II Généralités sur les matériaux à changement de phase

II.2. Le stockage d'énergie par chaleur latente dans les MCP :

II.2.1. Principe :

Le stockage par chaleur latente est une solution de stockage thermique qui exploite la chaleur latente d'un Matériau à Changement de Phase (MCP), autrement dit sa capacité à passer de l'état solide à l'état liquide (fusion) sous l'effet de la chaleur.

L'énergie de changement de phase est absorbée lors de la fusion du MCP et est restituée lors de sa solidification. Cette solution nécessite l'utilisation d'un fluide caloporteur pour transférer la chaleur de la source à l'unité de stockage. Le MCP subissant des cycles de fusion/solidification, il ne peut être utilisé directement comme fluide de transfert. Les technologies de transfert de chaleur sont diverses : échangeur tubes ailettes, échangeur multitubes, encapsulation du MCP [2]

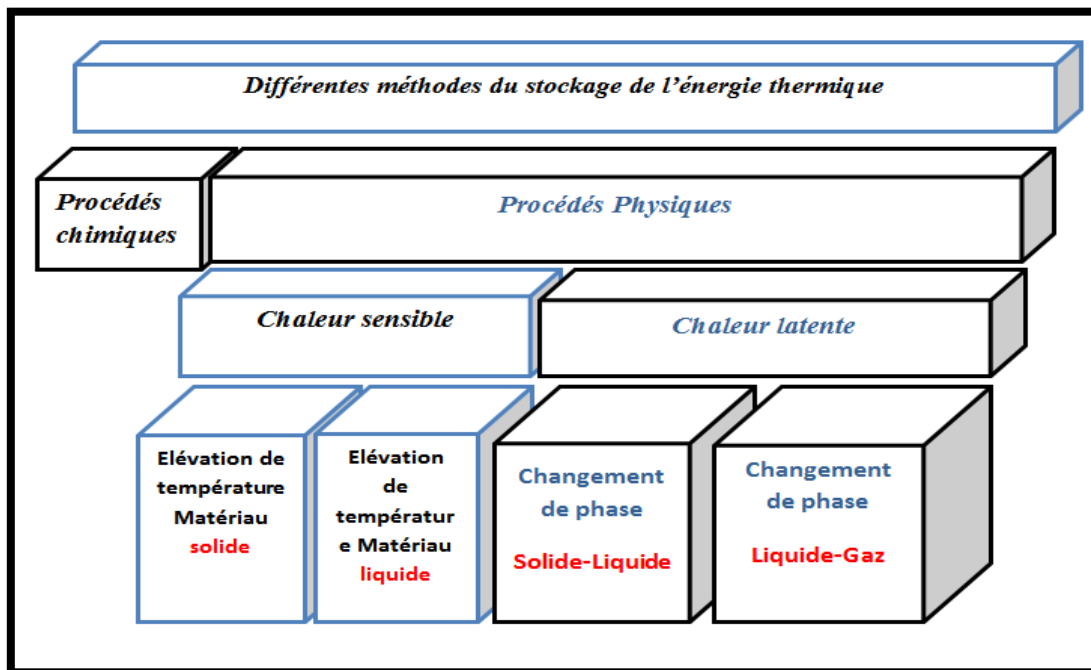


Figure II.1: les différentes méthodes de stockage de l'énergie thermique [1]

II.2.2. Stockage d'énergie thermique

Le stockage d'énergie thermique, peut-être défini comme étant l'accumulation de l'énergie thermique lorsqu'elle est abondante pour la restituer –après- lorsqu'elle devient rare. La plupart des systèmes présentent un décalage entre l'offre et la demande de l'énergie. Le stockage permet de compenser ce déséquilibre entre l'approvisionnement et la consommation d'énergie. On distingue trois types de stockage thermique : Stockage par chaleur sensible ; Stockage par chaleur latente ; Stockage thermochimique réalisé grâce à la chaleur dégagée

Chapitre II Généralités sur les matériaux à changement de phase

lors d'une réaction chimique.

II.2.3. Stockage par chaleur sensible

Le stockage par chaleur sensible est basé sur la variation d'enthalpie provoquée par un changement de température d'un matériau inerte à l'état solide, liquide ou gazeux (**Figure II. 2**). La quantité d'énergie mise en jeu pour chauffer un matériau (un corps) de masse m à pression constante de la température T_1 à la température T_2 est de capacité calorifique massique C_p et est donnée par la relation suivante :

$$Q_{sen} = \Delta H = \int_{T_1}^{T_2} m \cdot C_p(T) dt \quad (\text{II. 3})$$

Si la capacité calorifique massique du matériau est indépendante de la température sur l'intervalle $[T_1, T_2]$ ou la variation est négligeable sur cet intervalle, l'équation 1 devient :

$$Q_{sen} = m \cdot C_p(T_2 - T_1) \quad (\text{II. 2})$$

La quantité d'énergie stockée dépend alors de la capacité calorifique du corps, et de l'écart entre sa température initiale et finale. Le premier critère de sélection d'un matériau pour le stockage de la chaleur sensible est sa capacité calorifique. Le choix d'un matériau pour une application bien précise est aussi influencé par d'autres facteurs tels que la marge de température de l'application, le volume et la masse nécessaire du matériau.

II.2.4. Stockage par chaleur latente

Dans le cas d'un stockage par chaleur latente, l'énergie est stockée sous forme d'un changement d'état physique (solide-liquide). En effet, lorsqu'un matériau change de phase à une température appelée, température de fusion (T_f) ou un intervalle de température, une certaine quantité d'énergie est absorbée lors de ce processus de changement de phase (**Figure II.2**). En réalisant le procédé inverse, l'énergie est déstockée et le matériau revient à son état physique initial. L'énergie absorbée est appelée chaleur latente de fusion (L_f) et l'énergie déstockée est la chaleur latente de solidification (L_s). La chaleur latente est généralement beaucoup plus élevée que la capacité calorifique, ce qui permet de stocker plus de chaleur dans un volume réduit par comparaison avec un stockage thermique par chaleur sensible. Contrairement au stockage sensible, ce type de stockage peut être efficace pour des différences de température très faibles. Le changement de phase d'un corps pur se produit à une température bien précise. Dans le cas d'un changement de phase d'un mélange homogène, le changement de phase peut avoir lieu sur un intervalle de température qui est plus ou moins large en fonction des propriétés du mélange et en coexistence de deux phases Solide et liquide [3].

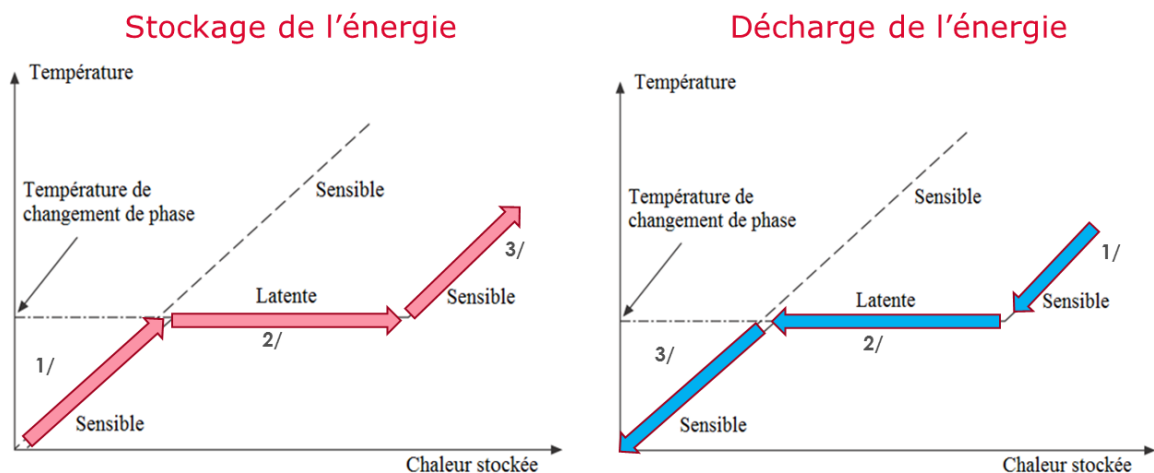


Figure II.2: Les schémas suivants expliquent les cycles de stockage et de décharge de l'énergie [1]

II.3. Matériau à changement de phase :

Les matériaux à changement de phase ou MCP sont des matériaux passés d'un état physique à un autre dans une plage de température restreinte. Un matériau à changement de phase met à profit sa capacité d'absorber ou de libérer de l'énergie pendant son changement de phase. Quand le point de fusion est atteint, le MCP passe de la phase solide à la phase liquide, ce qui est accompagné d'une absorption d'énergie, ce processus aide ainsi à réduire l'augmentation de la température ambiante. Quand le changement de phase est inversé, c'est-à-dire lorsque le matériau passe de l'état liquide à l'état solide, la chaleur absorbée est libérée.

Les changements de phase se produisent sans variation de température, ce qui signifie que de grandes quantités d'énergie peuvent être stockées et relâchées sans changement de température des matériaux. Un MCP permet donc de stocker la chaleur du milieu lorsque la température ambiante dépasse la température de fusion et de libérer cette chaleur quand la température devient inférieure

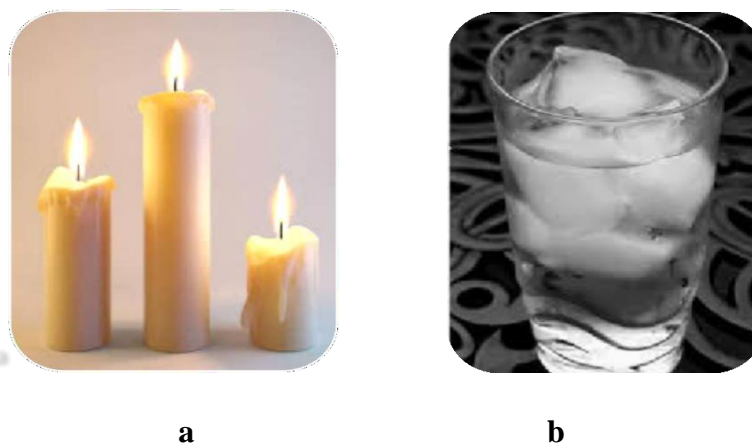


Figure II.3: Exemple de MCP : a. Paraffine, b. Eau [1]

Chapitre II Généralités sur les matériaux à changement de phase

II.4 Les différents types de changements d'état :

Les états (ou phases) de la matière représentent les différentes formes sous lesquelles une substance peut exister dans la nature. Les trois états de la matière les plus connus sont les états gazeux, solide et liquide. Il existe d'autres états comme le plasma, mais ceux-ci sont plutôt rares et doivent normalement être produits en laboratoire, dans des conditions de température et de pression précises [1].

II.5.Types des matériaux à changement de phase (MCP) :

Les matériaux à changement de phase utilisés sont :

- Les matériaux organiques, paraffines (C_nH_{2n+2}), non-paraffine et acides gras ($CH_3(CH_2)_{2n}COOH$).
- Les matériaux inorganiques : notamment sels hydratés (MnH_2O) et les métaux.
- Les mélanges eutectiques de corps organiques et/ou inorganiques.

Caractéristiques des différents types du MCP sont indiquées dans le tableau II.1 [5].

Type du MCP	Composition	Température de fusion (°C)	Chaleur de fusion (J/kg K)	Coût
Organique	Paraffine	-12 – 71	190 – 260	Coûteux
	Non-Paraffine	8 – 187	130 – 250	Très coûteux
Inorganique	Sels hydratés	11 – 120	100 – 200	Peu coûteux
	Métaux	30 – 96	25 – 90	Coûteux
Eutectique	Paraffine	4 – 93	100 – 230	Coûteux
	Non-Paraffine	4 – 93	190 – 260	Coûteux

Tableau II-1: Principales caractéristiques des différentes catégories du MCP [5]

II.5.1. Les MCP organiques :

Les produits organiques sont sans doute le type de MCP le plus populaire. Les produits organiques peuvent inclure une large gamme de MCP tels que ceux de la famille des alcanes (paraffine) (C_nH_{2n+2}) et de la famille des acides gras ($CH_3(CH_2)_{2n}COOH$). Les PCM organiques ont tendance à être abondamment disponibles, relativement peu coûteux et faciles à utiliser. Les alcanes et les acides gras ont des caractéristiques physiques similaires, présentant une surface blanche qui est d'apparence molle et cireuse.

Chapitre II Généralités sur les matériaux à changement de phase

Les produits organiques, en particulier la paraffine, sont les MCP les plus couramment étudiés pour la gestion thermique de l'électronique. La plage de fusion des matériaux de la famille des paraffines a tendance à être de 35 °C à environ 70 °C, en fonction de la structure de l'hydrocarbure spécifique, ce qui en fait une excellente correspondance avec l'électronique qui a une température de jonction maximale d'environ 85 °C [5].

II.5.1.1 Les paraffine :

La cire de paraffine est constituée d'un mélange de n alcanes à chaîne droite principalement $\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_n\text{-CH}_3$. La cristallisation de la chaîne $(\text{CH}_2)_n$ libère une grande quantité de chaleur latente à la fois au point de fusion et la chaleur latente de fusion augmente avec la longueur de la chaîne. La paraffine est qualifiée de chaleur des matériaux de stockage de fusion en raison de leur disponibilité dans une large plage de températures. Cependant, pour des raisons de coût, seules des paraffines de qualité technique peuvent être utilisées comme MCP dans les systèmes de stockage de chaleur latente. La paraffine est sûre, fiable, prévisible, moins chère et non corrosive. Ils sont chimiquement inertes et stables en dessous de 500 °C, présentent de faibles variations de volume lors de la fusion et ont une faible pression de vapeur sous forme fondue [5]



Figure II. 4: Paraffine [6]

II.5.1.2 Non paraffines :

Des esters, acides gras ; alcools et glycols peuvent être utilisés comme medium organiques de stockage thermique par chaleur latente. Ces matériaux doivent être conditionnés car ils sont inflammables et ne doivent pas être exposés à des agents oxydants. Leurs caractéristiques sont assez différentes d'une substance à l'autre contrairement aux paraffines[5].

Chapitre II Généralités sur les matériaux à changement de phase



Figure II.5 : Acide stéarique (acide gras) [7]

II.5.2 Les MCP inorganiques :

Les matériaux inorganiques sont également classés en hydrates de sel et en métaux. Ces MCP ne se sur fondent pas sensiblement et leurs chaleurs de fusion ne se dégradent pas avec le cycle.

Propriétés thermiques des MCP inorganique sont indiquées dans le tableau I.2

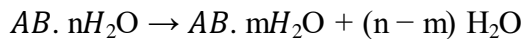
Composé	Température de fusion (°C)	Chaleur latent (kJ/kg)	ρ (kg/m ³)	k (W/m K)
MgCl ₂ · 6H ₂ O	117	168.6	1569 (sol)	0.694 (sol)
			1450 (liq)	0.579 (liq)
CaCl ₂ · 6H ₂ O	29	170 – 192	1802 (sol)	1.008 (sol)
			1562 (liq)	0.561 (liq)
NaSO ₄ · 10H ₂ O	32	251	1485 (sol)	0.544
NaNO ₃	307	172	2260 (sol)	0.5
KNO ₃	333	266	2110 (sol)	0.5
NaCl	802	492	2160 (sol)	5.0

Tableau II-2: Propriétés thermiques de certains MCP inorganiques [8]

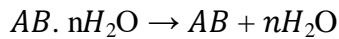
Chapitre II Généralités sur les matériaux à changement de phase

I.5.2.1 Les hydrates salins :

Les hydrates de sel sont des sels inorganiques qui contiennent de l'eau et dont la formule générale est $AB.nH_2O$. Pendant la charge, la déshydratation du sel a lieu. Le produit de cette déshydratation peut être un hydrate de sel avec moins molécules d'eau selon la formule :



Ou bien le même sel sous sa forme anhydre :



Le sel hydraté le plus utilisé par son faible coût est le $CaCl_2.6H_2O$ ($T_{\text{fusion}} = 28-30 \text{ }^\circ\text{C}$). On peut citer aussi le $Mn(NO_3)_2.6H_2O$ pour les applications de climatisation, et un nouveau matériau obtenu à partir de $Al_2(SO_4)_3.18H_2O$ utilisé avec des additifs pour des applications industrielles autour de 100°C . On peut aussi citer le bischofite comme exemple d'un mélange d'hydrates de sels composée à 95 % massique de $MgCl_2.6H_2O$ et à 5 % massique de $KMgCl_3.6H_2O$, $Li_2SO_4.H_2O$ et autres sels ioniques tels que $NaCl$ et KCl et ayant une température de fusion autour de $98.9 \text{ }^\circ\text{C}$ [5]

I.5.2.2 Métaux et alliages :

La famille des métaux est peut-être la plus sous-utilisée de toutes les familles de MCP, peut-être en raison de la faible chaleur latente que présentent la plupart de ces matériaux. Cependant, malgré cela, les métaux sont prometteurs dans certaines applications. Les MCP à base de métaux comprennent un certain nombre de matériaux dont les points de fusion se situent dans l'intervalle des applications MCP souhaitées. Nombre de ces métaux sont faciles à travailler et sont utilisés depuis des années dans d'autres applications nécessitant des métaux fondus [5].

I.5.2.3. Eutectique :

L'origine du mot eutectique grec et signifie fondre. Les eutectiques sont des mélanges de deux ou plusieurs corps, par définition. Ils sont classés en eutectiques inorganiques, eutectiques organiques et eutectiques organiques – inorganique. Le plus connu est l'eutectique eau sel, saler les routes en hiver permet d'abaisser la température de fusion du mélange ainsi constitué. La température de fusion d'un mélange eutectique est en effet inférieure à celle des deux composés le constituant. Quelques eutectiques sont utilisés pour le refroidissement et dans les systèmes passifs de stockage de l'énergie solaire [1].

Chapitre II Généralités sur les matériaux à changement de phase

Eutectiques Inorganiques	Point de fusion [°C]	Chaleur latente de fusion [kJ/kg]
49,3% MgCl ₂ .6H ₂ O + 50,7% Mg(NO ₃).6H ₂ O	58	132,3
Na ₂ SO ₄ (32,5%)H ₂ O(41,4%), NaCl(6,66%),NH ₄ Cl(6,16%)	13	146
61,5% Mg(NO ₃) ₆ H ₂ O + 38,5% NH ₄ NO ₃	51	131,1
58,3% Mg(NO ₃) ₆ H ₂ O + 41,7% MgCl ₂ .6H ₂ O	58	106
CaCl ₂ .6H ₂ O + CaBr ₂ .H ₂ O	14	140
Eutectiques Organiques		
Asides Caprique – Laurique	18	120
Asides Palmitique – Laurique	33	145
Asides Stéarique – Laurique	34	150

Tableau II-3: Une liste de quelques Eutectiques [1]

II.5.3. Avantages et inconvénients des MCP organiques et inorganiques :

Les principaux avantages et inconvénients sont résumés dans le tableau I-4 [5] :

	Avantages	Inconvénients
Les MCP organiques	<ul style="list-style-type: none"> • Disponible dans une large gamme de température. • Compatible avec les matériaux conventionnels de construction. • Pas de ségrégation. • Chimiquement stable. • Haute énergie de fusion. • Sûr et non réactif. • Recyclable. 	<ul style="list-style-type: none"> • Faible conductivité thermique à l'état solide. • Chaleur latente volumétrique faible. • Inflammable. • Nécessite un large rapport surface/volume.
Les MCP inorganiques	<ul style="list-style-type: none"> • Chaleur latente volumétrique importante. • Faible coût et facilement disponible. • Point de fusion net. • Haute énergie de fusion. • Non-inflammable. • Haute conductivité thermique. 	<ul style="list-style-type: none"> • Phénomène de surfusion important. • Agents de nucléation étrangers indispensables.

Chapitre II Généralités sur les matériaux à changement de phase

Les MCP eutectiques	<ul style="list-style-type: none">• Point de fusion net similaire à une substance pure.• Chaleur latente volumétrique légèrement supérieure à celle des composés organiques.	<ul style="list-style-type: none">• Peu de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux.• Peu utilisés au niveau des systèmes industriels.
--------------------------------	---	---

Tableau II-4: Principaux avantages et inconvénients de chaque type de MCP

II.6 Critères de choix d'un matériau à changement de phase :

Le choix d'un MCP doit être fait selon plusieurs critères. Les principaux pour le stockage de l'énergie thermique sous forme de chaleur latente sont :

II.6.1. Propriétés thermiques

- La température de transition de phase doit être conforme au domaine d'application.
- Une chaleur latente de transition élevée.
- Une bonne qualité de transfert de chaleur, une conductivité thermique élevée faciliterait la charge et la décharge du stockage de l'énergie

II.6.2 Propriétés physiques

- Une densité importante du corps permettra un volume de stockage très faible et donc un réservoir de stockage petit.
- Pour réduire les contraintes mécaniques dans le conteneur, la tension en vapeur doit être minimale et l'expansion volumique petite.
- Une stabilité des phases favorable pour le stockage et le déstockage de la chaleur

II.6.3 Propriétés cinétiques

- La surfusion doit être réduite.
- Un taux de cristallisation important

II.6.4. Propriétés chimiques

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

Chapitre II Généralités sur les matériaux à changement de phase

II.6. 5.Aspects économiques

- Le coût est un critère également très important. Celui-ci sera différent selon les utilisations. Par exemple, les utilisations domestiques demandent quelques kilogrammes alors que les utilisations industrielles quelques tonnes.
- Disponible en grande quantité [10].

II.7.Applications des MCP :

II.7.1. Domaine électronique

L'utilisation des MCP dans le domaine de l'électronique pour assurer le contrôle thermique et la protection des composants électroniques a reçu récemment une grande attention. En effet, la surchauffe de ces composants est absorbée par les MCP qui peuvent être placés directement en couche mince sur le composant électronique ou introduits dans une cavité aux puits de chaleur classique

II.7.2 Domaine mécanique

Les MCP ont été également utilisés pour préchauffer les moteurs à combustion interne comme par exemple le moteur diesel. En effet, les trois quarts de l'énergie produite par un moteur automobile sont dissipés dans la nature.

Cette énergie sera alors stockée par les MCP connectés au radiateur. Le stockage par chaleur latente permet alors d'éviter les problèmes liés au démarrage à froid du moteur

II.7.3 Domaine médicales

Dans le secteur médical, une des applications principales est le transport de sang et organes. D'autres applications médicales peuvent être des coussinets chauds ou froids pour traiter la douleur locale dans le corps

II.7.4. L'industrie textile

Récemment et dans l'objectif de réguler d'une manière passive la température corporelle en fonction de la température du milieu ambiant, des vêtements intelligents contenant des fibres thermo-régulées incorporant des matériaux à changement de phase attirent de plus en plus l'attention des fabricants de textiles, tels les vêtements à usage technique nécessitant une meilleure gestion des variations de température corporelle. En effet, l'intégration de ces matériaux dans les vêtements de protection comme la tenue feu des pompiers améliore la protection des usagers. Les différentes techniques d'incorporation de ces matériaux dans le textile et les applications potentielles des MCP dans ce domaine (couvertures, oreillers, revêtement de siège de voiture, tenue de sport combinaison spatiale, chaussures, gants,)

Chapitre II Généralités sur les matériaux à changement de phase

II.7.5. Domaine des routes

Les MCP sont également utilisés dans le domaine des routes en tant que retardateurs d'apparition du gel sur la chaussée. Les MCP employés dans ces projets, dont le point de solidification est supérieur à celui de l'eau, libèrent de l'énergie lorsque la température extérieure atteint leur température de solidification. Ceci limite la dégradation de la chaussée par action du froid

II.7.6 Les MCP dans les rideaux :

Les rideaux à base de MCP sont aussi expérimentés pour améliorer le confort résidentiel. Le principe de fonctionnement consiste à laisser les fenêtres ouvertes afin que les rideaux soient exposés aux rayonnements solaires. La fusion des MCP permet de rafraîchir l'intérieur du bâtiment. Au cours du refroidissement nocturne ou par temps nuageux, le rideau libère la chaleur solaire emmagasinée ce qui permet aux MCP de se solidifier et la salle de se réchauffer

II.7.7 Application aux bâtiments

L'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) en vue du stockage de chaleur dans les bâtiments a été l'une des premières applications pour ces matériaux. Les premiers panneaux de construction de bâtiment contenant les MCP sont réalisés au Mexique par Wright et Balcomb. Actuellement, la majorité des études concernant les matériaux à changement de phase (MCP) sont orientés vers :

- Leur utilisation, lorsqu'ils sont intégrés à l'enveloppe du bâtiment, pour des applications de chauffage.
- Leur intégration à l'enveloppe de bâtiments à faible inertie thermique dans le but d'améliorer le confort d'été.
- L'utilisation des MCP pour chauffer ou refroidir un bâtiment, peut se faire de trois façons différentes.
- Intégration dans les murs du bâtiment ;
- Intégration dans les éléments de constructions autres que les murs ;
- Intégration dans les unités de stockages à chaud et/ou à froid.

L'intégration de matériau à changement de phase (MCP) dans l'enveloppe d'un bâtiment constitué une solution pour améliorer la performance thermique de celui-ci, notamment en termes de confort d'été [1].

Chapitre II Généralités sur les matériaux à changement de phase

Conclusion

Le stockage de l'énergie thermique par les matériaux à change de phase (MCPs) est un sujet très important compte tenu de la vaste littérature présentée dans cette partie. Par rapport aux études axées sur le stockage de chaleur sensible, il existe davantage d'études axées sur le stockage de chaleur latente. L'utilisation des PCMs pour le stockage de l'énergie thermique a suscité un regain d'intérêt ces dernières années. Cela est dû à la densité de stockage élevée (quantité d'énergie stockée par unité de masse) du PCM. De plus, ces matériaux peuvent être utilisés dans divers domaines.

Références bibliographiques

❖ **Référence chapitre II :**

- [1] Haddad et Grib.r <<modélisation et simulation des matériaux à changement de phase>>mémoire de master domaine sciences de la matière. Université Larbi tébessa2020
- [2] By d. v. hale, m. j. hoover, and m. j. O'Neill, phase change materials handbook; nasacr-61363, Huntsville research and engineering center 4800 Bradford drive, September 1971.
- [3] M.M. El Idi << Stockage d'énergie thermique par changement de phase solide/liquide dans les milieux poreux>>, thèse de doctorat, Université Paris-Est, 2012.
- [4] Benammar.H << étude numérique de la performance thermique des murs avec l'intégration d'un matériau a changement de phase (MCP)>> mémoire de fin d'étude master académique université Abdel Hamid ben badis – Mostaganem 2020-2021
- [5]<https://group-alliancegulf.com/wp-content/uploads/2021/11/parafine.Le23/04/2024/10:26H>
- [6]<https://hunzaroma.com/wp-content/uploads/2018/08/products-acide-starique-le23/04/2024-11:10H>
- [7] Kherrafi.M et Khelladi.M<<simulation numérique et validation de la fusion de la paraffine dans une cavité chauffée par le bas>>mémoire de master université Boubaker belkaïd – Tlemcen 2020 - 2021
- [8] <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-eutectique->
- [9] K. Pielichowska, K. Pielichowski, Phase change materials for thermal energy storage, Progress in Materials Science, Vol. 65, pp. 67-123, 2014.
- [10] intégrant des Matériaux à Changement de Phase : Modélisation, Expérimentation et Évaluation de la performance énergétique globale », Thèse de doctorat, Université de La Réunion, (2013)

Chapitre III

*Etude Théorie du changement de phase
solide-liquide*

Chapitre III Etude Théorie du changement de phase solide-liquide

III.1. Introduction :

Le changement de phase (solide-liquide) d'un matériau est un phénomène très répandu dans la nature et a fait objet de multiples utilisations industrielles. La difficulté majeure de ce phénomène réside en la résolution des équations de transfert de chaleur entre le fluide caloporteur, la paroi et le MCP, et cela en considérant les changements de propriétés provoqués par la fusion/solidification du matériau.

Il y a différentes méthodes de résolution numérique dans la littérature pour la description et la résolution du problème de transfert thermique dans un bâtiment. Dans ce chapitre, nous présentons le problème de changement de phase, puis les différentes formulations pour le traitement de ce type de problème. Une résolution, en cas 2D, est présentée en comparant nos résultats numériques avec ceux expérimentaux et numériques de la littérature. Finalement, la validation du modèle numérique pour le problème de changement de phase du MCP est établie, ce modèle servira par la suite dans l'étude du comportement thermique du mur et du caisson contenant des MCP.

III.2. Théorie du changement de phase solide-liquide :

La solidification est considérée comme un problème de Stefan. Elle est une appellation attribuée suite aux travaux du chercheur Stefan qui a fait l'étude de la fusion et de la congélation d'eau en 1890.

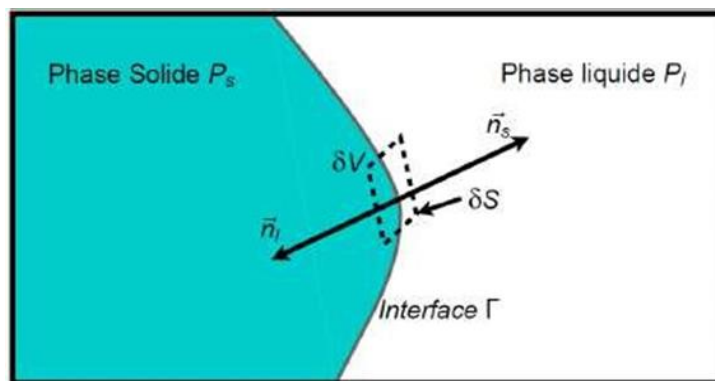


Figure III. 1 : Représentation de l'interface de changement de phase solide-liquide. [1]

Au cours du changement de phase solide-liquide d'un corps pur ou d'un mélange (cas des alliages), une zone de transition entre les deux phases existe [1]. A l'échelle microscopique, la zone de transition (ou interface) Γ correspond à une discontinuité des propriétés physiques (Figure III.1). A l'échelle macroscopique, elle est considérée comme continue et diffuse, cela correspond au cas d'une « zone pâteuse » lors de la solidification.

Chapitre III Etude Théorie du changement de phase solide-liquide

Les caractéristiques principales du changement de phase sont [1]:

- L'interface est à une température déterminée par les relations locales d'équilibre thermodynamique.
- Le changement d'état donne lieu à un dégagement de chaleur pour la solidification et une absorption de chaleur dans le cas de fusion, proportionnel à la vitesse de changement de phase et localisé à l'interface.

Soit un métal pur en état de fusion à une température T_l qui est supérieure à la température de fusion T_F . Lors de son refroidissement, la température du métal fondu descend progressivement suivant le palier (a), puis elle se stabilise à la température T_F durant le changement de phase (b), ensuite le métal totalement solidifié suivant le palier (c) jusqu'à la température T_s . La Figure III.2 schématise cette transition

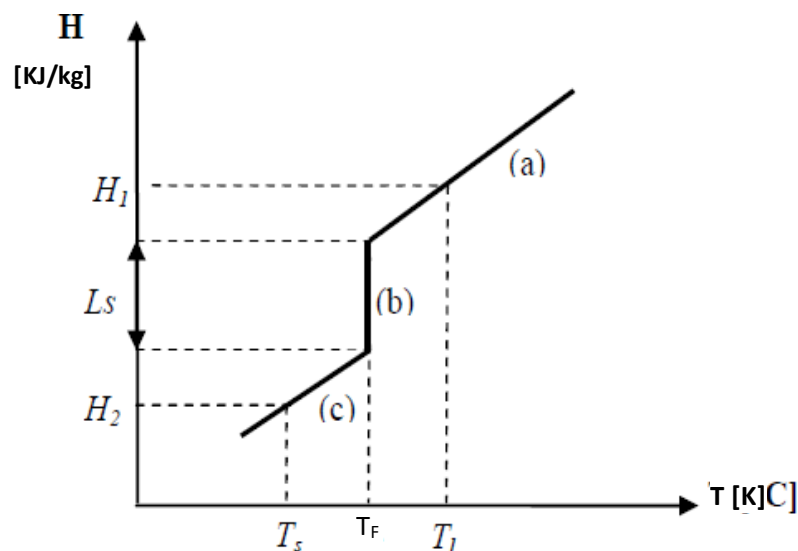


Figure III.2: Représentation de l'enthalpie en fonction de la température. [1]

Chacun de ces paliers représente un état spécifique du métal et la variation d'enthalpie dans chacun d'eux sont données comme suit :

• Palier (a) : $dH = Cpl dT$ pour $T > T_F$ (III.1)

• Palier (b) : $dH = L_s$ pour $T = T_F$ (III.2)

• Palier (c) : $dH = Cps dT$ pour $T < T_F$ (III.3)

Chapitre III Etude Théorie du changement de phase solide-liquide

En notant que H est une fonction discontinue qui marque la séparation entre le liquide et le Solide. Elle est appelée interface diphasique.

La quantité d'énergie s'écrit de la manière suivante :

$$\Delta H = C_{pl} (T_l - T_F) + L_s + C_{ps} (T_l - T_s) \quad (\text{III.4})$$

Avec :

T_l : La température du métal à l'état liquide

T_s : La température du métal à l'état solide.

T_F : La température de fusion.

C_{pl} et C_{ps} : Les capacités thermiques du métal à l'état liquide et solide

Pour un métal pur, l'enthalpie est en fonction de la température :

$$\Delta H = \begin{cases} C_{pl}\Delta T + L_s & \text{pour } T > T_f \\ C_{ps}\Delta T & \text{pour } T < T_f \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

(III.6)

Pour un alliage, l'enthalpie s'écrit sous la forme suivante :

$$\Delta H \begin{cases} C_{pl}\Delta T + L_s & \text{pour } T \geq T_f & (\text{III.7}) \\ C_p\Delta T + T_f L_s & \text{pour } T_s < T < T_L & (\text{III.8}) \\ C_{ps}\Delta T & \text{pour } T \leq T_f & (\text{III.9}) \end{cases}$$

III.3. présentation ANSYS fluent:

ANSYS Fluent est un logiciel puissant de dynamique des fluides numérique (CFD - Computational Fluid Dynamics) largement utilisé pour modéliser et résoudre des problèmes de flux de fluides et de transfert de chaleur dans diverses applications d'ingénierie.

En résumé, ANSYS Fluent est un outil puissant pour l'analyse des flux de fluides et du transfert de chaleur, aidant les ingénieurs à comprendre et à améliorer le comportement des fluides dans leurs systèmes, tout en optimisant les conceptions pour une meilleure performance

III.3.1. Fonctionnalités et capacités d'ANSYS Fluent :

Modélisation des flux de fluides : ANSYS Fluent propose une gamme d'outils pour modéliser les flux de fluides, que ce soit des simulations de flux forcés ou naturels, en dimensions 2D ou 3D, et dans des systèmes multiphasés.

Chapitre III Etude Théorie du changement de phase solide-liquide

Modélisation du transfert de chaleur : En plus des flux de fluides, ANSYS Fluent peut modéliser le transfert de chaleur entre les matériaux, les fluides et les solides, permettant l'étude de la distribution de la température et la conception de systèmes de refroidissement et de chauffage.

Analyse dynamique des fluides : ANSYS Fluent supporte une analyse complète des dynamiques des fluides, incluant les effets de rotation, les interactions fluides-structure, les effets thermodynamiques, entre autres, aidant ainsi les ingénieurs à mieux comprendre le comportement des fluides dans leurs systèmes.

Optimisation des performances : Le logiciel propose des outils pour optimiser les performances des conceptions en améliorant les flux de fluides, en réduisant la résistance et en augmentant l'efficacité des systèmes.

Analyse du transfert de chaleur et des particules : ANSYS Fluent permet l'analyse du transfert de chaleur des fluides et des particules, ainsi que leurs effets sur divers systèmes d'ingénierie.

Domaines d'application : Le logiciel est utilisé dans plusieurs industries telles que l'aérospatiale, l'automobile, l'énergie, la médecine, l'environnement et les industries générales, où la conception de systèmes de fluides efficaces et précis est essentielle

III.3.2.Utilisation pratique :

Préparation des modèles : Utilisation des outils d'édition de maillage, de définition des conditions aux limites et des conditions initiales pour préparer les modèles avant l'analyse avec ANSYS Fluent.

Analyse des résultats : Après l'analyse, les utilisateurs peuvent utiliser les outils d'ANSYS Fluent pour analyser les résultats de manière détaillée et extraire des informations telles que les flux, les pressions et les distributions thermiques.

III.4. Méthodes numériques :

De multiples solutions analytiques sont envisagées pour traiter les cas les plus courants des problèmes de changement de phase avec des hypothèses simplificatrices telles que les propriétés thermo-physiques constantes dans chaque phase, les géométries simples, etc. Ces solutions ne sont plus suffisantes lorsqu'on traite des problèmes plus complexes. En effet, les solutions analytiques de la littérature s'appliquent lorsque le milieu est considéré comme semi-infini. Le cas du changement de phase dans les milieux finis nécessite l'utilisation du calcul numérique. Pour cela, deux grandes classes ont été considérées pour résoudre numériquement les phénomènes de changement de phase [2].

Chapitre III Etude Théorie du changement de phase solide-liquide

III.4.1 Méthode à maillage mobile :

Dans ce problème, les variations de température pour les phases solide et liquide sont gouvernées par l'équation classique de conduction de chaleur donnée par :

•Dans la phase solide :

$$\rho_s C_{ps} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda_s \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (\text{III.10})$$

•Dans la phase liquide :

$$\rho_l C_{pL} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda_l \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (\text{III.11})$$

•Conditions à l'interface :

$$\begin{cases} T_s = T_l = T_F & (\text{III.12}) \\ -\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial n} + \lambda_l \frac{\partial T_l}{\partial n} = \rho_s L_s \frac{\partial \xi}{\partial n} & (\text{III.13}) \end{cases}$$

n désigne la normale au front et ξ la position du front de solidification.

La condition de Stefan (III.12 et III.13) traduit la chute de l'enthalpie du système, c'est-à-dire dégagement de la chaleur latente L_s à la température de fusion T_F . Cette méthode convient dans le cas d'un métal pur pour lequel le changement de phase se produit à une température constante.

III.4.2 Méthode à maillage fixe :

Dans ce cas, une seule équation d'énergie est considérée pour les deux phases et par conséquent il n'est pas nécessaire de considérer séparément les deux phases liquide et solide. Le maillage reste alors fixe et les équations gouvernant le transfert de chaleur dans la région liquide et la région solide sont résolues simultanément lors du calcul même avec la discontinuité du gradient de température à l'interface.

Ces méthodes sont utilisables pour résoudre des problèmes multidimensionnels avec changement de phase isotherme ou dans une marge de température puisqu'elles sont établies pour l'ensemble du domaine de calcul sans prendre en considération les conditions de saut à l'interface. Elles comprennent la méthode de capacité thermique apparente et la méthode enthalpie.

Chapitre III Etude Théorie du changement de phase solide-liquide

III.4.2.1 Méthode du c_p apparent :

La méthode du c_p apparent réduit le système d'équations qui définit le processus de changement de phase en une seule équation [3]. En effet, elle permet de présenter l'effet de la chaleur latente sur la capacité thermique du matériau dans une petite plage de température à proximité de la température de fusion. Dans l'ensemble, en considérant la simplicité de cette méthode, elle demeure la moins efficace par rapport aux autres méthodes.

L'équation d'énergie est alors définie par [4]:

$$\rho C_{eff} \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (\text{III.14})$$

Les chaleurs spécifiques dans chaque zone sont alors définies par :

$$C_{eff} = \begin{cases} C_{ps} & \text{si } T < T_F \\ C_p + \frac{L_s}{T_l - T_s} \delta(T - T_F) & \text{si } T = T_F \\ C_{pl} & \text{si } T > T_F \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

Où $\delta(T - T_F)$ représente la fonction de Dirac définie à $T = T_F$ et elle satisfait l'équation suivante :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(T - T_F) dT = 1 \quad (\text{III.16})$$

On introduit la fonction Delta pour faciliter le calcul et pour déterminer les nœuds dans lesquels la chaleur latente est comprise dans la chaleur spécifique, ce qui nous permet d'avoir :

$$C_{eff} = \begin{cases} C_{ps} & \text{pour } T < T_F - \Delta T & (\text{III.17}) \\ C_p + \frac{L_s}{2\Delta T} & \text{pour } T_F - \Delta T \leq T \leq T_F + \Delta T & (\text{III.18}) \\ C_{pl} & \text{pour } T > T_F + \Delta T & (\text{III.19}) \end{cases}$$

Sachant que pour les alliages, $2\Delta T = T_l - T_s$ et pour les métaux purs, le changement de phase s'achève à une température constante et que l'intervalle doit être le plus petit possible.

Chapitre III Etude Théorie du changement de phase solide-liquide

III.4.2.2 Méthode enthalpique :

Dans la méthode enthalpique, l'enthalpie est utilisée comme valeur de variable dépendante de la température. Dans ce cas, le problème de changement de phase devient beaucoup plus facile car les équations qui régissent le transfert sont les mêmes pour les deux phases. Hunter [5] a confirmé que la méthode enthalpique était celle qui convenait le mieux aux applications typiques. La raison est que cette méthode ne nécessite pas de traitement explicite des conditions sur la limite de changement de phase [6]. Le principe de cette méthode consiste à utiliser pour les deux phases une seule variable (enthalpie H) comme inconnue.

L'équation de la conduction thermique pour le cas bidimensionnel est présentée comme suit

$$\rho \left(\frac{\partial H}{\partial t} + u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - S_h \quad (\text{III.20})$$

L'enthalpie H est définie alors comme suit :

$$H = C_p T + f_l L_s \quad (\text{III.21})$$

Avec :

- Dans la région liquide ($T > T_l$): $f_l = 1$.
- Dans la région solide ($T < T_s$): $f_l = 0$.
- Dans la région pâteuse (où coexistent les deux phases $T_s \leq T \leq T_l$): $f_l = \frac{T - T_s}{T_l - T_s}$

On obtient alors :

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - S_h \quad (\text{III.22})$$

Où S_h représente le terme source qui se présente comme suit :

$$S_h = \rho L_s \left(\frac{\partial f_l}{\partial t} + u \frac{\partial f_l}{\partial x} + v \frac{\partial f_l}{\partial y} \right) \quad (\text{III.23})$$

Chapitre III Etude Théorie du changement de phase solide-liquide

Conclusion :

L'étude de processus de changement de phase présente une difficulté majeure dans la modélisation numérique à cause de sa forme irrégulière qui est inconnue a priori et dépend des taux de transfert de chaleur. De ce fait, la connaissance des mécanismes de transfert de chaleur dans les phases solide et liquide d'un MCP requiert un modèle qui permet de prévoir avec exactitude les performances thermiques des systèmes de stockage d'énergie. Dans ce chapitre, on a présenté un récapitulatif des différentes méthodes de résolution numérique présentées dans la littérature et une résolution en cas 2D pour le problème de changement de phase : ceci va nous servir pour l'étude du comportement thermique du mur contenant des MCP.

Références bibliographiques

❖ **Référence chapitre III :**

- [1] Bianchi AM, Fautrelle. Y, Etay. J. 2004 : Transferts thermiques. Presses polytechniques et universitaires romandes.
- [2] Fabiano Cordeiro Cavalcanti : Caractérisation thermique de produits de l'état liquide à l'état solide. Thèse de doctorat
- [3] J. Banaszek, R. domanski, M. Rebow, F. El-Sagier : Experimental study of solid-liquid phase change in spiral thermal énergie Storage unit. Applied Thermal Engineering, Vol. 19, pp 1253-1277, 1999
- [4] Bourgueba Djaoued, Bekkouche Ismail : Simulation numérique du stockage de l'énergie solaire par chaleur latente. Mémoire de Magister, University Abou Bekr Belkaid, 2013-2014.
- [5] Hunter L.W, Kuttler J.R: The enthalpy method for heat conduction problems with moving boundaries. J. Heat Transfer Trans ASME 1989.
- [6] Voller V.R: Fast implicit finite-difference method for the analysis of phase change problems. Numerical Heat Transfer Part B 1990.

Chapitre IV
Résultats et discussions

Chapitre IV Résultats et discussions

IV.1. Introduction

L'amélioration des performances thermiques de l'enveloppe du bâtiment est un domaine de recherche important. Pendant les dernières années, les chercheurs ont développé des nouveaux systèmes de stockage d'énergie qui peuvent être employés pour réduire la consommation énergétique due aux systèmes de chauffage et climatisation. La construction des bâtiments modernes utilise des matériaux légers qui peuvent fournir une ambiance intérieure confortable pour les occupants. En effet, le marché mondial offre des nouvelles technologies des énergies renouvelables, qui peuvent être intégrées dans les bâtiments pour l'amélioration de l'efficacité énergétique et la lutte contre les changements climatiques. L'utilisation des matériaux à changement de phase MCPs dans l'enveloppe favorise une réduction de la dépendance énergétique. Le processus de solidification/fusion permet d'utiliser le stockage de la chaleur latente pour augmenter l'inertie thermique de l'enveloppe. Les conditions environnementales doivent assurer le cycle de la solidification/fusion des MCPs, la plage de la température de fusion des MCPs doit donc être proche de la température du confort thermique.

IV.2. Etude numérique de la solidification-fusion d'un mélange "Plâtre-MCP"

Cette partie de ce chapitre présente une étude numérique du problème de la solidification-fusion d'un mélange plâtre-MCP dans une plage de température qui nous permet de suivre le processus de changement de phase. Pour résoudre ce problème, on utilise la méthode enthalpie-porosité. La zone pâteuse liquide-solide est traitée comme une zone poreuse avec une porosité égale à la fraction liquide (f), qui indique la fraction du volume de la cellule sous forme liquide, est associée à chaque cellule du domaine. La fraction liquide est calculée à chaque itération, sur la base d'un bilan d'enthalpie. La simulation numérique est réalisée en utilisant un code de calcul commercial CFD ANSYS 16 [1].

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

Chapitre IV Résultats et discussions

IV.3. Cas d'une paroi plane opaque :

Dans cette section, nous allons utiliser la méthode d'enthalpie-porosité pour étudier le problème de transfert thermique à changement de phase. Le problème physique et les conditions aux limites et initiales sont décrits par (figure IV.1). La paroi a une épaisseur de $L=1$ cm et une hauteur de $H=20$ cm. Donc, le mur est soumis à une variation de température $T_p(t) = \theta t + T_0$ sur les deux cotés verticaux. Les frontières supérieure et inférieure sont isolées thermiquement. Ainsi, le problème peut être simplifié comme étant un problème de transfert de chaleur par conduction unidimensionnel à travers le milieu MCP. Les propriétés thermo-physiques sont différentes pour les deux phases solide et liquide tout en étant indépendant de la température. La convection naturelle dans le milieu MCP est négligée en raison des basses dimensions de la paroi. Le mélange MCP-plâtre est supposé homogène et isotrope. La température de fusion du MCP est $T_f = 26$ °C. Les données utilisées pour réaliser ces simulations ont été obtenues à partir de données mesurées par Choi et al. [2]. Compte tenu de ces hypothèses, la formulation d'enthalpie pour la conduction qui contrôle le changement de phase peut être écrite comme suit:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (IV.1)$$

λ : est la conductivité thermique

T : est la température

$H(T)$: est l'enthalpie

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

$$H = h + \rho f L \quad (IV.2)$$

f : est la fraction volumique du liquide

ρ : est la densité

L : est la chaleur latente

L'enthalpie sensible du MCP peut être donnée en termes de température et de capacité calorifique spécifique par la relation suivante :

$$h = \int_{T_f}^T \rho c dT \quad (IV.3)$$

T_f : est la température de fusion.

Chapitre IV Résultats et discussions

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

$$f = \begin{cases} 1 & \text{si } T \geq T_f \\ 0 & \text{si } T \leq T_f \\ \frac{T - T_{sol}}{T_{liq} - T_{sol}} & \text{si } T_{sol} < T < T_{liq} \end{cases} \quad (\text{IV.4})$$

l'équation (IV .4) peut être traitée via des étapes d'itération pour résoudre

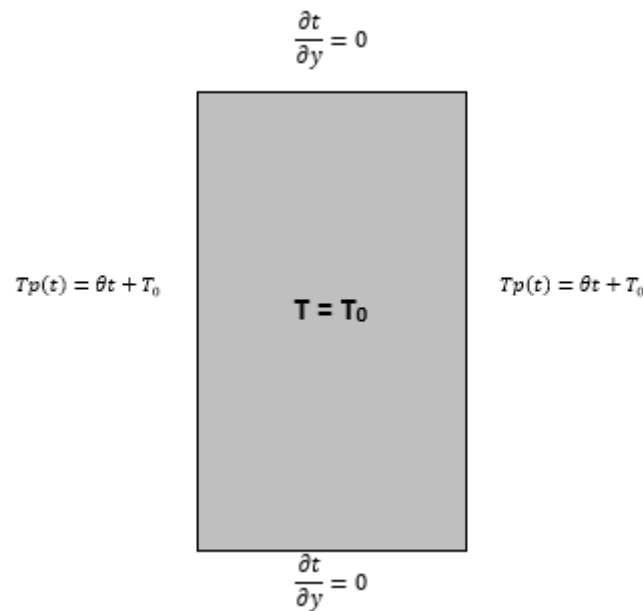


Figure IV. 1: Conditions aux limites du modèle étudié.

Tableau IV.1: Propriétés thermo physiques de mélange plâtre + MCP [3]

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

Chapitre IV Résultats et discussions

l'équation d'évolution de la température en raison du terme non linéaire de source de chaleur latente existant dans l'équation d'énergie (équation IV.1). Ainsi, les formulations d'enthalpies générales, prenant en compte les parties sensibles et latentes, peuvent être données par:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \nabla(a\nabla h) - \rho L \frac{\partial f}{\partial t} \quad (\text{IV.5})$$

L'équation ci-dessus ainsi que les conditions initiales et aux limites représentent le Modèle mathématique régissant le problème de changement de phase isothermique par conduction. Il convient de noter que les formulations mathématiques sont adéquates, car la fraction liquide est considérée comme un terme source. Puisque (l'équation IV.5) est non linéaire, le modèle ne peut être résolu que numériquement.

VI.4. Résultats et discussion :

➤ 1^{ère} étude :

Les résultats numériques sont représentés par les (figures IV.2 et IV.3 et IV.4) Le flux de chaleur et la température sont les paramètres thermo-physiques utilisés pour l'étude de comportement thermique du mélange MCP-Plâtre. L'étude s'est achevée lorsque le mélange est à l'état solide ($T_{\text{initiale}} = 17 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{finale}} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$) et à l'état liquide ($T_{\text{initiale}} = 29 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{finale}} = 38 \text{ }^\circ\text{C}$), à l'état solide vers liquide ($T_{\text{initiale}} = 17 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{finale}} = 38 \text{ }^\circ\text{C}$) le choix de ces valeurs dépend de la température de fusion $T_f=26 \text{ }^\circ\text{C}$. Il est important de noter que le flux de chaleur à $t = 0 \text{ s}$ (l'état initial) est égal à $Q = 0 \text{ (w/s)}$. Ainsi, on impose une augmentation de température sur les deux cotés verticaux par l'équation $T_p(t) = \theta t + T_0$ qui induit une évolution thermique du système (stockage) pour rendre l'état d'équilibre plus stable. La (figure IV.2) représente donc l'augmentation de température imposée et le flux de chaleur apporté au mélange MCP/plâtre pendant 4000s.

On remarque une augmentation rapide de la température du mélange de 17°C à 23°C après un temps $t=2750 \text{ s}$. En revanche, on constate une augmentation rapide du flux thermique dans les parois extérieure et intérieure, atteignant sa valeur maximale environ 34 watts/m_2 à $t=500 \text{ s}$. suivie d'une diminution rapide tant vers zéro à $t = 2750 \text{ s}$ ($\Delta T = 0^\circ\text{C}$). Ainsi, on note que le mur atteint la température d'équilibre après $t=2750 \text{ s}$. On peut observer que le mélange prend sa température d'équilibre après un temps de $t = 2750 \text{ s}$, Cependant, le choix des valeurs de température ($T_{\text{initiale}} = 17 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{finale}} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$) est imposé pour étudier le

Chapitre IV Résultats et discussions

comportement thermique du mélange plâtre/MCP.

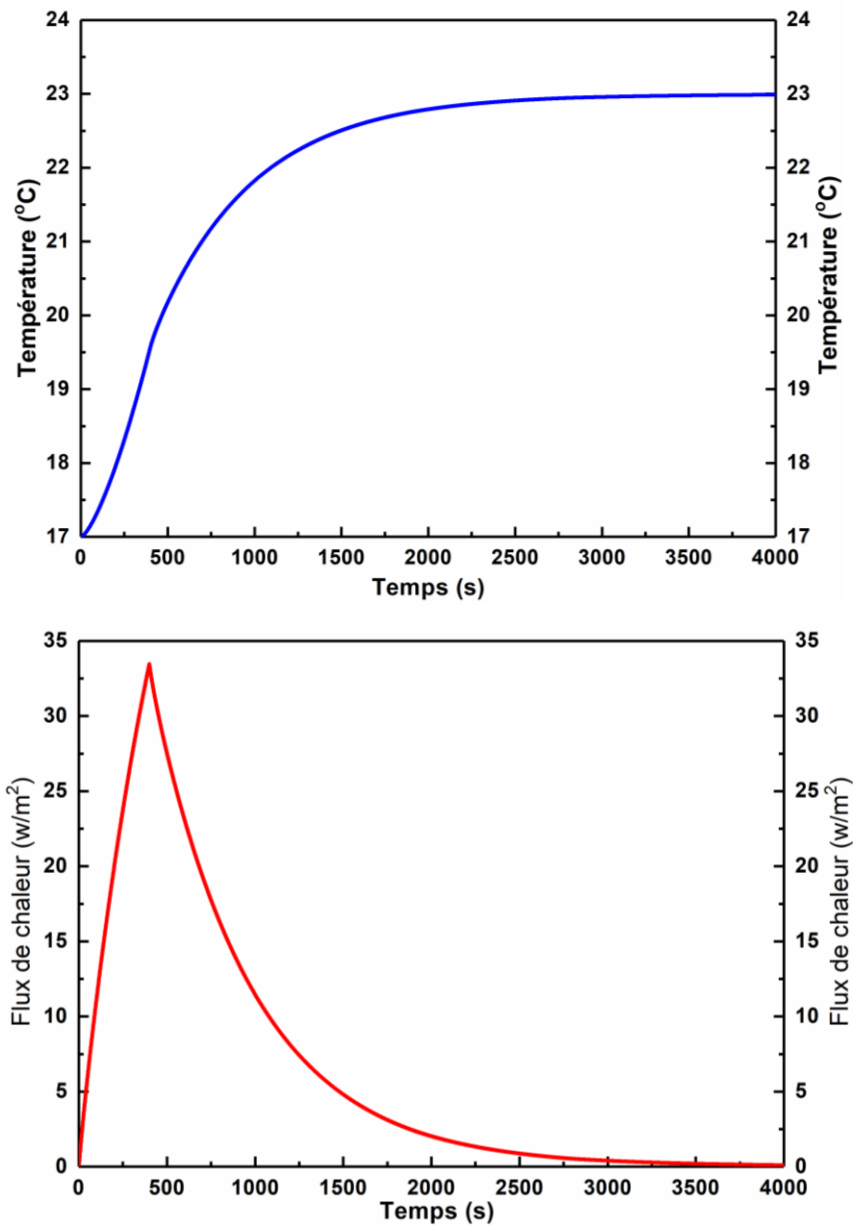


Figure IV. 2: Variation de la température et flux de chaleur dans la phase solide (17 °C – 23°C)

À la suite du stockage de chaleur dans l'état solide. Dans cette situation, on constate qu'il y a une variation de l'énergie interne du mélange. En conséquence, la paroi stocke une quantité de chaleur sensible dans la phase solide calculée par (l'équation IV.6) :

$$Q = \frac{1}{\rho e} \int_{T_{in}}^{T_f} \Delta\varphi dt \quad (\text{IV.6})$$

Chapitre IV Résultats et discussions

Les variations temporaires des températures et des flux de chaleur sont présentées dans la (figure IV.3). Les valeurs sont calculées sous une température ambiante supérieure à la température de fusion ($T_{\text{initiale}} = 29\text{ °C}$, $T_{\text{finale}} = 38\text{ °C}$). Les propriétés thermo physiques dans cette phase liquide sont constantes (Tableau IV.1).

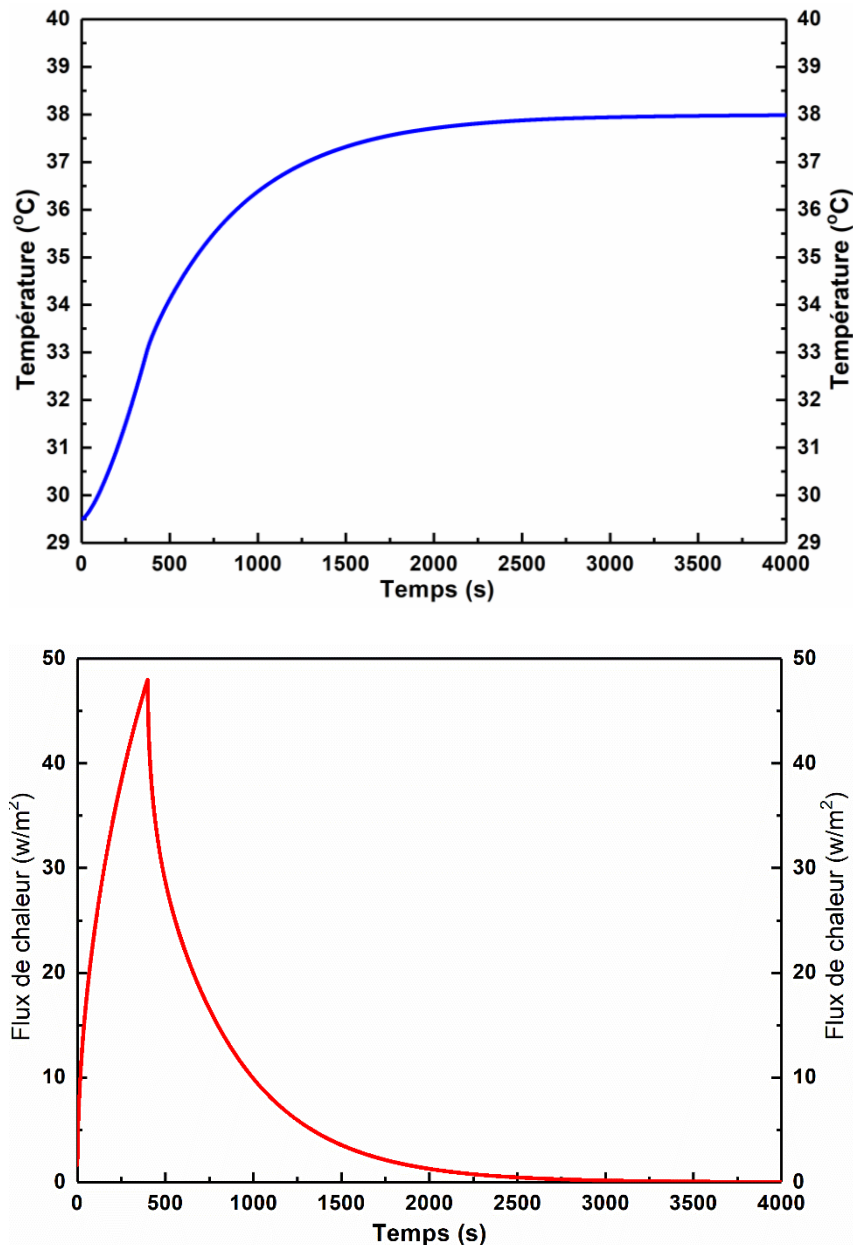


Figure IV. 3: Variation de la température et le flux de chaleur dans la phase liquide (29 °C – 38°C)

On remarque une augmentation rapide de la température du mélange, atteignant de 29°C à 38°C à un temps $t=2500$ s. En revanche, on constate une augmentation rapide du flux de chaleur des parois, atteignant environ 48(W/m²) à $t=500$ s. Suivi d'un déclin rapide ($\Delta\varphi = 0$) à $t = 2500$ s. Par conséquent, nous notons que le mur atteint la température d'équilibre après $t=2500$ s. Ainsi le mélange Il stocke de la chaleur sensible dans la phase liquide. à la

Chapitre IV Résultats et discussions

température (29°C - 38°C). La (figure IV.4) représente donc l'augmentation de température imposée et le flux de chaleur apporté au mélange MCP/plâtre pendant 2500s

Les variations temporaires des températures et des flux de chaleur sont présentées dans la (figure IV.4). Les valeurs sont calculées sous une température ambiante dans l'intervalle ($T_{\text{initiale}} = 17\text{ °C}$, $T_{\text{finale}} = 38\text{ °C}$). On remarque une augmentation rapide de la température du mélange, atteignant de 17°C à 38°C à un temps $t=1500\text{ s}$. En revanche, on constate une augmentation rapide du flux de chaleur des parois, atteignant environ $\varphi = 230\text{ (W/m}^2\text{)}$ à $t=500\text{s}$, Suivi d'une diminution rapide ($\Delta\varphi = 0$) à $t=1500\text{ s}$. Par conséquent, nous notons que le mur atteint la température d'équilibre après $t=1500\text{ s}$.

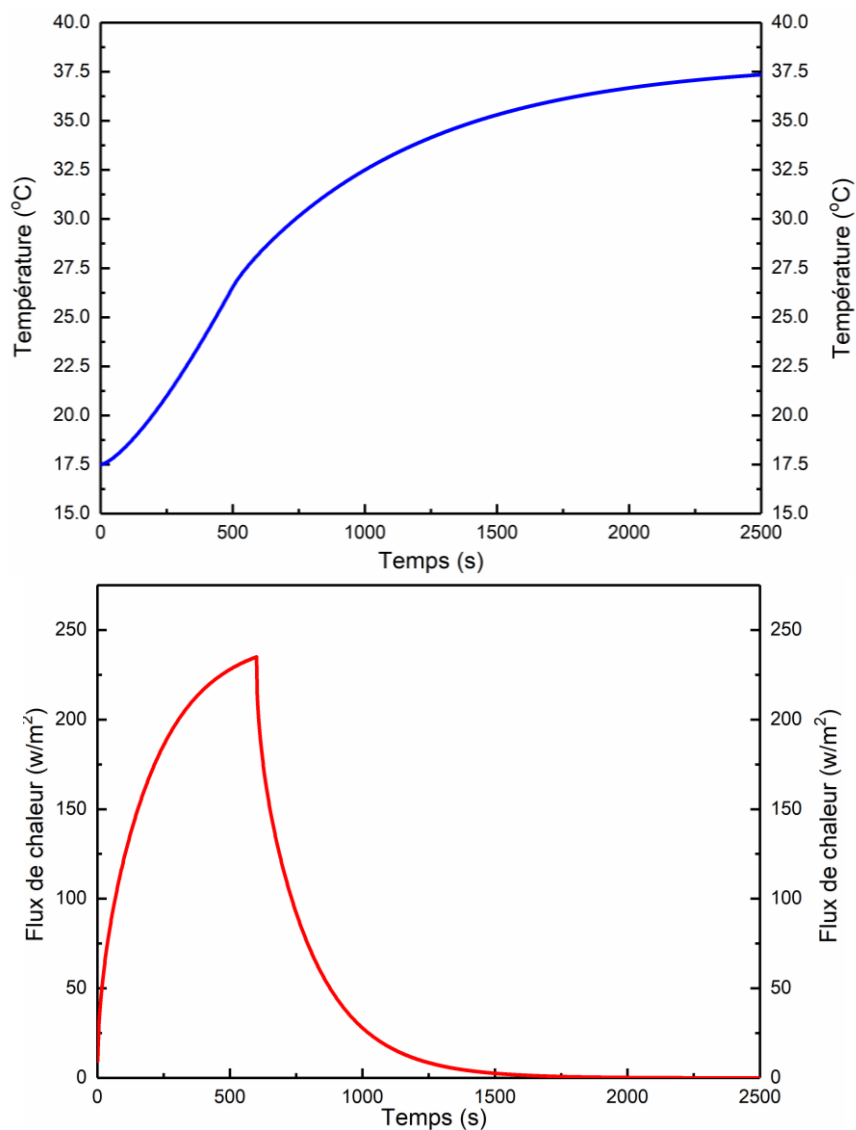
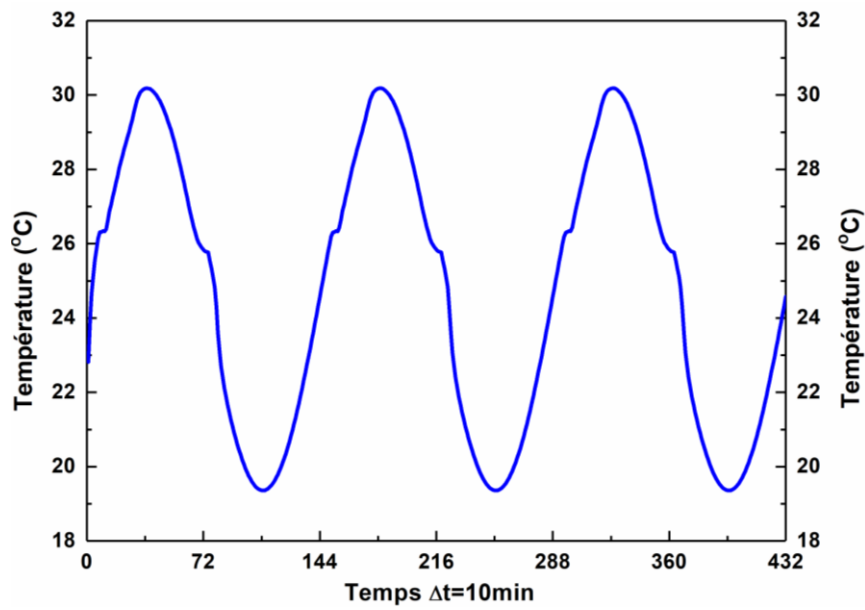


Figure IV. 4: Variation de la température et flux de chaleur dans la phase solide vers liquide (17 °C – 38°C)

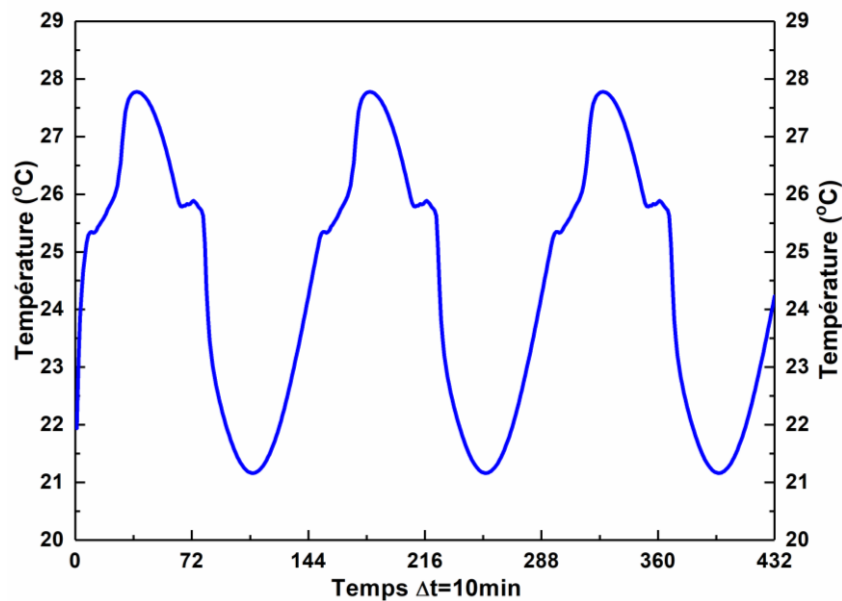
Chapitre IV Résultats et discussions

2^{ème} étude

La (figure IV.5) montre l'influence d'une variation sinusoïdale de la température intérieure et extérieure de la paroi opaque. Les flux de chaleur superficiels sont également pris en considération dans cette étude (figure IV.6) Les résultats obtenus correspondent aux trois jours consécutifs obéissant à un climat partiellement chaud [3].



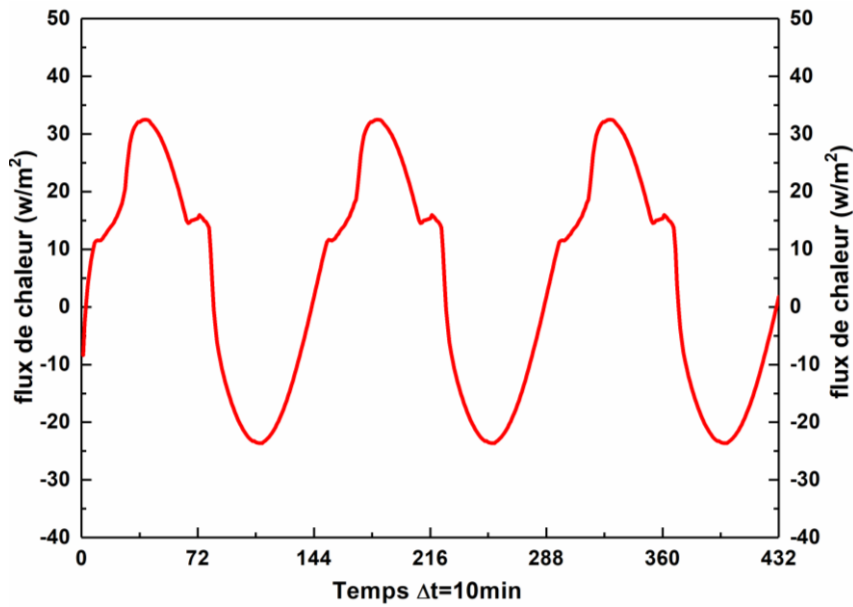
(a)



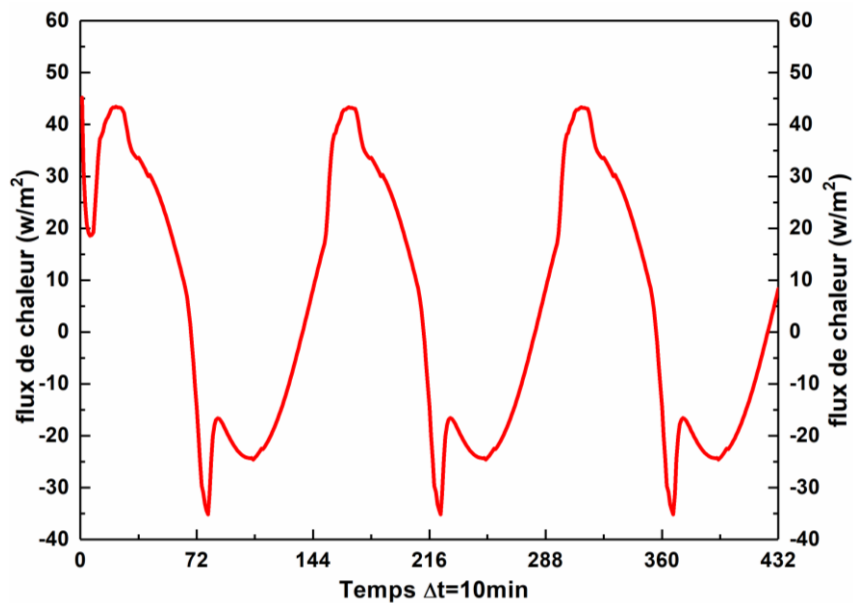
(b)

Figure IV. 5: Variation de températures superficielles à l'extérieur (a) et à l'intérieur (b)

Chapitre IV Résultats et discussions



(a)



(b)

Figure IV. 6: Variation de températures superficielles à l'extérieur (a) et à l'intérieur (b)

En faisant une analyse sur la variation des températures instantanées, on remarque que ces dernières fluctuent entre les valeurs maximales et minimales de façon qui se rapproche d'une forme périodique. Selon la (figure IV.5-a), les valeurs calculées de la température maximale et minimale de la surface extérieure de la paroi atteignent respectivement le 30,3 °C et 19,4 °C. Par ailleurs, les températures de la surface intérieure de la paroi, notamment sa valeur minimale, elle s'est fixée à 21,2 °C, tandis que la valeur maximale est de 27,7 °C. Toutes les courbes ont été fournies pour une période de 72 heures. Les résultats obtenus montrent un

Chapitre IV Résultats et discussions

écart intéressant en température entre les valeurs extrêmes (valeurs précédentes : minimales et maximales), il peut atteindre jusqu'à $\Delta T = 2.7$ °C. En ce qui concerne le flux de chaleur, l'écart est estimé à $\Delta Q = 11$ w/m². Les écarts enregistrés entre les valeurs de l'extérieur et l'intérieur sont dus donc à l'effet marquant du MCP. Les résultats obtenus permettent alors de conclure que l'intégration des MCPs dans l'enveloppe de bâtiment est importante pour améliorer les performances thermiques effectives du bâtiment dans des conditions météorologiques où la température est élevée. Ces matériaux *intelligents* permettent d'amortir les fluctuations des températures et des flux de chaleur, donc favorisent une meilleure stabilité de ces grandeurs physiques.

La figure IV.7 montre la variation de fraction liquide du mélange MCP-Pâtre en fonction de temps. On voit clairement que le processus de changement de phase solide-liquide est purement périodique. Ainsi on peut constater que la méthode enthalpie-porosité une interface relativement bien définie avec un peu de diffusion entre les états liquide-solide. En fin le mélange MCP-Plâtre change de façon rapide l'états liquide vers solide ou solide vers liquide.

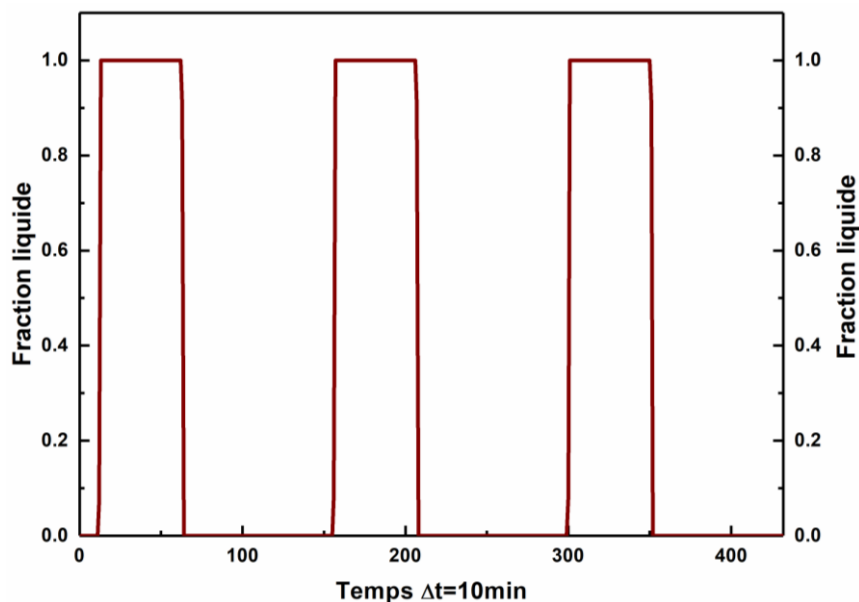


Figure IV.7: Variation d'un fraction liquide en fonction de temps.

IV.5. Conclusion

En conclusion, le modèle numérique développé sous ANSYS Fluent et basé sur la méthode enthalpie-porosité a démontré sa capacité d'étudier le processus du changement de phase solidification-fusion d'un mélange MCP-Plâtre dans le régime instationnaire basé sur la méthode des volumes finis. Les résultats ont démontré que le processus de changement de phase solidification-fusion est très influencé par le transfert thermique par conduction à cause du faible effet de la convection naturelle. L'influence des conditions initiales et aux limites sur le phénomène de stockage et déstockage de l'énergie thermique dans le mélange a été étudié.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail concerne la simulation et l'analyse numérique du comportement thermique lors de la fusion d'un matériau à changement de phase (paraffine) dans une paroi exposée à la température de part et d'autre de la paroi. La simulation a été développée à l'aide de Fluent ANSYS 16 et a été validée par des résultats obtenus précédemment. Les résultats obtenus ont permis de tirer les conclusions suivantes :

Grâce à nos simulations sont Ansys , nous avons découvert que les matériaux à changement de phase ont des performances thermo physiques uniques en termes de stockage de chaleur latente, de changement de phase sans changement perceptible de température, de transition réversible solide-liquide et même de chaleur spécifique et de densité élevées, de sorte que toutes ces caractéristiques dans les performances de ces matériaux attirent l'attention des constructeurs de murs et de tous les spécialistes de l'énergie.

En outre, il a été constaté qu'en général, les matériaux de construction à changement de phase lourd peuvent améliorer le confort thermique intérieur en atténuant les différences de température entre le jour et la nuit. Cependant, en utilisant la méthode de l'enthalpie poreuse pour modéliser le stockage de l'énergie thermique latente lorsque les conditions environnementales changent, il a été constaté que l'incorporation de matériaux à changement de phase MCP-Plâtre apparaît parfois comme une solution prometteuse et peut augmenter le confort thermique et donc améliorer l'efficacité énergétique du bâtiment.

Références bibliographiques

Références bibliographiques:

❖ Référence chapitre IV :

[1] Tutoriel fluent 19 <http://www.fluent.com>

[2] I.Y. Choi, S.H. Cho, J.T. Kim, Energy consumption characteristics of high-rise apartment buildings according to building shape and mixed-use development. *Energy and Buildings* 46, 2012, 123–131.

[3] M. Lachheb, Z. Younsi, H. Naji, M. Karkri, S. Ben Nasrallah, Thermal behavior of a hybrid PCM/plaster: A numerical and experimental investigation, *Applied Thermal Engineering*, 111, 2017, 49–59.