



UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA

Faculté de Technologie

Département des Energies renouvelables

Mémoire finale

Pour obtenir le diplôme « Master 2 »

SPECIALITE: Habitat Bioclimatique

Sous Le Thème :

**« MODELISATION NUMERIQUE D'UN MUR PASSIF INTEGRANT UN
MATERIAU A CHANGEMENT DE PHASE »**

Réalisée par :

M. Mohamed Essedik CHAA.

Sous la Direction:

Mr. Meziane mohamed cherif: Enseignant-Chercheur à l'université Saad DAHLEB.

Devant le jury :

Mr. Djafer semmar Professeur à l'université Saad DAHLEB

Mr. Abd el kader Hamid Professeur à l'université Saad DAHLEB

Année universitaire : 2017/2018

Table des matières

Introduction Générale	3
CHAPITRE I . ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	5
I.1 Introduction	5
I.2. Stockage de l'énergie thermique	5
I.2.1. Stockage par chaleur sensible	
I.2.2 Stockage par chaleur latente	6
I.3 Matériaux à changements de phase :	7
I.4. Conditionnement des MCP dans des applications de stockage	10
I.4.1.Macroencapsulation	10
I.4.2.Microencapsulation	11
I.5.Application des mcp dans le bâtiment	13
I.6. Différents types de murs	14
I.6.1. Mur capteur	15
I.6.2. Mur trombe	16
I.6.3. Mur trombe isolé	17
I.6.4.Mur solaire composite	18
I.6.5.Mur trombe intégrant des MCP macroencapsulées	18
I.6.6.Mur trombe intégrant des MCP microencapsulées	19
I.7. Conclusion	20
CHAPITRE II. MODELISATION MATHEMATIQUE	22
II.1Introduction	22
II.2 Problème de Stefan	22
II.3 Formulation Numérique du Problème de Stefan	25
II.3.a. La formulation forte	25
II.3.b La formulation faible	26
II.3.b.1 La capacité thermique apparente	27
II.3.b.2. La méthode enthalpique totale	27
II.3.b.3.. La méthode de terme source de la chaleur latente	28
II.4.Modélisation mathématique	29

II.4.1. Description du problème	29
II.4.2.Cas isotherme	30
II.4.2.a. Modèle mathématique	30
II.4.2.b. Discrétisation du problème	31
II.4.2.b.1 Méthode des volumes finis	31
II.4.2.b.2. Maillage	32
II.4.2.b.3. Discrétisation temporelle	32
II.5. Conclusion	32
CHAPITRE III : SIMULATION NUMERIQUE	35
III.1. résumé.....	35
III.2. introduction.....	35
III.2. etude numérique.....	38
III.3.1 modèle mathématique	38
III.3.2. Discrétisation du modèle mathématique	39
III.3.3. Solution analytique en 1D	41
III.3.4 Algorithme de calcul.....	42
III.3.5. validation numérique	44
III.4.1. Fusion de la glace test 1.....	47
III.4.1.1. Influence du pas de temps	47
III.4.2. Fusion du galium test 2	47
III.4.3. Fusion du mcp 27 test 3	49
III.4.4. Caractéristiques thermiques des plaques de plâtre / MCP avec variation de température extérieure sinusoïdale.....	51
III.5. résultats et discussion.....	53
III.6. mur platre sans mcp	53
III.7 mur platre-mcp	55
III.7.1. Effet de la variation de l'épaisseur de la couche de plâtre / mcp	56
III.8. Conclusion.....	59
III.9. Conclusion generale	60
III.10. Références.....	62

Table des figures

Chapitre I

Figure I.1. Groupement de matériaux à changements de phase	8
Figure I.2. Stockage d'énergie par chaleur latente et sensible : relation entre T et h	9
Figure I.3. Conditionnement de MCP en nodules	11
Figure I.4. Profil de la paraffine microencapsulé à différents instants de cycles thermiques	12
Figure I.5. Exemples d'encapsulation de MCP	13
Figure I.6. Intégration des MCP dans l'habitat	13
Figure I.7. Mur capteur.....	15
Figure I.8. Mur trombe	16
Figure I.9. Mur trombe isolé	17
Figure I.10. Mur trombe composite	18
Figure I.11. Mur trombe incorporant des MCP macroencapsulés	21
Figure I.12. Mur trombe incorporant des MCP microencapsulés	22

Chapitre II

Figure II.1. Solidification d'un matériau pur dans un milieu semi infini	24
Figure II.2. Solidification d'un matériau homogène dans un milieu semi infini	24
Figure II.3. Schéma de transformation de coordonnées d'un repère (x,y) à un repère (ξ,η)	25
Figure II.4. Variation de l'enthalpie pour : A) corps pur, B) un mélange	28
Figure II.5. Méthode des volumes finis : Maillage en 1D	32

Chapitre III

Figure 1 : Historique du déplacement de l'interface pour la fusion de la glace.....	46
Figure 2 : Profil de température au temps final pour test1 $t=17e+5s$	46
Figure 3 : Influence du pas de temps sur la précision du modèle.....	47
Figure 4 : Historique du déplacement de l'interface pour la fusion de galium.....	48
Figure 5: Profil de température au temps final pour test2.....	49
Figure 6 : Historique du déplacement de l'interface pour la fusion de mcp27.....	50
Figure 7 : Profile de température au temps final pour test3.....	51

Figure 8 : Schéma du problème étudié.....	53
Figure.9 : Variation temporelle des températures sur les faces d'un mur constitué en plâtre	54
Figure.10 : Variation temporelle des flux sur les faces d'un mur constitué en plâtre.....	55
Figure.11 : Variation temporelle des températures sur les faces d'un mur constitué en Plâtre/MCP (90/10).....	56
Figure.12 : Variation temporelle du flux thermique de la face interne pour différentes épaisseurs de la couche du plâtre/MCP (90/10).....	57
Figure.13 : Variation temporelle de la température de la face interne pour différentes épaisseurs de la couche du plâtre/MCP (90/10).....	58

LISTE DES TABLEAUX

Tableau.1: Propriétés physiques pour le test1.....	45
Tableau 2. Propriétés physiques pour le test 2.....	48
Tableau 3. Propriétés physiques pour le test3.....	49
Les propriétés thermophysiques des matériaux utilisés dans la construction des murs....	52

NOMENCLATURE

C_p	<i>Chaleur spécifique</i>	[J.Kg ⁻¹ K ⁻¹]
dV	<i>Elément volume</i>	[m ³]
f	<i>Fraction liquide</i>	
H	<i>Enthalpie volumique</i>	[J/m ³]
h	<i>Enthalpie sensible</i>	[J/Kg]
k	<i>Conductivité thermique</i>	
L	<i>Chaleur latente de fusion</i>	[W. m ⁻¹ K ⁻¹]
m	<i>Masse</i>	[J/Kg]
Q	<i>Quantité de chaleur</i>	[Kg]
S	<i>Surface</i>	[J/Kg]
T	<i>Température</i>	[m ²]
t	<i>Temps</i>	[K]
Δt	<i>Pas de temps</i>	[s]
ΔV	<i>Pas de volume</i>	[s]
x	<i>Cordonnée horizontale de l'espace</i>	[m ⁻³] [m]

Symbole Grecs

α	Diffusivité thermique	[m ² /s]
δ	Fonction de Dirac	[m ² /s]
ω	Coefficient de sous-	[Kg/m.s]
ν	relaxation	[Kg.m ⁻³]
μ	Viscosité cinématique	
ρ	Viscosité dynamique	
	Densité	

Indices et Exposants

a	Atmosphérique
F	Fusion
f	Final
out	Extérieur
in	Intérieur
i	Initial
k	Itération
n	Pas de temps
l	Phase liquide
s	Phase solide
Old	Pas de temps précédent
P	Point P
E,e	Point situé à l'est du point P
W,w	Point situé à l'ouest du point P
0	Condition initiale

.Introduction Générale

La gestion de l'énergie est devenue un défi majeur pour la plus part des autorités, le problème est de produire des gaz à effet de serre auxquels on affecte le réchauffement actuel de la planète, il s'agit de trouver une solution pour produire, consommer et contrôler nos ressources naturelles sans craindre leur épuisement et sans influencer l'équilibre thermique à la surface de la terre. L'intégration de l'énergie renouvelable, la consommation de l'énergie et le contrôle de la qualité de l'air intérieur représente le moyen le plus efficace afin de réduire la pollution et économiser l'énergie.

L'industrie du bâtiment, consomme environ 33% de l'énergie mondiale dans les pays développés [1]. Pour diminuer cette consommation, il est essentiel de construire des maisons en tenant compte le principe d'une conception fortement passive basée sur l'utilisation de l'énergie solaire. Afin d'obtenir ce type de bâtiments, les méthodes et les outils de la construction des systèmes énergétiques et thermiques associées ont évolué rapidement. Aussi nous nous sommes orienté vers l'étude du comportement des faces extérieures et intérieures de ces locaux, et de mettre en œuvre des procédés solaires afin de profiter au maximum du gain solaire en hiver et d'assurer le confort d'été .[2]

Depuis 1940, de nouveaux matériaux apparaissent sur le marché industriel appelé les matériaux à changement de phase (MCP) dont le but est de réduire la consommation énergétique et d'augmenter l'inertie thermique des bâtiments. Ces matériaux, utilisés dans divers domaines scientifiques et secteurs technologiques (bâtiment, biomatériaux, agroalimentaire, ainsi que dans les systèmes passifs de refroidissement de composants électroniques), permettent de profiter d'un gain et représentent une technologie favorable aussi bien sur le plan écologique qu'économique.

Le stockage et le déstockage de l'énergie dans des locaux intégrant des matériaux à changements de phase spécifiquement dans le cas solide-liquide connaît plusieurs intérêts de nos jours. Cette énergie est emmagasinée sous forme de chaleur latente grâce à la fusion des MCP, ensuite elle est restituée au milieu ambiant à leur solidification . Ce stockage par chaleur latente représente un processus très intéressant par rapport à celle par chaleur

sensible. Il permet de stocker une grande quantité d'énergie avec un bon rapport masse/volume et d'amortir les fluctuations de la température extérieure grâce à une forte quantité de chaleur échangée au cours des transferts thermiques des MCP, incorporées dans les parois des bâtiments. Les matériaux à changement de phase doivent être caractérisés par une température de fusion proche de la température de confort des occupants, afin de réduire les pertes thermiques pendant la période de stockage. Leur utilisation sert à diminuer l'épaisseur des parois dans le but de baisser les coûts tout en respectant les normes pour limiter les pertes thermiques.[3]

La conception des bâtiments en incorporant des MCP est freinée par la complexité des phénomènes de transfert thermiques qui se déroulent en leur sein. La première application d'un MCP décrite dans la littérature était leur utilisation pour le chauffage et la climatisation dans les bâtiments, par Telkes (1975) , et Lane (1983). Une étude plus globale sur l'intégration des MCP dans l'enveloppe est réalisée dans notre travail où nous avons choisi la paraffine comme MCP afin d'effectuer une étude numérique. Elle consiste à étudier le comportement thermique du processus de stockage/déstockage de l'énergie dans un mur solaire composite.[4] [5]

Notre mémoire est divisé en trois parties :

Chapitre I : Etude Bibliographique

I.1 Introduction

Au cours des dernières décennies, l'amélioration de l'efficacité énergétique dans les bâtiments est devenue difficile, l'utilisation des matériaux de construction traditionnelles reste insuffisante pour réduire les consommations énergétiques dans ce secteur. D'où la nécessité d'une recherche approfondie pour arriver à trouver de nouveaux matériaux caractérisés par une forte inertie, une capacité de stockage de l'énergie, permettant une isolation idéale des parois extérieures et d'améliorer le confort thermique des usagers [6].

Parmi les solutions qui ont été explorées, l'utilisation des matériaux à changements de phase permettent un stockage d'énergie plus important via la chaleur latente. Ensuite, il faut trouver des techniques d'intégration de ces matériaux dans l'enveloppe du bâtiment.

Ce chapitre a pour but de présenter une étude bibliographique des mécanismes de stockage de l'énergie thermique ainsi que des différents types de matériaux à changement de phase. Nous terminerons par la présentation du fonctionnement des murs solaires.[6]

I. 2.Stockage de l'énergie thermique

Le stockage de l'énergie est un phénomène qui permet une gestion optimale de l'énergie thermique. C'est l'un des moyens les plus adaptés à la modulation d'une source variable par exemple le soleil. L'énergie doit être stockée afin qu'elle puisse être disponible lorsqu'on en a besoin en créant une relation constante entre l'énergie demandée et l'énergie fournie. Il existe différents matériaux adaptés au stockage, ces matériaux accumulent le surplus d'énergie (période de la charge), et la produisent au moment où il y a un manque de chaleur (période de décharge). Les sources de chaleur proviennent principalement de la chaleur produite par certaines industries et du soleil. L'énergie thermique peut être stockée suite à l'élévation de la température qui modifie l'énergie interne du matériau [14].

De manière générale, le stockage d'énergie thermique existe sous deux différentes formes, il peut s'établir par une variation de température (stockage par chaleur sensible), ou par un changement de phase (stockage par chaleur latente).

I.2.1. Stockage par chaleur sensible

Le stockage par chaleur sensible est parmi les modes les plus anciens employé pour emmagasiner de l'énergie sur des durées plus longues en utilisant des sources de chaleur disponibles. Le stockage de chaleur sensible s'accompagne d'une élévation de la température en cédant ou en stockant de l'énergie, par contre la structure moléculaire du matériau de stockage ne change pas. L'énergie massique stockée est principalement faible à cause de la faible densité de stockage, ce qui nécessite des volumes de stockage importants [15]. Cette quantité d'énergie est directement proportionnelle au volume, à l'élévation de

température et à la capacité calorifique du matériau de stockage [22], elle s'écrit sous la forme suivante :

$$Q = m.c.\Delta T = m.c .(T_f- T_i) \quad \text{I.1}$$

Avec :

- m : La masse du matériau utilisé [kg] ;
- c : La capacité thermique du matériau utilisé [J/ (kg.K)] ;
- ΔT : La différence entre les températures finale T_f et initiale T_i du stockage [K].

L'énergie stockée par chaleur sensible connaît parfois des pertes thermiques importantes, cela est dû à la mauvaise isolation, ainsi que la longue durée des systèmes de stockage. Ce mode de stockage demande des systèmes plus volumineux, ce qui nécessite un bon choix du système et sa dimension afin d'accroître leurs performances [14].

D'après l'état physique du matériau de stockage, le stockage par chaleur sensible a deux variantes:

➤ **Le stockage par chaleur sensible avec un matériau liquide**

Parmi les matériaux liquides qui permettent un stockage par chaleur sensible, on trouve l'eau qui est caractérisé par sa plus grande capacité thermique massique par rapports aux autres corps. L'eau aussi est facilement disponible et n'est pas chère. D'un autre côté, l'eau demande une isolation très couteuse et un réservoir de stockage qui résiste aux fortes pressions, à cause de sa grande pression de vapeur lorsqu'on l'utilise dans des applications à haute température. Les huiles organiques ou les sels fondus sont aussi des liquides utilisables pour un stockage par chaleur sensible [15].

➤ **Le stockage par chaleur sensible avec un matériau solide**

Les pierres, les métaux, le béton, le sable et la brique sont les matériaux généralement utilisés pour le stockage thermique aux faibles et hautes températures parce qu'ils ne peuvent ni se congeler ni entrer en ébullition. Les pierres peuvent servir à stocker l'énergie solaire et ce stockage est bien adapté à l'utilisation dans le bâtiment. Ce type de stockage est utilisé pour des températures supérieures à 100°C en conjonction avec le chauffage solaire de l'air. Les pierres et les cailloux peuvent même être utilisés à des températures supérieures à 1000°C [15].

I.2.2. Stockage par chaleur latente

Le stockage par chaleur latente permet de stocker l'énergie sous la forme d'un changement d'état du matériau de stockage (fusion ou vaporisation). L'énergie stockée dépend alors de la chaleur latente, propriété intrinsèque du matériau, et de la quantité de matériau utilisée. Contrairement au stockage « sensible », ce type de stockage peut être

efficace pour des différences de températures très faibles [22]

L'énergie massique stockée s'écrit de la manière suivante

$$Q = m (h_f - h_i) = m \Delta h_f [\text{J}] \mathbf{1.2}$$

Où : Δh_f est l'enthalpie spécifique de fusion (chaleur latente de fusion)

Dans la suite, nous détaillerons les différents types des matériaux appelés matériaux à changements de phase, et permettant le stockage et la libération d'une grande quantité de chaleur grâce à leur chaleur latente.

I.3. Matériaux à changements de phase : [22]

Les MCP se sont connus comme des bons candidats pour la rénovation et la construction des bâtiments, ils permettent la réduction de la consommation d'énergie et l'amélioration du confort thermique d'été. Le choix du MCP adéquat exige une bonne considération de ses différentes propriétés. Ces matériaux sont classés en trois grandes familles comme le montre la Figure 1.8, auxquelles se rajoutent les MCP commerciaux.

- ❖ Les matériaux organiques : paraffines, polyalcools, matériaux non-paraffiniques.
- ❖ Les matériaux inorganiques : hydrates salins, sels, métaux, alliages.
- ❖ Les eutectiques : organiques et/ou inorganiques. [14]

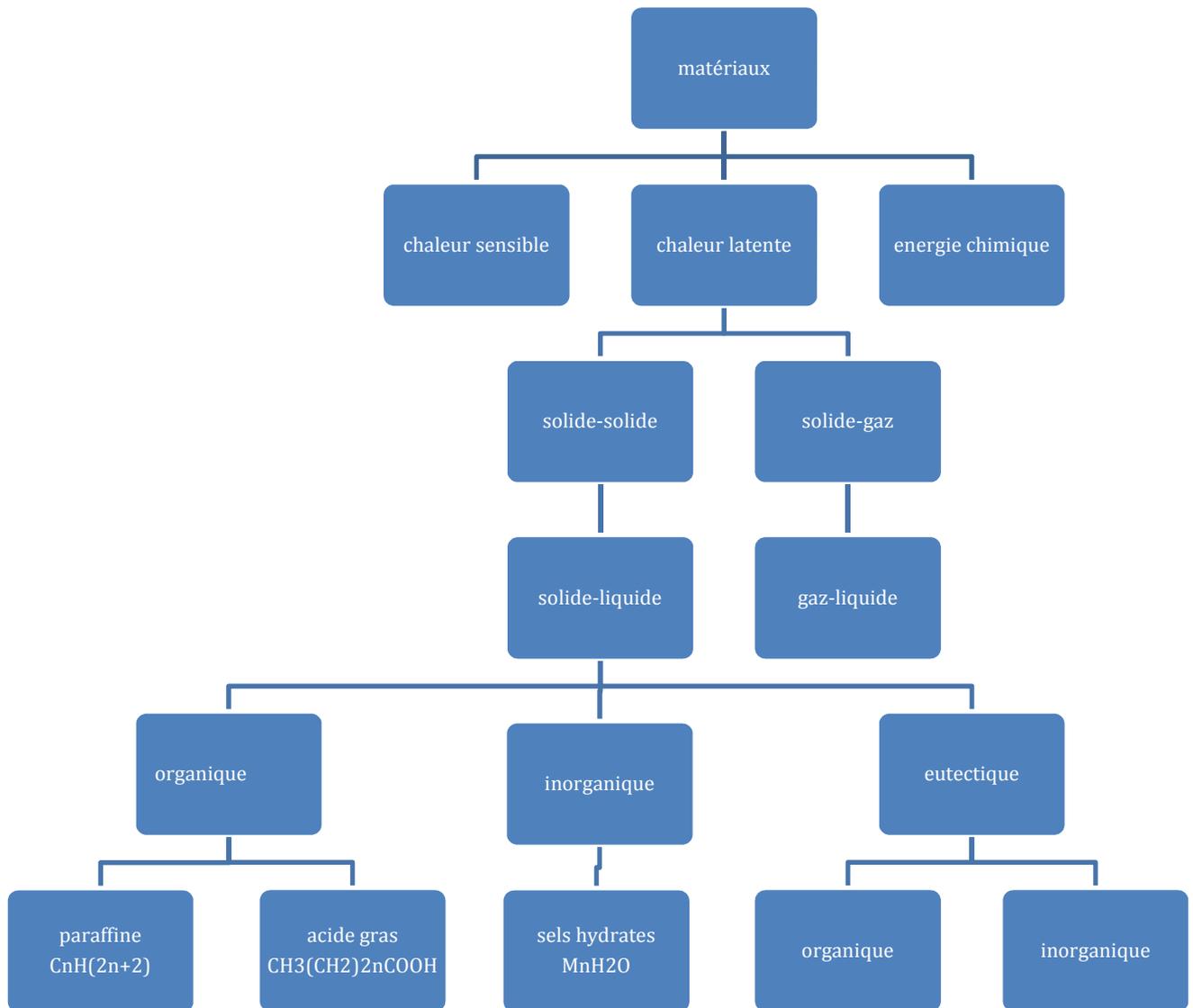


Figure I.1: Groupement de matériaux à changements de phase.

Les matériaux à changements de phase existent sous trois différentes formes : gaz, solide et liquide. Ces matériaux peuvent passer d'un état à un autre en variant leurs températures ou la pression du milieu. Le stockage par chaleur latente se fait suivant différents processus de changement de phase : solide-solide, solide-liquide, solide-gaz et liquide-gaz. Dans notre travail, nous allons nous intéresser seulement par le changement de phase solide-liquide dont la variation volumique est faible. Cette dernière facilite le stockage d'une grande énergie sous forme de chaleur latente avec des variations faibles de température. En premier lieu, un matériau à changement de phase accumule l'énergie sous forme de chaleur sensible et lorsque la température extérieure atteint sa température de

fusion, le matériau change d'état provoquant une rupture des liaisons entre les chaînes moléculaires constituant le matériau

La figure I.2 définit la relation entre l'enthalpie d'un matériau et l'élévation de la température lors d'un changement de phase par chaleur latente et sensible

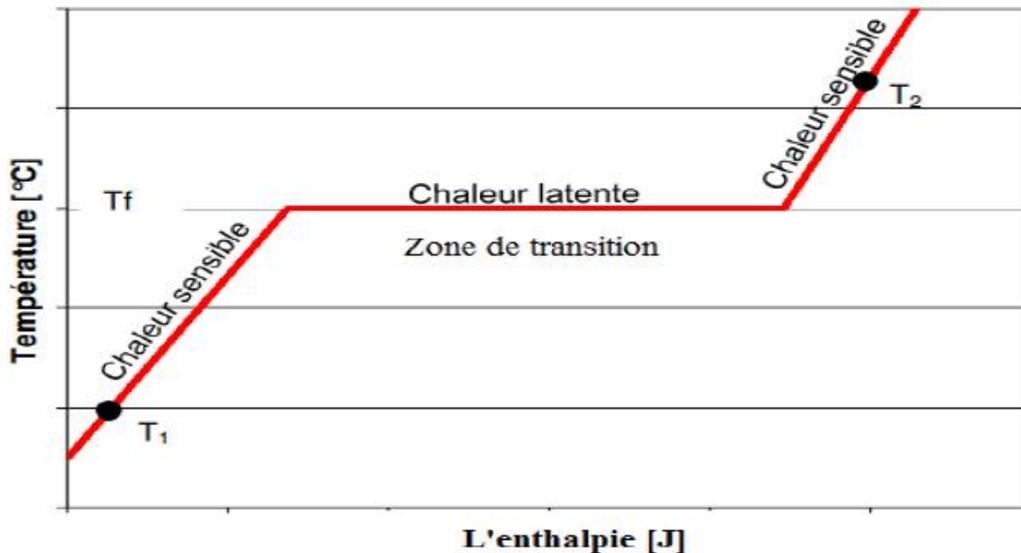


Figure I.2 : stockage d'énergie par chaleur latente et sensible : relation entre T et h
 D'après cette figure, on peut écrire l'énergie stockée sous la forme suivante : [17]

$$Q = m \left(\int_{T_1}^{T_f} c_s dT + L_f + \int_{T_f}^{T_2} c_l dT \right) [J]$$

Avec :

c_s et c_l représentent respectivement la chaleur massique spécifique de phase solide et liquide du matériau utilisé.

L_f : La capacité de stockage du matériau utilisé ;

dT : Différence entre températures moyennes finale et initiale du stockage ;

T_f : La température de fusion du matériau à changement de phase ;

T_1, T_2 représentent respectivement la température initiale/ finale du stockage.

Les principaux avantages du stockage par chaleur latente par rapport au stockage par chaleur sensible peuvent être cités comme suite :

- ❖ L'utilisation des MCP ayant une température de fusion appartenant à la gamme des températures de confort thermique des bâtiments (20 à 30 °C), permettent de stocker de 5 à 15 fois plus d'énergie par rapport aux autres matériaux de stockage sensible.
- ❖ La température de la surface de MCP reste proche de la valeur température de changement d'état lors d'un déstockage d'énergie thermique, cela montre La quantité d'énergie de la décharge ne dépend donc que de la température de l'environnement.
- ❖ Grace à la faible masse des MCP, le stockage par chaleur latente ne pose pas de problème de surchauffe saisonnière.

I.4. Conditionnement des MCP dans des applications de stockage

Afin d'éviter la fuite de la matière utilisées dans la construction des bâtiments lors de son changement de phase et améliorer les échanges thermiques avec le milieu environnant on utilise la technique d'encapsulation. Cette technique est largement utilisée dans différents domaines industriels, elle permet de limiter le contact entre la matière active utilisée et la matrice englobante, protéger les MCP de leur milieu environnant et faciliter l'incorporation de ces produits dans des matériaux comme le béton .Le matériau de conditionnement doit être compatible avec les MCP en lui assurant une bonne étanchéité et une stabilité lors du changement de phase . Il existe deux procédés d'encapsulation des MCP : la macro- encapsulation et la micro-encapsulation.[18] [19]

I.4.1 Macroencapsulation

La macroencapsulation consiste à conditionner les matériaux à changements de phase dans des conteneurs d'où leur volume est supérieur ou égal 1m.

La plupart du temps, on utilise des modules en plastique chimiquement neutres par rapport au MCP et au fluide caloporteur utilisé, mais on peut aussi utiliser des nodules ou des briques plastiques. Ces modules ont typiquement un diamètre de quelques centimètres, dont ils sont manufacturés dans trois diamètres (77-78 et 98 mm) pour des usages respectivement aux faibles températures de changement d'état (-3 à -15 °C), aux températures intermédiaires (-3 à 15 °C) et à la température de stockage de la glace (0 °C). La figure 1.3 présente deux différents formes des macrocapsules du mcp :parallélépipèdes

rectangles et sphérique.[22]

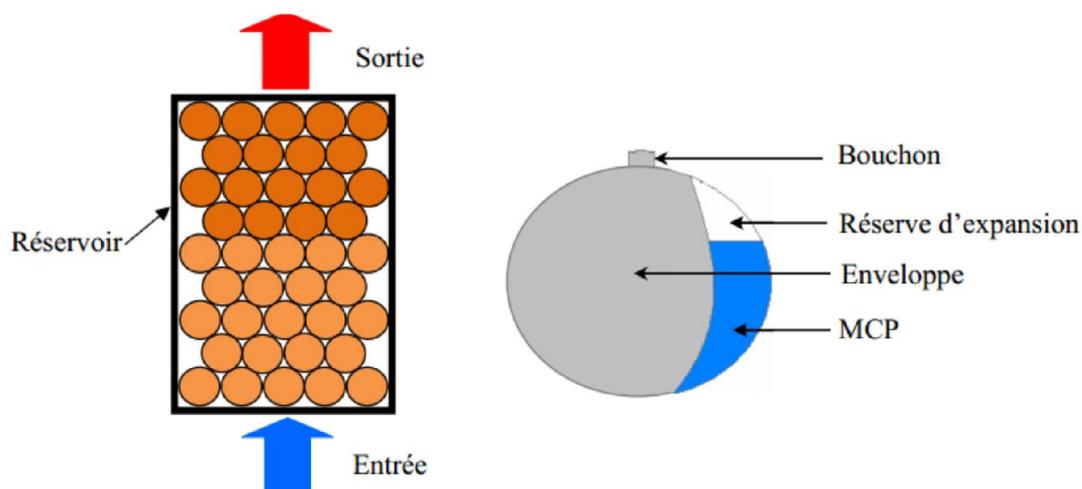


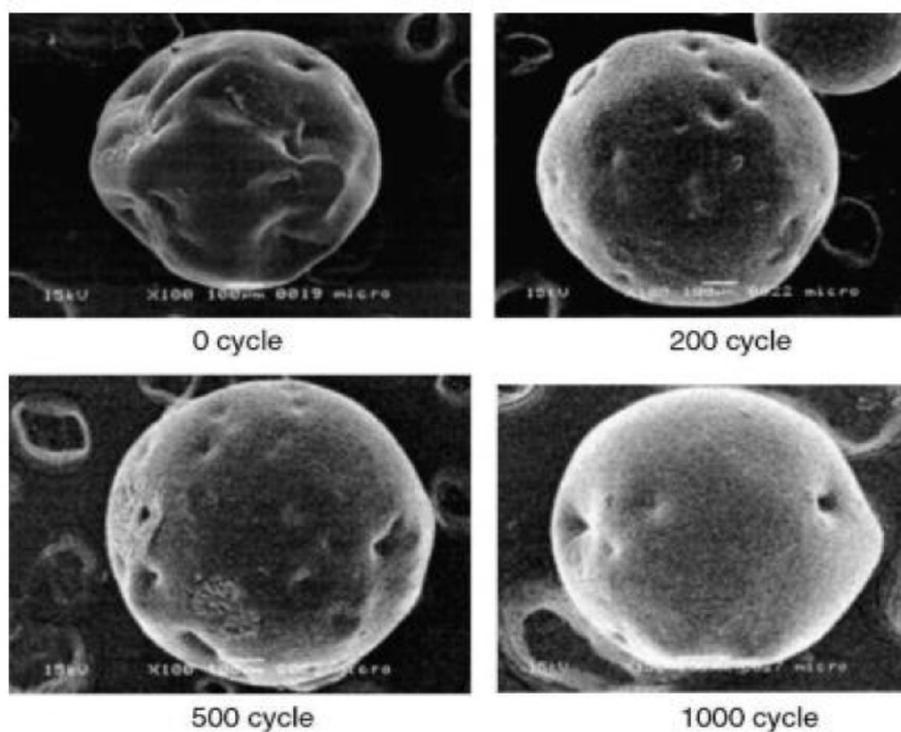
Figure I.3: Conditionnement de MCP en modules . [22]

I.4.2 Microencapsulation

La microencapsulation est une nouvelle technique simple et efficace, elle permet d'encapsuler la matière active dans coquille. La taille des particules micro-encapsulées varie de 1 à 1000 μm (seulement pour la paraffine à l'heure actuelle). Cette matière active doit être

encapsulée par un polymère étanche afin d'éviter sa fuite pendant la liquéfaction. Des polymères d'origine naturelle, hémisynthétique ou synthétique ont été utilisés dans l'industrie de microencapsulation[18]. Les MCP ainsi encapsulés peuvent être ensuite utilisés dans un système de stockage d'énergie latente dans lesquels ils sont apposés en amas ; le fluide vecteur de l'énergie à stocker (air ou eau) traverse alors cet amas. L'avantage de cette géométrie interne de stockeur en amas de MCP micro-encapsulés est qu'elle offre une grande surface d'échange (surface sphérique).

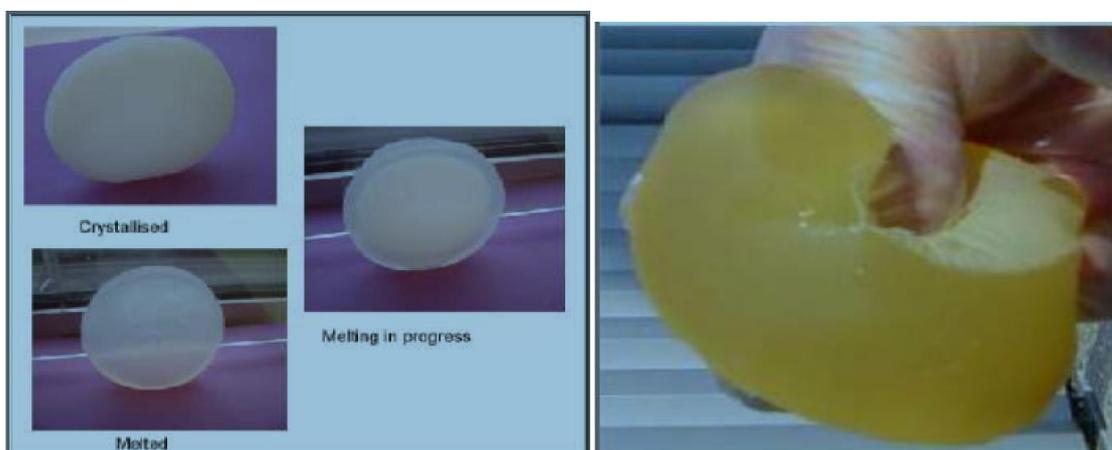
Des essais cycliques thermiques ont été effectués sur la paraffine, ont prouvé que ce type du MCP encapsulée garde toujours son profil géométrique et sa capacité de stockage d'énergie même après 1000 cycles, comme il est montré sur la Figure I.4 .[22]



[18]

Figure I.4: Profil de la paraffine micro encapsulé à différents instants de cycles thermiques

Les cycles thermiques, la surfusion, la dilatation et la ségrégation sont des problèmes ayant un impact sur l'efficacité du stockage des MCP, ces phénomènes sont présentés en annexe II.



MCP + gel polymérique



PCM (paraffine, sel...)+graphite

Figure I.5 : Exemples d'encapsulation de MCP [22]

I.5. application des mcp dans le bâtiment.

Le rôle primaire des bâtiments est de protéger les humains contre les variations

extrêmes dus climat. Une manière efficace pour réaliser des économies d'énergie dans le bâtiment est de mettre en œuvre des systèmes solaires passifs ou actifs (Figure I.6).

Dans ce qui suit, nous allons nous intéresser aux systèmes solaires passifs.

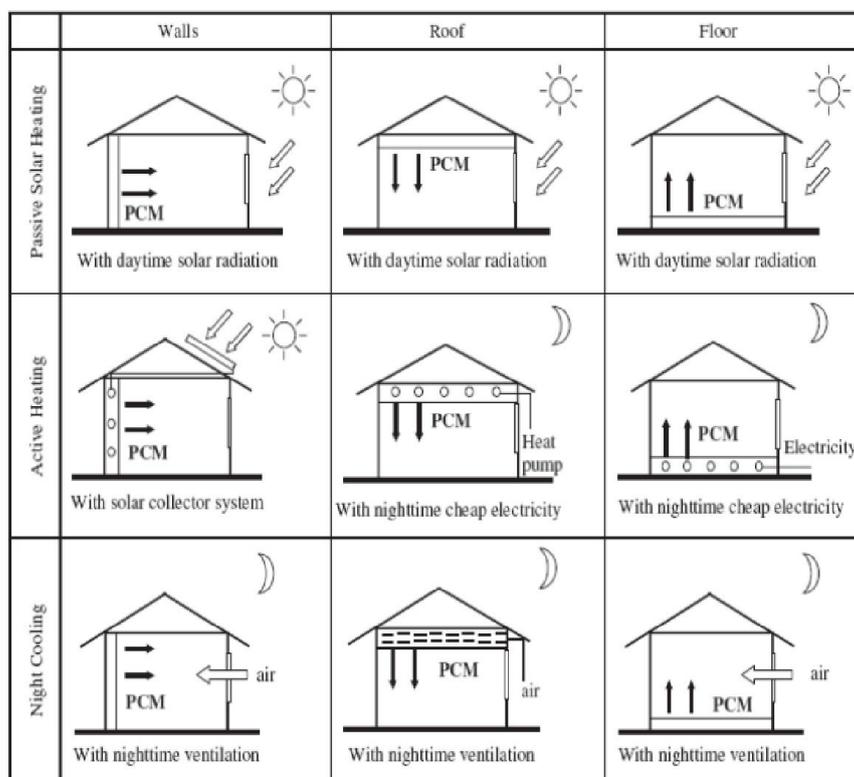


Figure I.6 : Intégration des MCP dans l'habitat

I.6. Les différents types de murs solaires

De façon générale, un mur est un élément capable de stocker, protéger et transporter la chaleur de l'extérieur vers l'intérieur d'un bâtiment. Concernant les murs dits solaires, Il en existe plusieurs configurations comme le mur Trombe classique, le mur isolé, le mur Trombe composite et le mur solaire composite intégrant des MCP macroencapsulés.

Ces différents configurations ont été conçues avec l'objectif de réduire les déperditions thermiques et par conséquent améliorer les performances énergétiques d'une pièce.

I.6.1 Mur capteur

Le mur capteur appelé aussi mur non ventilé (Figure I.5), permet d'évaluer le rayonnement solaire par effet de serre, en disposant un mur devant un mur en béton. Premièrement, l'énergie solaire est transmise par conduction à travers le mur, ensuite par rayonnement et par convection à l'intérieur de la pièce. [22]

Si l'épaisseur de ce mur en béton est de 40 cm, la transmission de cette énergie se fait avec un déphasage pouvant atteindre 11 heures. Ce qui justifie le chauffage de la pièce au moment où le soleil disparaît. Afin de limiter les pertes et de favoriser l'absorption de la chaleur reçue durant la journée, il est préférable de mettre une isolation nocturne par exemple application d'une peinture sombre à l'extérieur de la surface de la paroi stockeuse ou aussi mise en œuvre d'un double vitrage .

Malgré ces avantages, le mur capteur est moins utilisé dans les régions françaises à cause de l'impossibilité de toute gestion rapide et efficace des apports où il faut éviter de mettre en œuvre une isolation dans le but de conserver la performance du mur.

Le rendement d'un mur non ventilé dépend de son facteur d'absorption (rayonnement solaire), mais aussi de la résistance et de la capacité thermique de local.

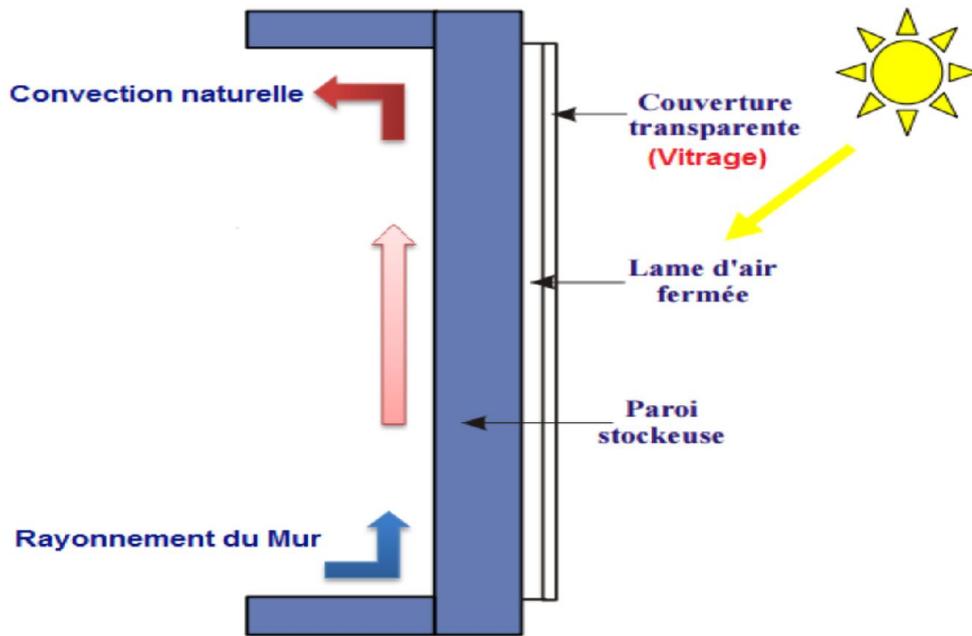


Figure I.7 : Mur capteur [11].

I.6.2 Mur trombe

Le mur trombe (Figure I.8) est une solution qui permet de réduire les besoins de chauffage. Il est constitué d'un vitrage suivi d'une lame d'air et d'un mur en béton. Il existe des ouvertures hautes et basses, qui sont réalisées dans le mur afin de créer une circulation d'air entre la lame d'air et l'air du local à chauffer. L'air chauffé dans la lame d'air pénètre par les ouvertures supérieures dans la pièce. Ce dernier se refroidit au contact de l'air du local. Une fois l'air rafraîchi, il revient par les ouïes basses dans la lame d'air. En l'absence de rayonnement solaire, le flux convectif s'inverse pouvant provoquer un refroidissement accéléré de la pièce. Pour éviter ce phénomène, il est conseillé de placer des clapets à fermeture manuelle ou automatique devant les ouvertures du mur, ces clapets sont refermés lorsqu'il n'y a pas de soleil.

Pour les murs trombes, le chauffage est réalisé par deux manières distinctes : par rayonnement, grâce au déphasage du mur, et par convection grâce à la circulation du mur. La surface totale des ouvertures supérieures et inférieures doit représenter 3 % de la surface totale du mur Trombe . [8]

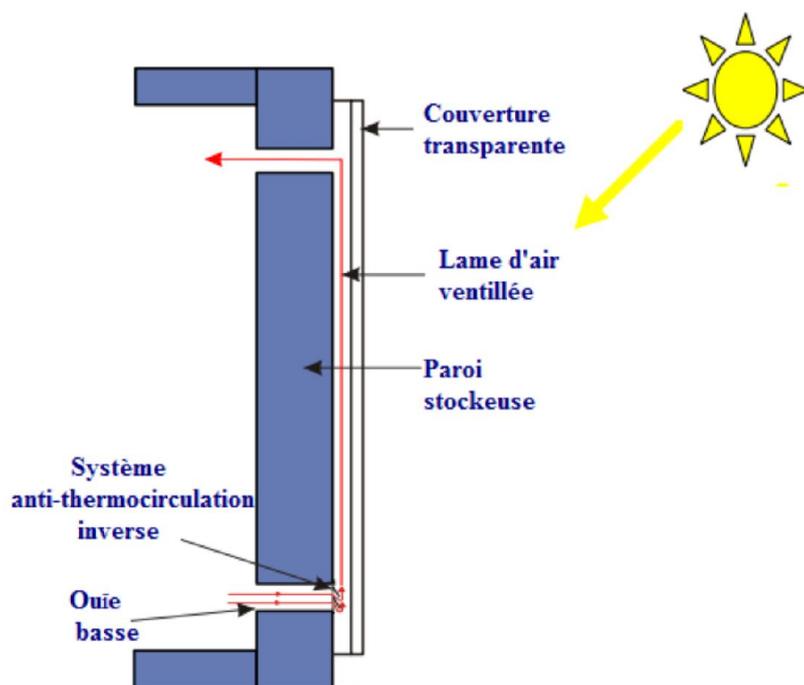


Figure I.8 : Mur trombe [11]

I.6.3 Mur trombe isolé

Pour le mur trombe isolé, en rajoute une couche d'isolant sur la face intérieure de sa paroi afin de diminuer les déperditions. Le contrôle de la circulation d'air dans la lame d'air ventilée permet de stopper rapidement tout apport si le besoin s'en fait sentir. La Figure I.9 schématise un mur trombe isolé. Par contre, pour conserver la performance du mur, il est conseillé de ne pas mettre en œuvre une isolation dans le cas des murs tombes. Cela est justifié du fait que les apports sont suffisants, aussi pour ne pas avoir une impression d'inconfort.

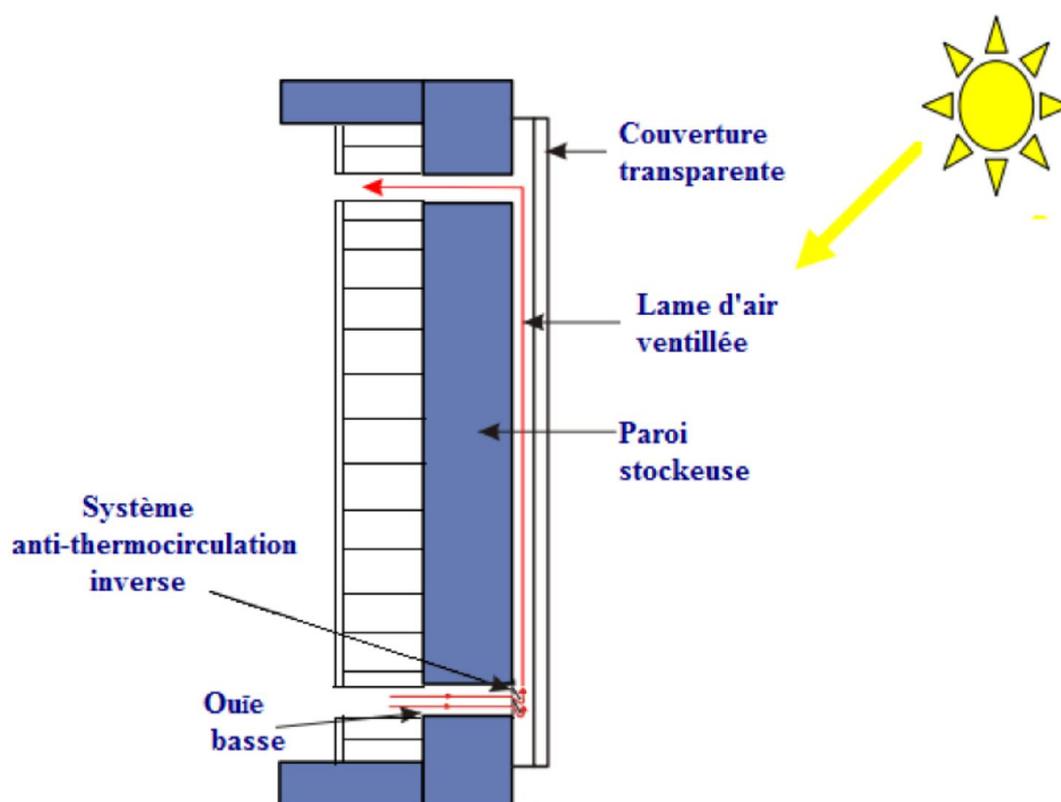


Figure I.9: Mur trombe isolé[11]

I.6.4 Mur solaire composite

Le mur trombe composite (Figure I.10) présente les mêmes avantages que le mur trombe isolé, en créant une lame d'air extérieur fermée. Ce type de mur permet d'augmenter la résistance thermique, de diminuer les infiltrations d'air froid par sa couverture extérieure, et d'effectuer un déstockage principalement convectif. Le mur trombe isolé est caractérisé

par un stockage et déstockage de l'énergie solaire qui dépendent des facteurs différents, comme la configuration du système, l'ensoleillement du site, son orientation, aussi le matériau constituant la masse stockeuse .

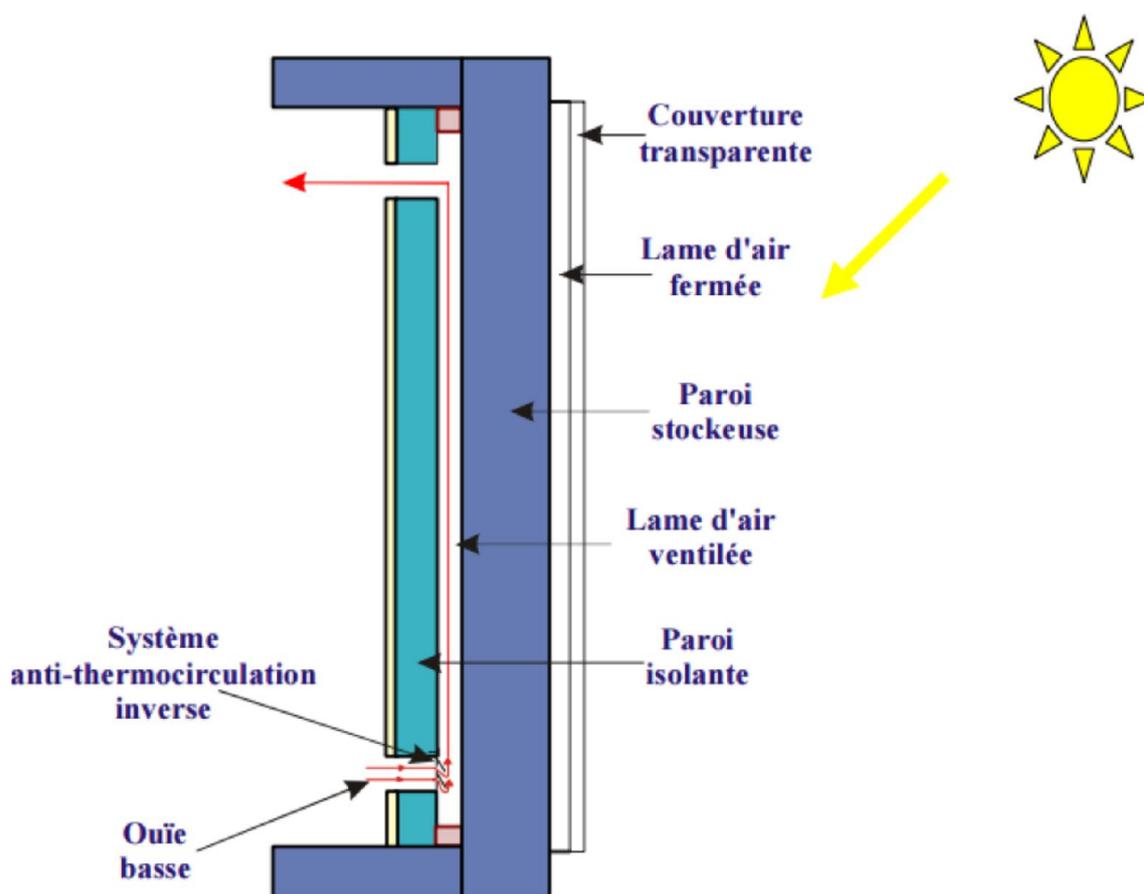


Figure I.10 : Mur trombe composite . [11]

I.6.5 Mur trombe intégrant des MCP macroencapsulés

Le mur trombe à base de MCP est constitué d'un mur en béton intégrant des matériaux à changements de phase macroencapsulés (Figure I.11). Ces matériaux de construction permettent un phénomène de production de changement de phase, assurent une gestion active de la température, et maintiennent la température de l'air dans les locaux à une valeur constante pendant la durée de changement de phase (point de fusion). L'avantage de ces produits consiste dans le fait qu'une faible quantité (volume et poids) est suffisante pour conférer aux matériaux un pouvoir de stockage/déstockage de la chaleur élevé.

L'objectif de cette intégration des MCP est d'augmenter l'inertie et d'avoir le meilleur rendement thermique de ce type des murs. Différents MCP ont été expérimentés, Askew (1978) a utilisé de la cire paraffine, Farouk et Gucero (1979) ont utilisé un mélange de sel de Gluber et de la cire sunocoP-116 [12]. Ces travaux ont affirmé que les murs trombe intégrant des matériaux à changements de phase nécessitent moins d'espace entre le mur et la couche de verre par rapport aux murs trombe de maçonnerie ordinaire. Ces murs sont plus légers que les murs trombe traditionnels. Des différents essais sur des blocs de béton-MCP fabriqués de manière ordinaire et en utilisant le paraffine comme MCP, ont montré que le rendement thermique de ces dernières ont la capacité de stockage d'énergie plus importantes que les autres MCP expérimentés.

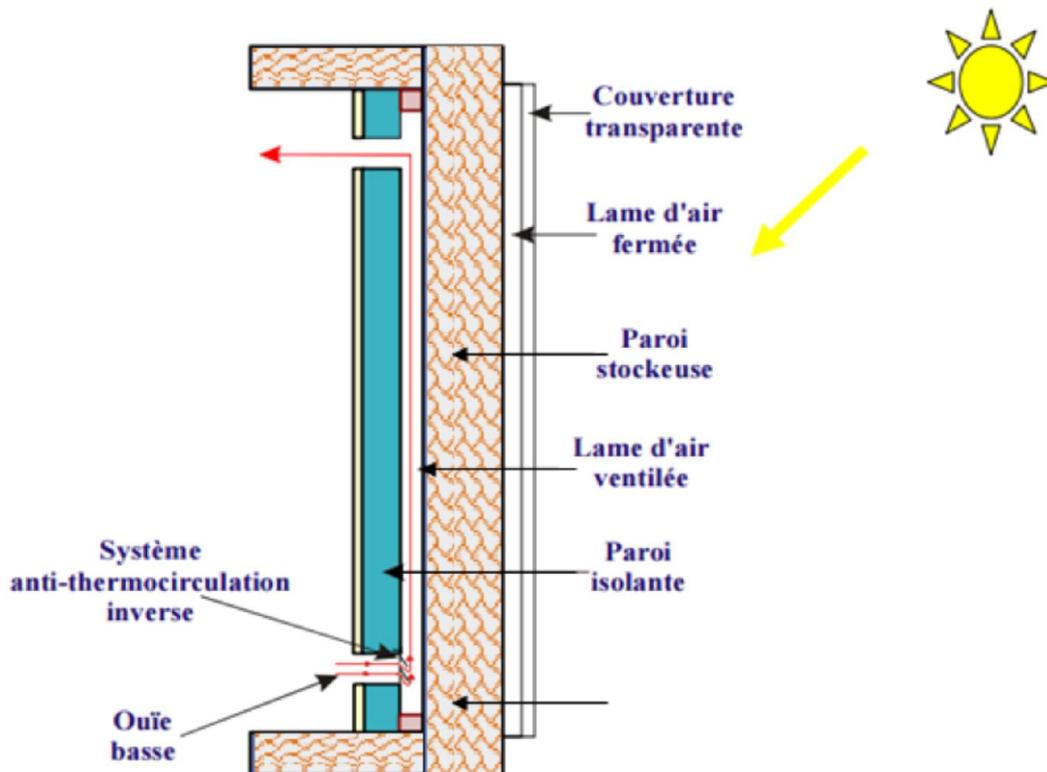


Figure I.11: Mur trombe incorporant mes MCP macroencapsulés.[11]

I.6.6 Mur trombe intégrant des MCP microencapsulées

Dans notre travail, nous sommes intéressées par le mur trombe composite intégrant des matériaux à changement de phase microencapsulés (Figure 1.12). Le but était de trouver un moyen pour comprendre le comportement de ce type de murs dans la construction des

bâtiments, en développant un programme qui permet de traiter ce problème numériquement, et en utilisant Fortran comme langage de programmation.

Les matériaux intégrant ce mur sont sous forme des billes microscopique de polymère, contiennent dans leur cœur de la paraffine. Sous l'effet de la chaleur ou du froid, la paraffine se fond ou se solidifie dans les microcapsules. La paraffine restitue la chaleur lorsque la température diminue et l'absorbe lorsque la température augmente. La chaleur accumulée où dissimulée dans le changement de phase est nommée la chaleur latente.

Le phénomène existant ici, est un processus réversible dans la plage de fusion de la paraffine. L'effet des MCP microencapsulés commence lorsque la température dans le local dépasse la température de fusion. La chaleur excédentaire diffuse dans le mur et s'accumule, ce qui a pour effet de neutraliser les pics de température et d'assurer une température plus régulière dans la pièce. Ces matériaux sont utilisés pour protéger les bâtiments contre la chaleur en été [13].

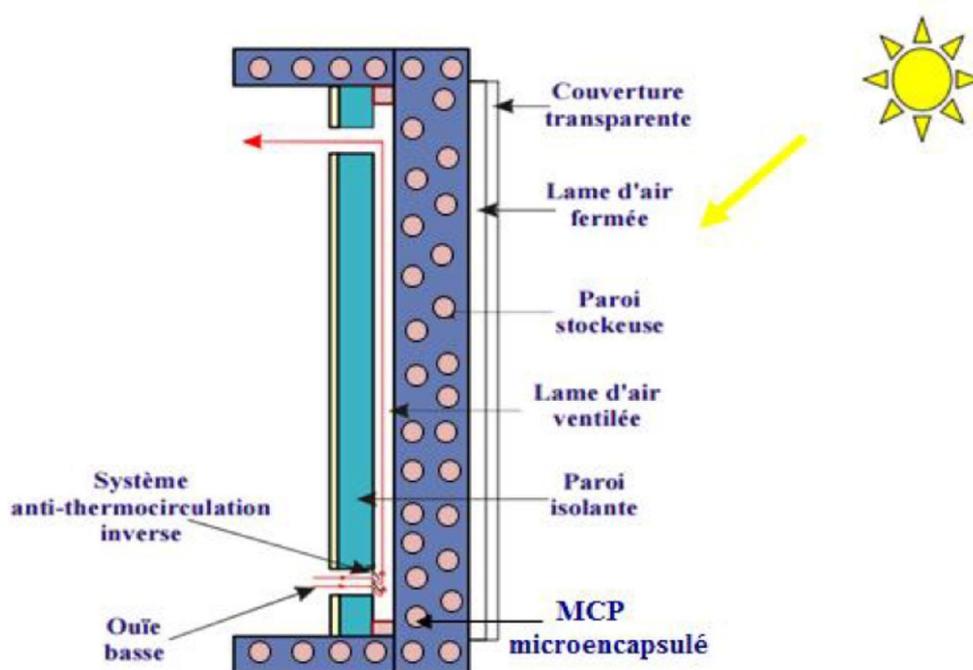


Figure I.12: Mur trombe incorporant des MCP microencapsulés.

Le stockage de la chaleur dans les 6 murs présentés ci-dessus se fait à travers deux phénomènes différents. Pour les murs capteur, trombe, trombe isolée et solaire composite,

le système de stockage dans la paroi stockeuse est un stockage par chaleur sensible. Par contre, pour les deux autres murs, trombe intégrant des matériaux à changements de phase microencapsulés et macroencapsulés, l'énergie est stockée par chaleur latente. Ce dernier type de stockage permet de bénéficier d'un mur, caractérisé par une bonne capacité de stockage thermique, stocker une grande quantité de chaleur dans un volume réduit et avoir une forte inertie thermique. Ce stockage est créé à cause de l'intégration des matériaux à changements de phase. [22]

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude bibliographique sur les matériaux à changements de phase ainsi que l'effet de l'intégration des MCP dans les matériaux de construction traditionnels. Dans un premier temps nous avons décrit les différents modes de stockage de l'énergie par chaleur latente et par chaleur sensible en précisant les avantages de chaque type. Ensuite les différents types de matériaux à changement de phase ont été décrits avec leurs avantages, et leurs inconvénients.

Le problème qui se pose aujourd'hui au niveau de la construction des bâtiments est d'assurer un bon niveau de confort thermique en optimisant les chutes et les montées de température à l'intérieur d'une pièce grâce à l'augmentation de l'inertie thermique dans les bâtiments à structure légère. Cela justifie l'importance et la nécessité de notre travail, qui a pour but de comprendre le comportement de mortier incorporant des microcapsules des matériaux à changement de phase (la paraffine) afin de mieux appréhender le comportement thermique et mécanique du mortier modifié avec ces matériaux.

Par la suite, Nous allons essayer de réaliser une modélisation numérique d'un mur solaire composite, pour le cas isotherme (changement de phase à température constante) ainsi que sa mise en œuvre sur ordinateur. Ce qui nous permettra de d'évaluer Les avantages de ce type de mur qui sont censés assurer le contrôle de la quasi-totalité des apports et leur déphasage par rapport aux apports solaires directs [22].

CHAPITRE II :MODELISATION MATEMATIQUE

II.1. Introduction

Lors d'un changement de phase solide-liquide d'un matériau, il existe une interface mobile (solide /liquide), où le traitement de la dynamique de cette dernière présente une difficulté majeure dans la modélisation numérique de ces phénomènes [20]. Stefan a été le premier qui a étudié ce type de problème non linéaire, l'objectif était de déterminer la position et la forme irrégulière de cette interface qui dépendent du taux de transfert de chaleur au sein du matériau à fondre. La convection naturelle augmente le transfert de chaleur et joue un rôle important et diffère dans le processus de fusion et solidification [21]. La formulation mathématique à résoudre est complexe à cause de l'exigence d'un traitement du couplage entre les équations de Navier-Stokes dans le liquide et de Fourier dans le solide.

Dans ce chapitre, nous avons défini le modèle mathématique pour le cas isotherme (changement de phase à température constante) ainsi que sa mise en œuvre sur ordinateur en utilisant le langage de programmation Fortran [45],

Tout d'abord, nous avons commencé par une description du problème de Stefan, ensuite les différentes méthodes de résolution numérique dites « méthodes enthalpiques » et les algorithmes selon « la méthode des volumes finis et la méthode TDMA (à décrire) » qui facilitent le traitement de ce problème [44]

II.2. Problème de Stefan

Le problème de la frontière mobile dénommé aussi le problème de Stefan, est le modèle le plus simple des phénomènes de changements de phase [20]. C'est un problème avec des conditions aux limites en mouvement. Il représente la base sur laquelle d'autres problèmes ont été analysés afin de déterminer le champ de température et la position de l'interface qui sont inconnues.

Il existe des solutions analytiques qui permettent la résolution du problème de Stefan. Ces solutions sont utilisées dans la validation des solutions analytiques obtenues pour des problèmes semblables .La solution exacte nommée solution de Neumann est le modèle le

plus utilisée et connue pour la modélisation numérique du changement de phase solide-liquide ou liquide-solide dans un domaine semi fini. Ce modèle définit la solution analytique de solidification ou de fusion.

Dans notre travail, nous sommes intéressés par les solutions numériques dont il existe deux formulations mathématiques. La première formulation est basée sur une méthode dite enthalpique, dans laquelle les équations de conservation sont écrites dans tout le domaine de calcul sans prise en compte de la position de l'interface.

La deuxième méthode est basée sur la température, où les équations de conservations sont définies dans chaque phase (solide/liquide) et sont couplées par les conditions aux limites à l'interface.

La conduction est le seul mode de transfert à déterminer, le domaine est caractérisé par un point de transition avec une imposition d'une température constante aux interfaces, les propriétés thermo-physiques de la substance vont varier lentement et le comportement d'un matériau au cours de la fusion ou la solidification est totalement différent dans chacun des phases [23].

La Figure II.1 représente la solidification d'un matériau pur dans un domaine semi fini, la phase solide est séparée de la phase liquide par une interface bien déterminée. Le changement de phase se définit à une température constante T_f

. La conduction est le seul mode de transfert dominant dans ce cas, citant que la convection et le rayonnement peuvent jouer un rôle important pour certains d'autres [22].

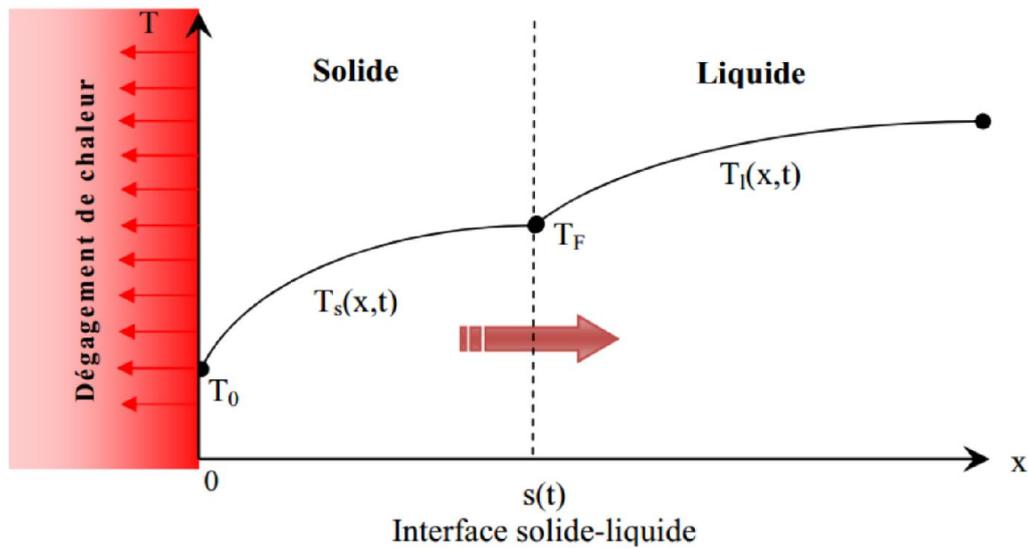


Figure II.1 : Solidification d'un matériau pur dans un milieu semi infini [22].

La Figure II.2 schématise la solidification d'une substance à plusieurs composants, la chaleur absorbée (dégagée) est sous forme d'une chaleur latente sur une plage de température permettant la caractérisation thermique et les propriétés des constituants du produit.

On observe sur la figure l'existence d'une zone interfaciale, où la phase solide et la phase liquide coexistent [20]. Les constantes T_l et T_s représentent respectivement la température à l'interface solide/mélange et la température à l'interface liquide/mélange.

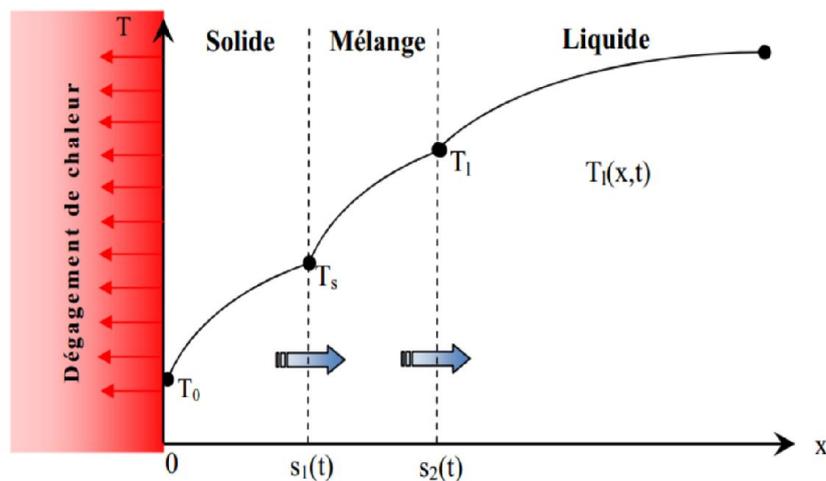


Figure II.2 : Solidification d'un matériau homogène dans un milieu semi infini [22].

II.3. Formulation Numérique du Problème de Stefan

Les formulations numériques qui permettent le traitement des problèmes de changement de phase en présence de la convection naturelle sont divisées en deux catégories : la formulation forte et la formulation faible.

II.3.a. La formulation forte

Cette formulation repose sur l'écriture de l'équation de diffusion de l'énergie par conduction dans les deux phases (solide et liquide), suivie par la discrétisation de l'équation du bilan d'énergie à l'interface solide-liquide, qui sert à mettre un accord entre le déplacement du front et les équations de conservation de 'énergie dans chacune des phases. Dans le cas monodimensionnel, les équations aux dérivées partielles déterminant le transfert thermique dans les deux phases s'écrivent [22, 24]:

$$\text{Dans la phase liquide : } \rho_l c_l \frac{\delta T_l}{\delta t} = \nabla(k_l \vec{\nabla} T_l) T > T_f \quad \text{II.1}$$

$$\text{Dans la phase solide : } \rho_s c_s \frac{\delta T_s}{\delta t} = \nabla(k_s \vec{\nabla} T_s) T < T_f \quad \text{II.2}$$

$$\text{A l'interface solide-liquide : } k_s \overrightarrow{\text{grad}} T_s + k_l \overrightarrow{\text{grad}} T_l = \rho L \vec{\nabla} \vec{n} \quad \text{II.3}$$

$$\text{Avec : } T_l = T_s = T_f \quad \text{II.4}$$

Pour résoudre ce système d'équation non linéaire de type transport-diffusion, il est nécessaire de faire des simulations numériques où on effectue une série de calcul sur ordinateur en reproduisant notre phénomène physique étudié. Cette simulation numérique provoque une transformation de coordonnées d'un repère (x,y) à un autre repère (ξ,η), où l'interface solide- liquide est immobile. Le maillage obtenu est un maillage rectangulaire et fixe (Figure II.3) [25].

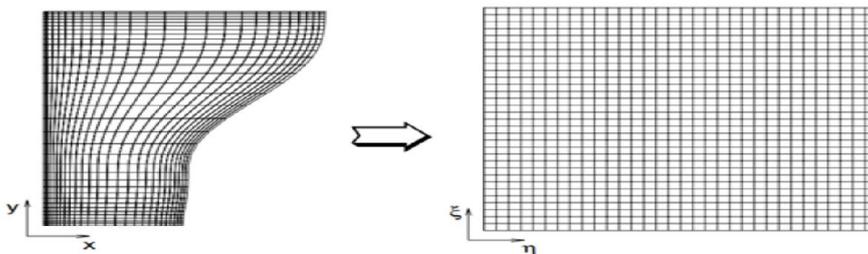


Figure II.3 : Schéma de transformation de coordonnées d'un repère (x,y) à un repère (ξ,η)[25].

L'objectif de la méthode à maillage fixe est que le pas d'espace reste fixe, par contre le pas de temps varie à chaque itération en raison que la frontière de changement de phase devrait être capable de se déplacer de nœud à nœud quel que soit le pas de temps recalculé. La méthode à maillage déformable ou curviligne offrent certains avantages dans le cas de la résolution d'un problème où il existe un seul front de fusion et restera inaptes de simuler une fusion complète lorsque on retrouve plusieurs front se développent.

II.3.b La formulation faible

Cette formulation expose trois méthodes de solutions différentes nommées les méthodes enthalpiques. Ces méthodes nécessitent un maillage fixe cela signifie que le pas d'espace est constant en fonction de temps, aussi l'interface de changement de phase peut se déplacer à l'intérieur du maillage. L'énergie absorbée ou libérée par chaleur latente est isolée par le biais d'un terme source dans l'équation de conservation de l'énergie.

L'importance de cette formulation se manifeste dans la facilité de sa mise en place dans des codes de calculs (CFD), car le système d'équation aux dérivées partielles non linéaires est remplacé par des équations différentielles dans l'objectif est l'application de l'équation de transfert de chaleur par conduction, quel que soit le type de matériau, homogène ou pur. Ainsi, le problème est défini par une seule équation [22, 26]:

$$\rho \frac{\delta h}{\delta t} = \nabla(k \nabla T) \quad \text{II.5}$$

Avec : h, l'enthalpie du matériau défini par la relation suivante :

$$\mathbf{H} = \int_{T_f}^T c dT \quad \text{II.6}$$

Avec :

$$c(T) = \begin{cases} c_s & \text{si } T > T_f \\ c_l + \delta(T_f)L & \text{si } T < T_f \end{cases}$$

$\delta(T_f)$ est le coefficient de Dirac.

De nombreux travaux ont été réalisés afin de développer cette méthode enthalpique, Voller et Cross [27] ont réussi à obtenir un bon lien entre la solution obtenue par la méthode des volumes finis associée au modèle enthalpique pour le problème de Stefan et la solution analytique. La méthode facilite la progression du front de solidification et l'évolution de la

température. D'autre part, Voller et al.[28] ont exposé une formulation générale de type enthalpique appuyer sur des termes sources pour modéliser l'évolution de la chaleur latente et de l'écoulement dans la zone de transition solide-liquide.

La méthode faible contient la méthode de l'enthalpie totale, la méthode de capacité thermique apparente et la méthode de terme source de chaleur latente. Ces méthodes sont employées pour résoudre des problèmes multidimensionnels avec changement dans une plage de température ou de phase isotherme. Dans notre travail, nous avons choisi d'utiliser cette formulation enthalpique où ces trois méthodes associées vont être détaillées.

II.3.b.1. La capacité thermique apparente

Dans cette méthode, on représente la variation de l'enthalpie en fonction de la température comme une variation finie de la capacité thermique apparente où le dégagement ou l'absorption de la chaleur latente est prise en compte:

$$(dh /dt) =c_{app}.(dT /dt) \quad \text{II.8}$$

Selon la figure II.4 qui représente l'enthalpie spécifique en fonction de la température pour un corps pur A et pour un mélange B. le changement d'état d'un matériau pur se fait à température constante où on remarque une discontinuité due au changement de phase. L'énergie sera stockée par chaleur latente jusqu'à la transformation complète d'un état à un autre. Généralement, le matériau continue à recevoir de l'énergie au cours du temps, ce surplus d'énergie sera alors stocké sous forme de chaleur sensible [16]. Par contre pour le corps B, nous avons remarqué que le changement de phase se fait dans une plage de température, où $T_f \in [T_s, T_l]$ et T_s et T_l représentent respectivement la température à l'interface solide/solide-liquide, et solide-liquide/liquide. La variation d'enthalpie ne représente plus de discontinuité.

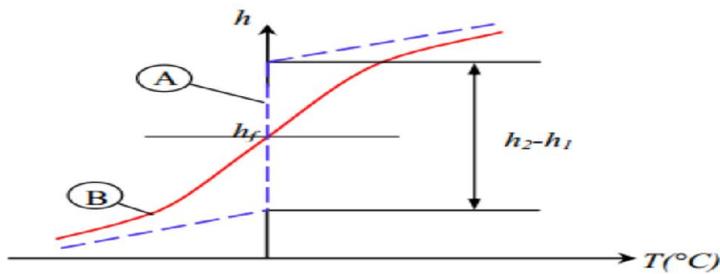


Figure II.4: Variation de l'enthalpie pour : A) corps pur, B) un mélange [18].

II.3.b.2. La méthode enthalpique totale :

La méthode enthalpique permet la détermination du champ de température sans tenir compte de la connaissance de la progression du front de solidification dans le temps. Le domaine d'études est constitué de trois régions : une région représentant la phase liquide, celle qui correspond à la phase solide et une région intermédiaire appelée une zone pâteuse (existence de la phase solide et liquide).

Le principe de cette méthode exige à utiliser une seule variable inconnue H , enthalpie totale pour les deux phases solide et liquide et décrivant le système d'équation en une seule équation de transfert thermique. La fonction d'enthalpie H illustre la somme de l'enthalpie latente et l'enthalpie sensible [30].

II.3.b.3. La méthode de terme source de la chaleur latente :

Cette troisième méthode consiste à résoudre le problème thermique en introduisant un terme source pour tenir compte des phénomènes de changements de phases. Voller [31] a exposé une méthode de résolution basée sur la formulation enthalpique avec un terme source dépendant de la fraction volumique du corps en phase liquide où un schéma itératif doit être utilisé pour résoudre ces équations.

La fraction liquide dépend de la température, le taux de fusion/solidification, la vitesse de l'interface et la concentration. L'utilisation de cette formulation conduit à avoir une seule équation d'énergie linéaire dans chaque phase avec un terme source variable.

La mise à jour de cette fraction liquide est réalisée en mettant en profil une méthode itérative lors du changement de phase isotherme. Cette mise à jour permet de minimiser le temps de calcul et d'effectuer une autre correction de la mise à jour après chaque itération basée sur la linéarisation du terme source latent

Pour ce travail, nous avons choisi la méthode de terme source de chaleur latente, afin de résoudre le problème de changement de phase. Malgré les oscillations de température ou de la position de l'interface autour de la valeur exacte car les nœuds qui subissent le changement de phase ont supposés être à la température de fusion, ce qui est faux, le choix de cette méthode faible est dû au fait que le système d'équations qui décrit le processus de changement de phase est réduit à une seule équation du transfert de chaleur, sans tenir compte du déplacement du front de changement de phase. La méthode du C_p apparent connaît des difficultés au cours de la modélisation, la capacité thermique tend à diverger dans la zone de transition de phase où le changement de phase a été détecté.

Ces méthodes sont caractérisées par leur facilité à être introduite dans des codes de calcul existant. En utilisant la méthode des sources de chaleur latente, la génération d'un nouveau maillage à chaque pas de temps deviendra inutile à générer. Le choix d'un maillage assez fin est nécessaire pour avoir une bonne précision de calcul.

II.4. Modélisation mathématique

La première étape pour la simulation numérique, consiste à déterminer le modèle géométrique représentant notre domaine de calcul sur lequel la solution numérique devra être calculée. On discrétise ensuite le domaine de calcul, en choisissant un maillage convenable afin d'obtenir des calculs précis et en précisant un schéma de discrétisation correspondant pour chaque terme du système. En appliquant la méthode enthalpique de terme source de la chaleur latente, la technique des volumes finis et la méthode TDMA (TriDiagonal Matrix Algorithm), on résout notre problème de changement de phase dans le cas isotherme et en domaine unidimensionnel. Une fois les équations discrétisées, on les intègre dans un code de calculs afin de calculer la température et le flux pour chaque nœud et à chaque pas de temps.

II.4.1 Description du problème

Dans le cas présent, une brève description du modèle mathématique, qui a été utilisé pour résoudre le problème de front mobile dans un composite mortier-MCP. Le matériau à changement de phase est microencapsulé dans de très petites particules, le mortier est considéré comme un milieu homogène. Le transfert de chaleur par conduction est le seul mode de transfert survenir à l'intérieur du matériau. Les bords du composite sont considérés isolés.

Hypothèses

La formulation de base du problème de Stefan contient plusieurs hypothèses qui sont, pour la plupart du temps, acceptables et mènent à avoir un problème classique de Stefan :

- Le transfert de chaleur est isotrope et se fait seulement par conduction suivant l'axe x.
- La chaleur latente est supposée constante, elle est absorbée ou émise à la température de fusion.
- La température de fusion est constante, dépend des propriétés du matériau. ➤ La surface séparant la phase solide et liquide est supposée fine à la température de fusion.
- La densité des phases liquide et solide est supposées égale.
- Les propriétés thermo-physiques sont constantes pour chaque phase et indépendants de la température.

II.4.2. Cas isotherme

II.4.2.a Modèle mathématique

En travaillant dans un domaine linéaire isotherme, unidimensionnel de longueur L, et en supposant que les hypothèses citées auparavant sont valides, le bilan énergétique basé sur la méthode enthalpique dans un cadre cartésien, s'exprime:

$$\frac{\delta h}{\delta t} = \nabla(k\nabla t) \quad \text{II.9}$$

Où: k, T et H représentent respectivement la conductivité thermique, la température, et l'enthalpie volumique totale, cette dernière dépend de la température [41] et peut être décomposée en deux parties, une partie sensible et une autre latente donné par:

$$H = h + \rho f L \quad \text{II.10}$$

Avec : f, ρ , L, et h indiquent la fraction volumique du liquide, la masse volumique, la chaleur latente et l'enthalpie sensible du MCP, cette dernière peut être s'exprimer en fonction de la température et la capacité thermique spécifique par la relation suivante:

$$h = \int \rho c dT \quad \text{II.11}$$

Or: T_f désigne la température de fusion du MCP.

En tenant compte des parties sensibles et latentes, la formulation d'enthalpie générale, peut être donnée par la relation non linéaire

$$\frac{\delta h}{\delta t} \nabla(\alpha \nabla h) - \rho L \frac{\delta f}{\delta t} \quad \text{II.12}$$

Où: $\alpha = k/\rho.c$ est la diffusivité thermique.

Dans cette section, on précise les conditions initiales et aux limites. Ce qui nous permet de compléter le modèle mathématique et d'établir un problème bien posé :

- ❖ À $t = 0$, $\forall x \in [0,1]$ $T = T_0 < T_f$
- ❖ À $x = 0$, $t > 0$ $-k \cdot \partial T / \partial x = h_1 (T_\infty 1 - T_x = 0)$
- ❖ À $x = L$, $t > 0$ $-k \cdot \partial T / \partial x = h_2 (T_\infty 2 - T_x = L)$

II.4.2.b Discrétisation du problème

II.4.2.b.1.Méthode des volumes finis

Les méthodes de discrétisation consistent à traduire l'équation aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques, elles sont adaptées pour la simulation numérique de différents types (hyperbolique, parabolique et elliptique) de l'équation de conservation . Pour résoudre notre problème, nous avons choisi d'utiliser la méthode des volumes finis, cette méthode permet de diviser le domaine de calcul en un certain nombre de sous domaines élémentaires, appelés volumes de contrôle. La variable dépendante T , sera déterminée en un nombre fini de points appelés nœuds. Les équations algébriques définies en chaque nœud, sont obtenues par intégration de l'équation de la conservation d'énergie sur chaque volume de contrôle de maillage considéré et pour chaque nœud.

L'avantage de la méthode des volumes finis, par rapport aux autres méthodes de discrétisation est qu'elle est conservative, cela indique que tout ce qui sort d'un volume de contrôle entre dans un autre .

La résolution de l'équation (II.4) en appliquant la méthode des volumes finis dans un domaine unidimensionnel, demeure principalement dans l'intégration de celle-ci sur un volume de contrôle :

$$\int_{cv} \rho c \frac{\delta T}{\delta t} dx = \int_{cv} k \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} dx - \int_{cv} \frac{\delta f}{\delta t} dx \quad \text{II.14}$$

II.4.2.b.2. Maillage

Dans cette partie, on subdivise notre domaine de calcul en grilles longitudinales et transversales. Le maillage constitué est un réseau des nœuds tel que le volume de contrôle, est défini autour de deux points de ce réseau pour le cas unidimensionnel. Les deux points (w, e) représentent les frontières de chaque volume de contrôle situées à mi-distance des deux nœuds adjacents (W, E) du point principal P. Δx caractérise la longueur de chaque volume de contrôle et $\delta x_{WP}, \delta x_{wP}, \delta x_{Pe}, \delta x_{PE}$, et δx_{we} représentent respectivement la distance séparant les points (W, P), (w, P), (P, E), et (w, e)

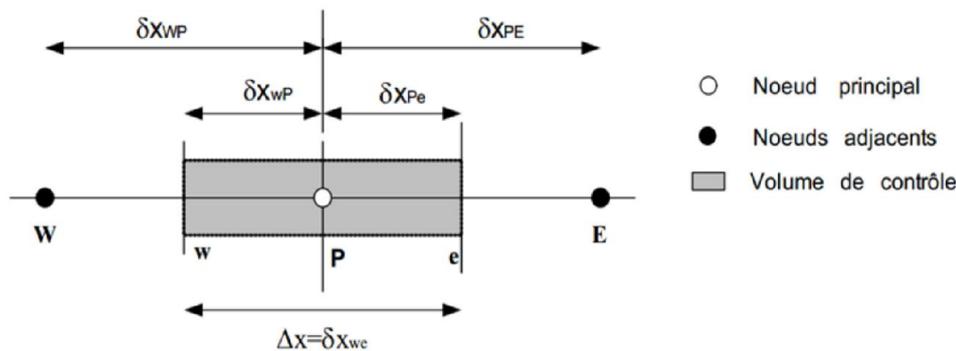


Figure II.5 : Méthode des volumes finis : Maillage en 1D [28]

II.4.2.b.3 Discrétisation temporelle

En intégrant l'équation (II.4) entre l'instant t et t+ Δt , l'équation devient sous la forme

$$\text{suivante : } \int_t^{t+\Delta t} \int_{cv} \rho c \frac{\delta T}{\delta t} dx dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_{cv} k \frac{\delta^2}{\delta x^2} dx dt - \int_{ctv}^{t+\Delta t} \int_{cv} \rho L \frac{\delta f}{\delta t} dx dt \quad \text{II.15}$$

Pour cette discrétisation spatial, il existe deux schémas de résolution :

➤ Schéma explicite

Lorsque la solution discrète est connue explicitement en fonction de temps on dit que le schéma est explicite. Il permet de calculer la variable T_p^{n+1} en fonction de la valeur de la fonction T_i^n (i=W, E) à l'instant t. le point faible de ce schéma repose sur le fait qu'il est conditionnellement stable, cela est dû à la limite du choix du pas de temps par des contraintes de stabilité numérique. Ce schéma est connu par un degré de précision faible

➤ Schéma implicite

Dans le cas où on exprime la grandeur T inconnue à l'instant t+ Δt en fonction des grandeurs à l'instant t et d'autre à l'instant t+ Δt , on dit que le schéma est implicite. Ce

dernier est inconditionnellement stable, cela conduit à utiliser un pas de temps assez grands Pour la discrétisation de l'équation (III.7) par rapport au temps, nous avons utilisé une méthode aux différences finies avec un schéma implicite, l'équation est réécrite comme suit :

$$(T_i^{n+1} - T_i^n) = \alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T_{i+1}^{n+1} - 2T_i^{n+1}) + \frac{L}{c} (f_i^n - f_i^{n+1k})$$

II.16

L'équation (II.16) peut être écrite de manière algébrique comme suit :

$$a_p T_i^{n+1} = a_E T_{i+1}^{n+1} + a_W T_{i-1}^{n+1} + T_i^n + \frac{L}{c} (f_i^n - f_i^{n+1(k)}) \quad \text{II.17}$$

Avec : $a_p = 1 + a_E + a_W$ et $a_W = a_E = \alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2}$ II.17.a

Où : f est la kème évaluation de la fraction liquide au nœud i.

L'équation obtenue (II.17) est une équation non linéaire, cela impose une résolution itérative. L'algorithme de résolution de système d'équation à matrice tri-diagonale utilisé pour résoudre ce système d'équations est appelé TDMA (Tri-Diagonal Matrix Algorithm) [36], connu aussi sous le nom de l'algorithme de Thomas. Ce solveur est vraiment une formule pour une utilisation récursive afin de résoudre cette équation de matrice à l'aide de l'élimination de Gauss.

Lorsque le point de coordonnée xi est en train de changer de phase, la température est égale à T f ; cela conduit à une différence d'enthalpie sensible h inulle [22,31]

À l'itération K+1 : $a_p T_m = a_E T_{i+1}^{n+1} + a_W T_{i-1}^{n+1} + T_i^n + \frac{L}{c} (f_i^n - f_i^{n+1(k+1)})$ II.18

Afin d'obtenir la correction de la fraction liquide nécessaire pour faire avancer le front de changement de phase, on fait la soustraction de l'équation II.17 et l'équation II.18 :

$$f_i^{n+1(k+1)} = f_i^{n+1} + \omega a_p \frac{c}{L} (T_I^{n+1} - T_m) \quad \text{II.19}$$

Avec : ω est un coefficient de relaxation, son rôle est réduire les oscillations et éviter la divergence.

En pratique, cette mise à jour (II.19) de la fraction liquide est appliquée dans chacun des volumes de contrôle du domaine de calcul après la kèmesolution de l'équation de

conservation d'énergie [31]. Pour les volumes de contrôle qui ne changent pas ou qui ont fini leur changement de phase, la fraction liquide est préservée à l'aide d'une deuxième correction:

$$f_i = \begin{cases} 0 & \text{si } f_i^{n+1^{(k+1)}} < 0 \\ 1 & \text{si } f_i^{n+1^{(k+1)}} > 0 \end{cases} \quad \text{II.20}$$

Cette deuxième correction est valable pour tous les points ayant une fraction liquide en dehors de l'intervalle [0,1].

Les deux corrections sont utilisées, après la résolution du système d'équations, dans le but d'établir la nouvelle valeur de la fraction liquide. On refait cette opération jusqu'à la satisfaction de convergence.

II.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le problème de Stefan, lors d'un changement de phase isotherme $T=T_f$, et lors d'un changement de phase non isotherme (sur une plage de température), $T \in [T_s, T_l]$ (annexe III). Nous avons cité quelques notions théoriques ainsi que les méthodes numériques associées qui permettent de résoudre un problème de transfert de chaleur avec changement de phase, en appliquant la méthode enthalpique basée sur un schéma implicite. Nous avons aussi présenté le modèle mathématique permettant la résolution du problème de changement de phase pour les deux cas isotherme et non isotherme (annexe III) dans un domaine de calcul monodimensionnel, en présentant la méthode TDMA qui est la base du code de calcul réalisé, aussi les procédures suivies pour abolir ce type de problème.

Chapitre III : Simulation numérique

III.1. Résumé :

Les Matériaux à Changement de Phase (MCP) intégré dans l'enveloppe du bâtiment peut améliorer le confort thermique et réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments en améliorant le stockage d'énergie thermique du mur. Cette étude porte sur l'étude numérique du comportement thermique d'un nouveau composite en plâtre contenant un MCP microencapsulé qui peut être intégré en tant que composant dans les murs solaires passifs.

Dans cette étude en utilisant une méthode hybride volume fini / enthalpie, le terme source de chaleur latente a été traité implicitement dans l'équation d'enthalpie. L'approche actuelle a été implémenté en considérant un problème de conduction transitoire unidimensionnel avec le changement de phase.

Les résultats numériques concordent bien avec les résultats analytiques. Les résultats démontrent la pertinence de l'incorporation de PCM microencapsulé dans le plâtre.

Sur la base des résultats obtenus, il peut être indiqué que la capacité de stockage thermique du plâtre est grandement renforcée.

D'autre part, nous avons observé l'influence d'épaisseur de la couche du plâtre-MCP sur le comportement thermique de ces MCP lors de leur fusion/ solidification.

III.2. Introduction

La consommation d'énergie est considérablement augmentée au cours des dernières décennies, en particulier dans le secteur du bâtiment, qui est causé par l'accroissement de la population et le développement économique rapide dans le monde entier. Donc, ces dernières années, de nombreux scientifiques du monde entier sont à la recherche d'une technologie efficace et économique qui peut être utilisée pour réduire de la consommation énergétique, et économisant ainsi des ressources énergétiques. Dans ce contexte la méthode de stockage de chaleur latente a été reconnu comme l'un des moyens les plus efficaces pour réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments par l'absorption et le stockage le rayonnement solaire entrant dans le bâtiment et réduisant ainsi les variations de température intérieure.

L'énergie peut être stockée sous différentes formes, énergie mécanique, électrique et thermique. Parmi les différentes formes de stockage d'énergie, le stockage d'énergie thermique est le plus attractif en raison de la capacité de stockage et de libération [1]. Dans le secteur des bâtiments, le stockage d'énergie thermique peut être réalisé principalement par deux approches : le stockage par chaleur sensible ou latente.

Le stockage par chaleur latente est basé sur l'enthalpie de changement de phase du matériau, la chaleur stocker est dans une plage de température étroite, fournissant plus densité d'énergie qui peut être atteinte avec un stockage de chaleur sensible sur le même gradient de température. Il convient de noter qu'une telle approche présente de nombreux avantages tels que le stockage élevé procédé de stockage / récupération de la chaleur et de la chaleur quasi isotherme [2–6]. Matériaux utilisés pour le stockage de la chaleur sous une forme latente dans des applications de construction sont appelés matériaux à changement

de phase (MCP). La haute capacité de stockage d'énergie par unité de volume à une température presque constante caractérise et différencie ces matériaux conventionnels de construction [7].

Leur incorporation dans les mortiers de plâtrage comme composants du bâtiment peuvent améliorer l'efficacité des bâtiments en raison de leur capacité stockage ou libération de l'énergie. Il est utile de rappeler que, lorsque la température ambiante se lève suffisamment pour atteindre la température de transition solide-liquide, le MCP intégré passe de l'état solide à l'état liquide avec un endothermique comportement (chaleur latente), limitant ainsi le flux de chaleur vers l'intérieur du bâtiment. À l'inverse, quand la température de l'environnement diminue, le MCP, qui est maintenant dans l'état liquide, peut atteindre la température de transition liquide-solide (température de solidification) à nouveau, et passer à l'état solide tout en libérant de l'énergie (procédé exothermique). Un tel comportement retarde la tendance au refroidissement à l'intérieur du bâtiment [8]. Au cours des 20 dernières années, différents projets de recherche ont été développés afin d'étudier une méthode plus appropriée pour incorporer les MCP à la fois dans les matériaux de construction et dans différents éléments de construction. Le MCP peut être intégré dans matériaux de construction de trois manières :

Par incorporation directe, imprégnation ou par encapsulation. En ce qui concerne la dernière manière, les MCP doit être encapsulé avant d'être intégré dans la construction [9–12]. Il a été montré que Les MCP microencapsulé ont des avantages appropriés car ils empêchent les fuites au changement de phase solide-liquide, et également fournir une chaleur plus élevée car la surface de transfert par unité de volume est grande. Les résultats obtenus ont révélé que l'incorporation du MCP microencapsulé dans le matériau de construction est une technologie particulièrement attractive, capable de gérer les problèmes associés à la fuite de liquide qui pouvant survenir après un solide / changement de phase liquide d'un MCP. De même, la coque des microcapsules peut fournir une protection de PCM tout en évitant un contact direct

entre le MCP et le matériau de construction [13–17]. Récemment, de nombreuses investigations expérimentales ont été menées à propos de l'incorporation des MCP microencapsulés dans différents éléments de bâtiments, tels que le plâtre, le ciment mortier, murs en béton ou sols en béton. Ces enquêtes visaient à évaluer le potentiel d'intégration de la MCP dans les murs et / ou construire des enveloppes pour augmenter son inertie thermique et améliorer sa performance énergétique [18–26]. De plus, les simulations numériques sont également une alternative merveilleuse méthodes pour étudier l'intégration de la microencapsulée MCP dans les murs ou les sols des bâtiments [27–31]. A cette fin, il est important de développer un modèle mathématique pour reproduire le comportement thermique, et optimiser la performance de l'incorporation des MCP microencapsulés dans différents éléments de bâtiments. Dans ce cadre, Zalba et al. [32] ont passé en revue certains théories et simulations de transfert de chaleur dans les MCP et mises en évidence les avantages de la méthode enthalpie pour gérer l'équation d'énergie dans la gestion de la fusion et de la solidification du MCP. Jin et Zhang [33] ont construit un modèle numérique pour un doublesystème de plancher de MCP de couche. Leur analyse des performances thermiques bon état Thermique et amélioration de l'intérieur de l'efficacité énergétique. Pasupathy et al. [34] ont mis en œuvre le modèle de toit de bâtiment intégré MCP avec une simulation qui traitait avec des conditions ambiantes moyennes annuelles, l'effet de la variation de la condition ambiante et la variation du coefficient de transfert de chaleur sur la surface extérieure des pores du toit pour cibler le panneau MCP épaisseur. Les études numériques susmentionnées ont porté, pour la plupart partie, sur la précision des calculs, mais pas nécessairement cible l'application au besoin réel des architectes et des ingénieurs. Pour le temps, les panneaux muraux MCP appropriés ou non pour assurer une satisfaction niveau de confort en été reste une question à considérer au début de la phase de conception, puisque la réponse peut fortement influencer la conception du bâtiment. Pour mener à bien ce travail, un modèle mathématique basé sur la méthode de l'enthalpie [11,35] a été développée et ses solutions numériques utilisant la méthode des volumes finis (FVM) était employé pour étudier les effets de régulation de la température résultant de l'incorporation de paraffine microencapsulée dans le plâtre matrice. Ce modèle a été validé en comparant la simulation numérique avec les résultats analytiques. Ensuite, une étude paramétrique a été réalisée pour étudier l'effet de la présence de MCP différents paramètres tels que l'épaisseur de la couche plâtre/MCP microencapsulé sur la réduction et le retard de la charge thermique à travers un tel composite la paroi à l'extérieur soumise à une température sinusoïdale. Cette étude pourrait servir de cadre à la conception de murs composites incorporant MCP microencapsulé pour les bâtiments économes en énergie divers climats.

III.3. Etude numérique

III.3.1. Modèle mathématique

Cette section fournit une brève description de la modèle mathématique qui a été utilisé pour résoudre l'équation de transfert de chaleur en régime transitoire dans un plâtre composite de MCP (plâtre incorporant MCP microencapsulé). Le matériau composite est un mélange entre un matériau de construction classique (plâtre) et très petites particules de MCP microencapsulé. Cependant, malgré ces inclusions, le plâtre peut encore être considéré comme un milieu homogène. Par conséquent, pour reproduire le comportement thermique de ce type de wallboard, nous supposons que cet échantillon composite peut être décrit via les propriétés moyennes. Cela nous évite de résoudre deux équations, l'une pour le plâtre et l'autre pour les microcapsules MCP. Pour obtenir une solution des équations gouvernantes, plusieurs hypothèses sont essentielles pour comprendre les limites de la validité de l'approche adoptée. Ceux-ci sont:

(1) Le transfert de chaleur est unidimensionnel et est réalisé via la conduction thermique.

(2) Le mélange plâtre / MCP microencapsulé est supposé être homogène et isotrope.

(3) Les propriétés thermo-physiques (densités, capacités calorifiques, et conductivités

thermiques) sont constantes bien que différentes dans les phases solide et liquide. Ils sont supposés

rester constants dans le temps et indépendants de la température. (4) PCM en plâtre composite

microencapsulé est censé avoir un point de fusion (changement de phase isotherme). Sur la base des

conjectures ci-dessus, la formulation enthalpique pour le changement de phase contrôlé par la conduction peut être écrite comme [38]:

En travaillant dans un domaine linéaire isotherme, unidimensionnel de longueur D , et en supposant que les hypothèses citées ci-dessus sont valides, le bilan énergétique basé sur la méthode enthalpique dans un cadre cartésien s'exprime comme suit :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) \quad (1)$$

Où : k , T et H représentent respectivement la conductivité thermique, la température, et l'enthalpie volumique totale. Cette dernière dépend de la température et peut être décomposée en deux parties, une partie sensible et une autre latente donnée par :

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

Avec : f , ρ , L , et h indiquent la fraction volumique du liquide, la masse volumique, la chaleur latente et l'enthalpie sensible du MCP. Cette dernière peut être exprimée en fonction de la température et la capacité thermique spécifique par la relation suivante :

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

où : T_f désigne la température de fusion du MCP.

En tenant compte des parties sensibles et latentes, la formulation d'enthalpie générale peut être donnée par la relation non linéaire :

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \nabla(\alpha \nabla h) - \rho L \frac{\partial f}{\partial t} \quad (4)$$

où : $\alpha = \frac{k}{\rho c}$ est la diffusivité thermique.

L'équation précédente peut s'écrire en termes de température sous la forme suivante :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) - \rho L \frac{\partial f}{\partial t} \quad (5)$$

En examinant ces deux dernières équations, on constate une non linéarité du problème. La relation qui existe entre la température et la différence d'enthalpie totale empêche la résolution sous forme de système d'équations linéaires classique. Les problèmes de cette forme sont résolus par des méthodes itératives.

Les conditions limites sont les suivantes :

à $t = 0, 0 \leq x \leq D$	$T = T_0 < T_F$ (a)
à $x = 0, t > 0$	$T = T_W > T_F$ (b)
à $x = D, t > 0$	$T = T_0$ (c)

III.3.2. Discrétisation du modèle mathématique

En utilisant la méthode des différences finies, avec un schéma implicite,

l'équation (5) s'approxime telle que:

$$T_i^{n+1} = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} (T_{i+1}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{i-1}^{n+1}) + T_i^n - \frac{L}{c} (f_i^{n+1(k)} - f_i^n) \quad (6)$$

Ces équations peuvent être écrites de manière algébrique. Par exemple,

L'équation (6) s'exprime algébriquement comme suit :

$$a_p T_i^{n+1} = a_E T_{i+1}^{n+1} + a_W T_{i-1}^{n+1} + T_i^n - \frac{L}{c} (f_i^{n+1(k)} - f_i^n) \quad (7)$$

Avec :

$$a_p = 1 + a_E + a_W \quad \text{et} \quad a_W = a_E = \alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2}$$

où : f est la $K^{\text{ème}}$ évaluation de la fraction liquide au nœud i .

L'équation obtenue (7) est une équation non linéaire, cela impose une résolution itérative. L'algorithme de résolution de système d'équation à matrice tri-diagonale utilisé pour résoudre ce système d'équations est appelé TRIDAG (Tri-Diagonal Matrix Algorithm), connu aussi sous le nom de l'algorithme de Thomas ou TDMA. Ce solveur est vraiment une formule pour une utilisation récursive afin de résoudre cette équation de matrice à l'aide de l'élimination de Gauss.

Lorsque le point de coordonnée x_i est en train de changer de phase, la température est égale à T_f cela conduit à une différence d'enthalpie sensible h_i nul.

À l'itération $K+1$:

$$a_p T_F = a_E T_{i+1}^{n+1} + a_W T_{i-1}^{n+1} + T_i^n - \frac{L}{c} (f_i^{n+1(k+1)} - f_i^n) \quad (8)$$

Afin d'obtenir la correction de la fraction liquide nécessaire pour faire avancer le front de changement de phase, on fait la soustraction de l'équation (7) et l'équation (8) :

$$f_i^{n+1(k+1)} = f_i^{n+1(k)} + \omega a_p \frac{c}{L} (T_i^{n+1} - T_F) \quad (9)$$

Avec : ω est un coefficient de relaxation, son rôle est de réduire les oscillations et éviter la divergence.

En pratique, cette mise à jour (9) de la fraction liquide est appliquée dans chacun des volumes de contrôle du domaine de calcul après la $k^{\text{ème}}$ solution de l'équation de conservation d'énergie. Pour les volumes de contrôle qui ne changent pas ou qui ont fini leur changement de phase, la fraction liquide est préservée à l'aide d'une deuxième correction :

$$f_i = \begin{cases} 0 & \text{si } f_i^{n+1(k+1)} < 0 \\ 1 & \text{si } f_i^{n+1(k+1)} > 1 \end{cases} \quad (10)$$

Cette deuxième correction est valable pour tous les points ayant une fraction liquide en dehors de l'intervalle [0,1].

Les deux corrections sont utilisées, après la résolution du système d'équations, dans le but d'établir la nouvelle valeur de la fraction liquide. On refait cette opération jusqu'à la satisfaction de convergence.

III.3.3. Solution analytique en 1D

a-Condition de type Dirichlet :

Il est toujours utile de s'assurer qu'un code de calcul reproduit fidèlement la solution analytique pour un problème simple. Le problème décrit auparavant possède une solution analytique, donnée par Dirichlet. Cette solution va ainsi servir à valider certains des résultats numériques obtenus avec la méthode mise en œuvre dans le cadre de cette mémoire.

Un cas simple est d'abord étudié. Il s'agit de la cristallisation d'un domaine liquide semi-infini. La température initiale T_0 (à $t=0s$) sur tout le demi-espace est constante et est supérieure ou égale à la température de fusion T_F . La température à la frontière gauche est soudainement abaissée à une température $T_w < T_F$ et il y a solidification à partir de la position $x=0$ m.

La solution analytique de ce problème ($T_w \leq T_F < T_0$) est la suivante :

-position de l'interface :

$$X_c(t) = 2\lambda\sqrt{a_s t}$$

-température de la phase solide :

$$T_s(x,t) = T_w + (T_f - T_w) \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_s t}}\right)}{\operatorname{erf}(\lambda)} \quad x < x_c(t)$$

-température de la phase liquide :

$$T(x,t) = T_0 - (T_0 - T_f) \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_l t}}\right)}{\operatorname{erfc}\left(\lambda\sqrt{\frac{a_s}{a_l}}\right)} \quad x > x_c(t)$$

Où λ est la solution de l'équation suivante :

$$\frac{st_{es}}{\exp(\lambda^2)\operatorname{erf}(\lambda)} - \frac{st_{el}}{\sqrt{a_s/a_l}\exp(\lambda^2 a_s/a_l)\operatorname{erfc}\left(\lambda\sqrt{\frac{a_s}{a_l}}\right)} = \lambda\sqrt{\pi}$$

erf et erfc sont la fonction d'erreur et la fonction d'erreur complémentaire. Alors que, respectivement, st_{es} et st_{el} sont les nombres adimensionnels de Stefan pour les deux phases solide et liquide

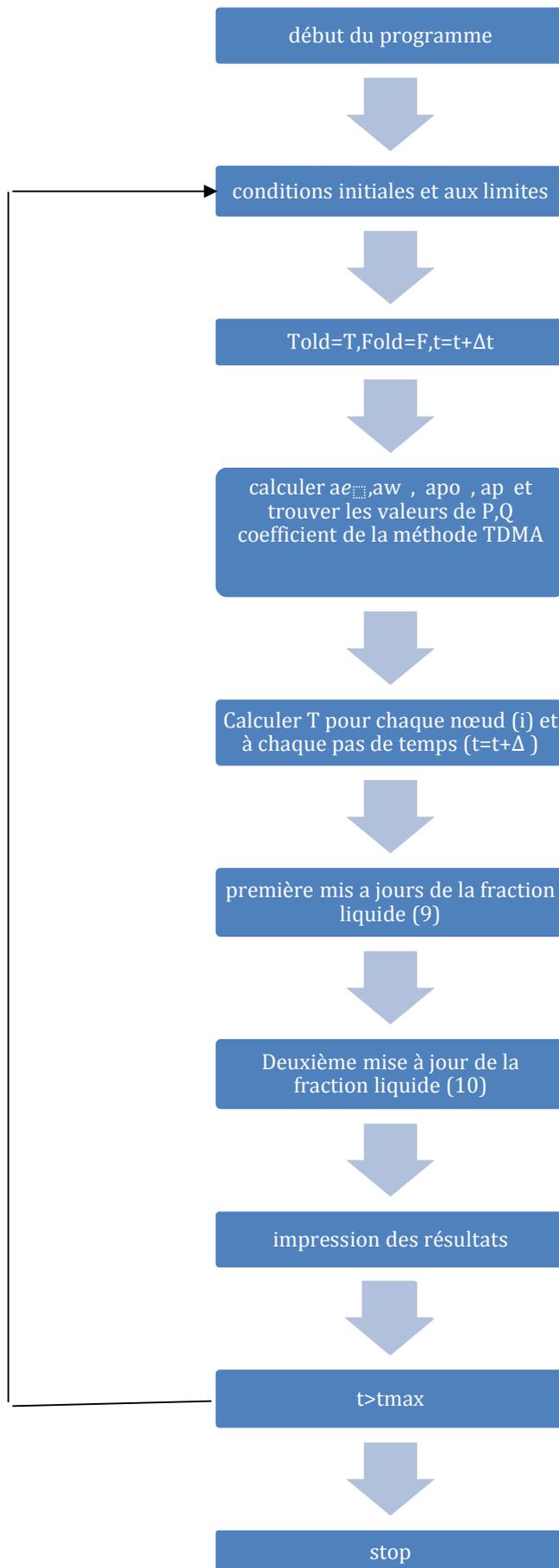
$$st_{el} = \frac{c_l(T_0 - T_f)}{L}$$

$$st_{es} = \frac{c_s(T_f - T_w)}{L}$$

III.3.4. Algorithme de calcul

Il s'agit de résoudre à tour de rôle l'équation de conservation de l'énergie (5) à chaque pas de temps et à chaque nœud, on résout l'équation (8) à l'aide d'un solveur de systèmes linéaires tri-diagonaux TDMA, on appliquant une première mise à jour de la fraction liquide II.(9), valable pour tous les nœuds, suivie par une deuxième correction II.(10).

L'algorithme observé sur la Figure II.7 présente une idée de l'algorithme de résolution



III.3.5. Validation numérique

Dans cette partie, des résultats numériques 1D sont comparés avec des résultats obtenus à partir de la solution analytique d'un problème de type Dirichlet. La solution analytique fait référence à un problème sur une demi-droite de longueur infinie, la solution numérique est quant à elle calculée sur un domaine fini. On a choisi un domaine de calcul suffisamment grand pour éviter que la température sur la frontière droite ne subisse de changements trop prononcés lors de la résolution. Les propriétés utilisées sont celles caractérisant l'eau, le gallium et le MCP 27.

Il faut noter que, même si les résultats obtenus sont très proches de la solution analytique, ils pourraient être un peu différents de ceux obtenus expérimentalement. Le modèle mathématique utilisé néglige certains phénomènes physiques (notamment la convection) qui sont présents dans les tests expérimentaux. Pour tous les tests, la longueur du domaine est de 1 m. Plusieurs pas de temps ont été testés.

III.4.1. Fusion de la glace test 1

Ce test concerne la fusion de la glace dont les propriétés thermophysiques (solide, liquide) qui sont données dans le **Tableau 1**. Initialement, la glace est à une température uniforme de $T_0 = 268,15 \text{ K}$. Subitement la température du côté gauche du domaine est élevée à $T_w = 293,15 \text{ K}$ et la fusion de la glace commence à $x = 0$. La température de la frontière droite reste constante à $T = 268,15^\circ \text{K}$.

Tableau.1 : Propriétés physiques pour le test 1

Variable		
	Glace	Eau
$K(\text{W/m.K})$	1,92	0,606
$C_p(\text{J/Kg.K})$	1960	4181
(Kg/m^3)	917	1000
$L(\text{KJ/Kg})$	333,4	
$L(\text{m})$	1 m	
$T_0(\text{K})$	268,15	
$T_F(\text{K})$	273,15	
$T_w(\text{K})$	293,15	

Pour ce cas de la fusion de la glace en choisissant le nombre de nœuds 100 et le pas de temps $\Delta t=50\text{s}$. La figure (1) montre l'historique du déplacement de l'interface pour la fusion de la glace nous remarquons que les résultats numériques obtenus avec le code de calcul issu de la formulation proposée ainsi que la solution analytique correspondante. On peut constater que les résultats concordent très bien avec la solution analytique.

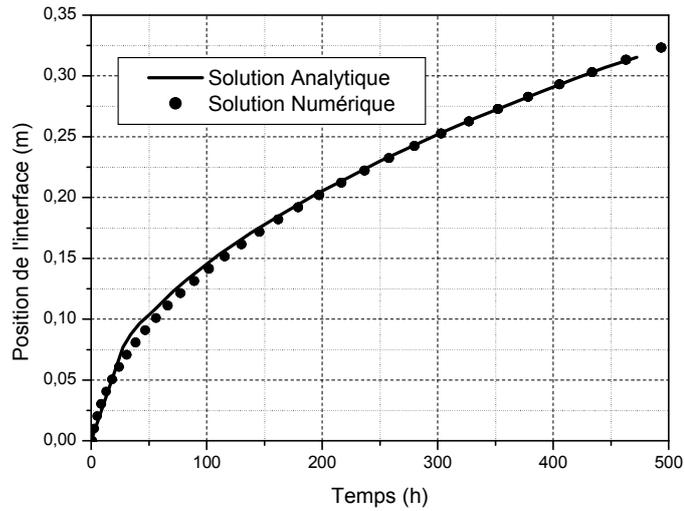


Figure 1 : Historique du déplacement de l'interface pour la fusion de la glace

Pour le profil de température c'est les mêmes remarques que le cas de la position de l'interface (voir les deux courbe ci-dessous Figure 2 et Figure 3).

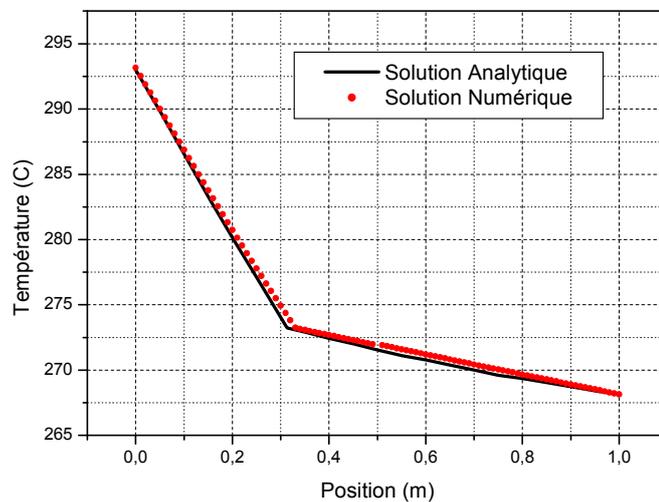


Figure 2 : Profil de température au temps final pour test1 $t=17e+5s$

III.4.1.1. Influence du pas de temps :

Le changement de pas de temps n'influe pas sur les résultats : la position de l'interface en fonction du temps obtenu avec trois incréments

$\Delta t=10s$, $\Delta t=50s$, $\Delta t=100s$ avec le nombre de nœuds 100 voir La Figure (3). On remarque que les résultats numériques se confondent avec les résultats analytiques pour tous les pas de temps choisis.

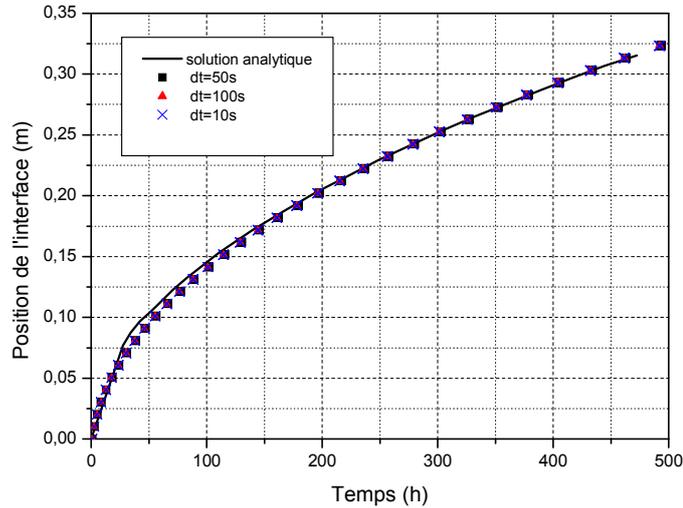


Figure 3 : Influence du pas de temps sur la précision du modèle.

III.4.2.fusion du gallium test 2 :

Concernant ce test, le gallium ($T_F= 302,93^{\circ}K$) a initialement une température uniforme de $T_0= 301,45^{\circ}K$. La température de la frontière gauche est subitement élevée à $T_w= 311,15^{\circ}K$. Ainsi, la fusion du gallium débute à $x = 0$. La température du coté droit est isotherme $T = T_0$. Les propriétés thermophysiques utilisées sont présentées dans le Tableau 2.

Variable		
	Glace	Eau
$K(\text{W/m.K})$	32	32
$C_p(\text{J/Kg.K})$	381,5	381,5
(Kg/m^3)	6093	6093
$L(\text{KJ/Kg})$	80,16	
$L(\text{m})$	1 m	
$T_0(\text{K})$	301,45	
$T_F(\text{K})$	302,93	
$T_W(\text{K})$	311,15	

Tableau 2 Propriétés physique pour le test 2

Pour le cas de fusion de gallium nous observons les mêmes remarques que le test 1 fusion de la glace, la solution numérique se confond avec la solution analytique [voir figures (5) et (6)].

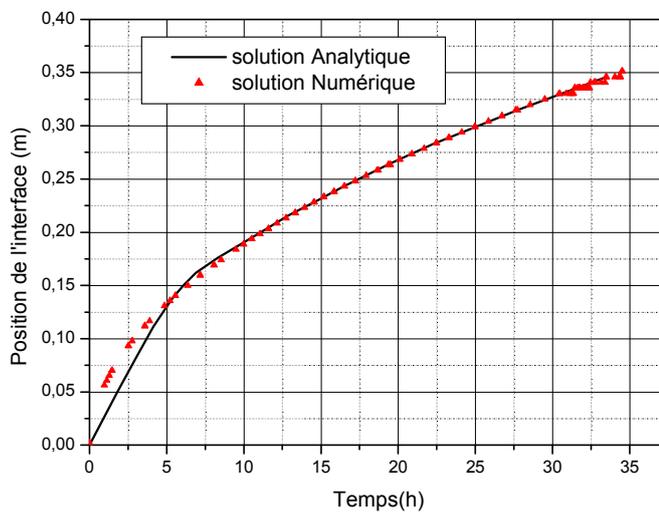


Figure 4 : Historique du déplacement de l'interface pour la fusion de gallium

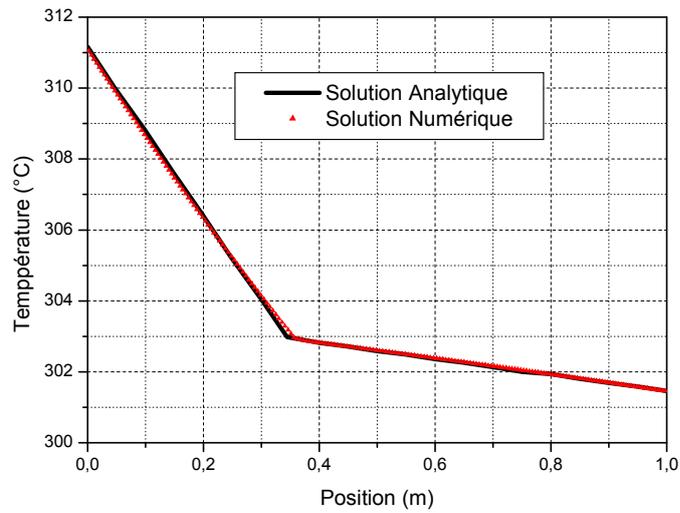


Figure 5: Profil de température au temps final pour test2

III.4.3. fusion du MCP 27 Test 3 :

Pour ce test, le MCP 27 ($T_F= 300,15^\circ\text{K}$) est initialement à une température uniforme $T_0= 288,15^\circ\text{K}$. La température de la frontière gauche est subitement élevée à $T_w 323,15^\circ\text{K}$. Ainsi, la fusion débute à $x = 0$. Le côté gauche de la barre reste isotherme. Les propriétés thermophysiques utilisées sont présentées dans le Tableau 3 .

Tableau 3 Propriétés physique pour le test 3

Variable		
	Glace	Eau
$K(\text{W/m.K})$	0,577	0,813
$C_p(\text{J/K.g.K})$	1751,5	2225
(Kg/m^3)	1710	1530
$L(\text{KJ/Kg})$	172,42	
$L(\text{m})$	1 m	
$T_0(\text{K})$	288,15	
$T_F(\text{K})$	300,15	
$T_w(\text{K})$	323,15	

Pour le cas de fusion de MCP 27 nous observons les mêmes remarques que les test 1 et 2, la solution numérique se confond avec la solution analytique [voir figure (6)] et dans ce cas de MCP 27.

On peut constater sur la Figure 6, que la solution numérique obtenue avec notre code de calcul est toujours en excellent accord avec la solution analytique. De plus, on peut observer que tout au long des calculs, l'erreur sur la position de l'interface demeure très petite et qu'elle ne s'accroît pas.

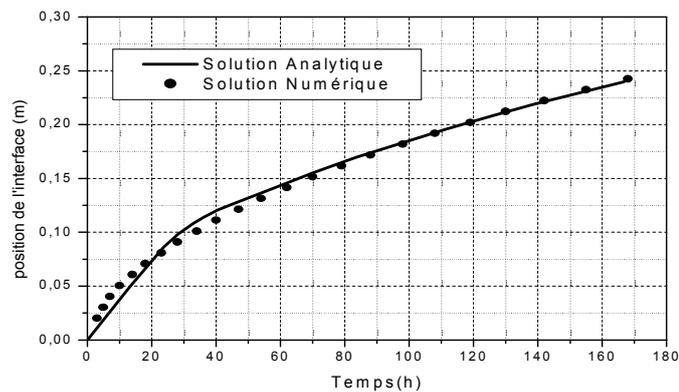


Figure 6 : Historique du déplacement de l'interface pour la fusion de mcp27

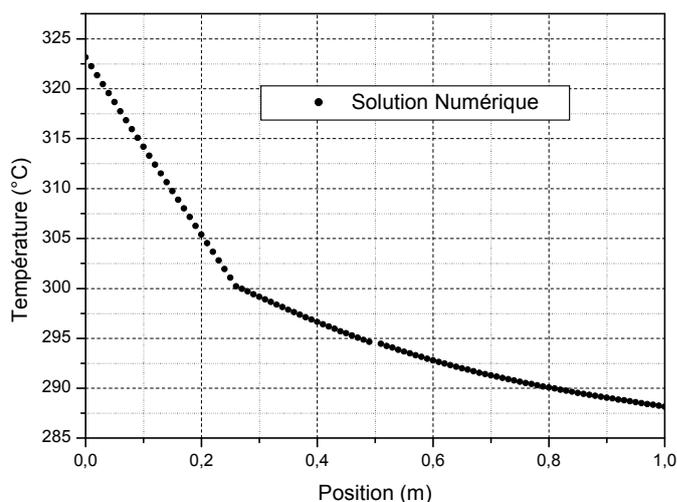


Figure 7 : Profil de température au temps final pour test3

La comparaison entre nos résultats numériques et ceux de l'analytique montre une excellente concordance. Avec notre modélisation, on peut facilement et correctement localiser l'interface solide-liquide et aussi la distribution de la température sur toute la barre de calcul. Ceci indique que la formulation enthalpique en conduction pure a été correctement implantée (formulation, discrétisation, équation algébriques, conditions aux frontières, résolution, post traitement). Toutefois, il faut considérer que la convection est négligée dans une géométrie unidimensionnelle.

III.4.4. Caractéristiques thermiques des plaques de plâtre / MCP avec variation de température extérieure sinusoïdale

Dans cette section, une étude numérique a été menée pour étudier l'influence du composite plâtre-MCP sur le contrôle de la température du bâtiment.

Le MCP choisi doit avoir une température de fusion en adéquation avec l'application ciblée, une forte chaleur latente, une grande capacité thermique, une bonne stabilité du matériau lors des cycles thermique fusion-solidification, et une faible variation de volume lors du changement d'état. Cela justifie notre choix de paraffine, ayant une température de fusion (T_f 26°C), pour réaliser cette étude. Toutes les propriétés des matériaux constituant ce mur solaire sont indiquées dans le tableau 4.

Tableau 4 : Les propriétés thermophysiques des matériaux utilisés dans la construction des murs [3].

Matériau	Plâtre	Plâtre-MCP 90/10
Conductivité thermique état solide (W/m.K)	0.301	0.299
Conductivité thermique état liquide (W/m.K)	-	0.236
Capacité thermique état solide (J/Kg.K)	835	915
Capacité thermique état liquide (J/Kg.K)	-	725
Chaleur latente (J/Kg.K)	-	11265
Densité(Kg/m ³)	1292	1213

Le mur solaire d'épaisseur L_x , est initialement à une température $T_0 = 20 \text{ °C}$ ($T_0 < T_f$). À $t > 0$, nous avons imposé une variation sinusoïdale de la température extérieure. Cette condition représente la variation journalière de la température de l'atmosphère. Les conditions aux limites imposées ont été créées en utilisant des ensembles de données historiques climatiques.

Les conditions aux limites sont les suivant :

1. Température extérieure : $T_{a,ext} = 24 + 8 \sin(\omega.t)$
2. Température intérieure : $T_{a,int} = 23 \text{ °C}$
3. Le coefficient de convection extérieur entre la surface externe du mur composite et l'atmosphère : $h_{ext} = 18 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$;
4. Le coefficient de convection intérieur entre la surface interne du mur composite et l'atmosphère ambiant du local : $h_{int} = 9 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$;

Où : t est le temps(s) et $\omega = 2\pi / \tau$, τ étant la période (24 h).

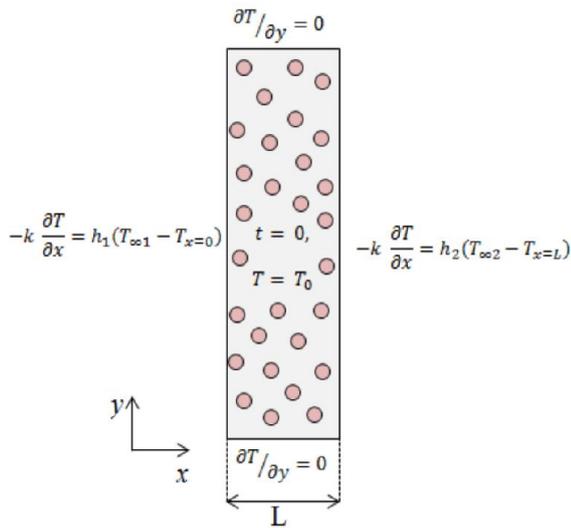


Figure 8 : Schéma du problème étudié.

III.5. Résultats et discussions

Dans ce qui suit, nous allons présenter quelques résultats obtenus lors de la modélisation numérique avec notre code de calcul écrit sous Fortran. Plusieurs simulations ont été réalisées pour justifier la stabilité de notre solution. Les facteurs influençant cette stabilité sont le pas de temps, le coefficient de relaxation et le nombre de noeuds. Pour nos calculs, nous avons choisi un pas de temps de Δt 1s, un coefficient de relaxation $\omega = 0.8$ et un nombre de noeuds $N = 101$. La durée de notre simulation a été de 48 h.

III.6. Mur Plâtre sans MCP

Dans cette partie, nous avons analysé les résultats numériques obtenus pour un mur solaire sous forme parallélépipédique, constitué d'une couche de plâtre d'épaisseur ($e = 12\text{cm}$) sans MCP, et l'autre, d'où les propriétés thermophysiques sont données dans le tableau 4. La simulation a été réalisée afin de déterminer la capacité de stockage d'un mur en absence d'un matériau à changement de phase, pour une durée de deux jours (48 h). Les Figure 9 et 10 montrent la variation du flux de chaleur et de la température au cours du chauffage et de refroidissement du mur. Sur le côté extérieur du mur, nous avons varié la température de

façon sinusoïdale T_{ext} , et sur l'autre côté la température est fixée à 23°C . Nous avons observé sur cette figure que l'amplitude d'oscillation de la température de la face intérieure est fortement réduite par rapport à celle de la température de la face extérieure du mur, où les températures maximales sont successivement $T_{w,in} = 24.45^{\circ}\text{C}$ et $T_{w,out} = 30.62^{\circ}\text{C}$, ce qui conduit à un amortissement de température de 6.17°C .

De même, nous avons observé que le flux extérieur φ_{out} du mur est positif lorsque la chaleur pénètre dans le mur sur le côté externe et que sa variation est sinusoïdale. Tandis que le flux intérieur φ_{in} est positif lorsque la chaleur quitte le mur sur le côté interne. Nous avons conclu qu'il y a une grande différence entre les deux courbes des flux, l'amplitude du flux extérieur ($\varphi_{out} 28.64\text{W}/\text{m}^2$) est plus élevée par rapport à l'amplitude du flux intérieur ($\varphi_{in} 13.17\text{W}/\text{m}^2$). Ceci est dû principalement à l'inertie du plâtre.

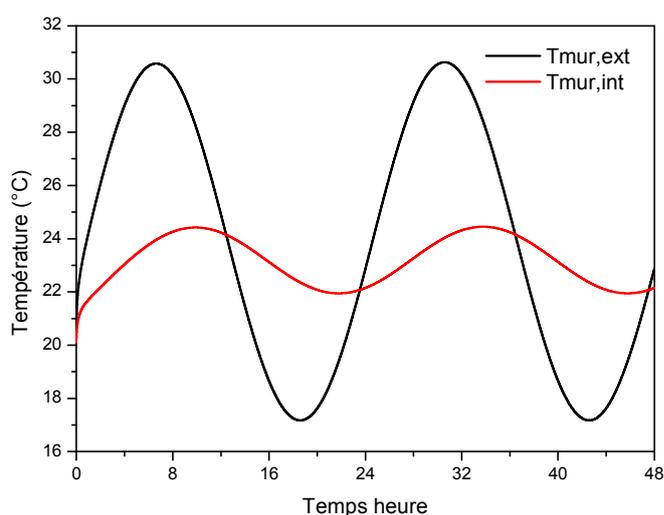


Figure.9 : Variation temporelle des températures sur les faces d'un mur constitué en plâtre

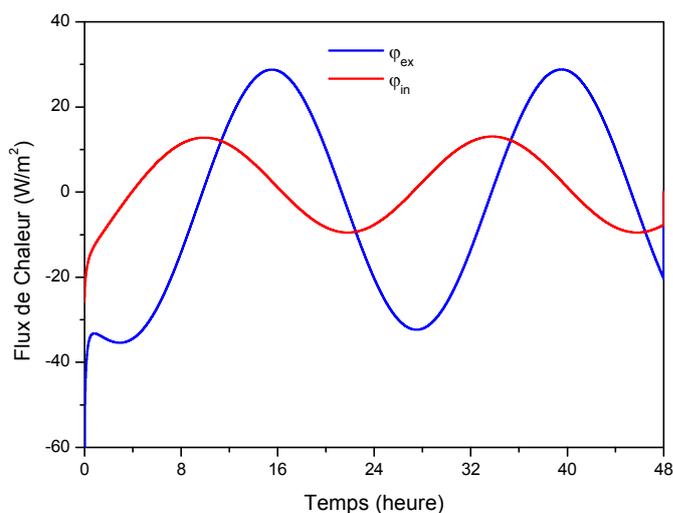


Figure.10 : Variation temporelle des flux sur les faces d'un mur constitué en plâtre

III.7.Mur Plâtre-MCP

Dans cette étape, nous avons traité les résultats numériques obtenues pour un mur solaire plâtre-MCP de pourcentage 90/10, une couche d'épaisseur ($e = 12\text{cm}$), Le but de ce calcul est de déterminer le comportement thermique d'un mur solaire contenant des matériaux à changements de phase micro-encapsulé pour une durée de simulation de deux jours (48 h). La figure 11 montre la variation de la température au cours du chauffage et de refroidissement de l'intérieur et l'extérieur des parois du mur étudié. De même, nous avons varié la température de façon sinusoïdale T_{ext} du côté extérieur, et nous avons fixé la température à 23°C pour le côté intérieur.

Nous avons constaté sur cette figure que l'amplitude d'oscillation de la température de la face extérieur est très élevée par rapport à celle de la température de la face intérieur du mur, où les températures maximales sont successivement $T_{w,} = 29.86^{\circ}\text{C}$ et $T_{w,} = 23.89^{\circ}\text{C}$, L'influence d'un MCP microencapsulé elle est visible. D'autre côté, nous avons remarqué l'existence d'un palier sur la courbe du T_w , en raison du changement de phase solide/liquide dû à la présence du paraffine..

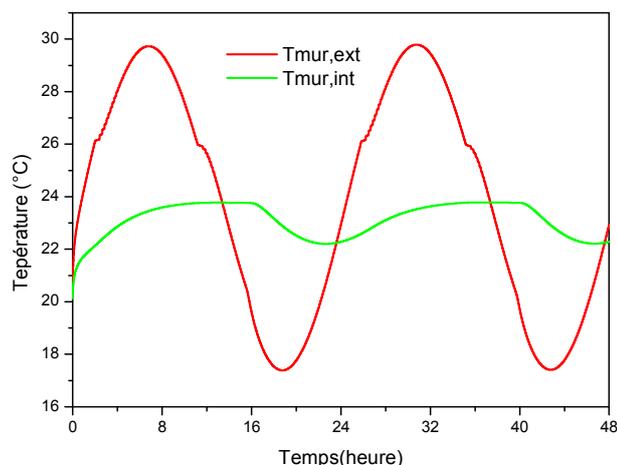


Figure.11 : Variation temporelle des températures sur les faces d'un mur constitué en Plâtre/MCP (90/10)

III.7.1. Effet de la variation de l'épaisseur de la couche plâtre/MCP

La variation de l'épaisseur du Plâtre/MCP est aussi un paramètre clé qui peut influencer sur l'efficacité thermique du bâtiment. Cela, nous a conduit à réaliser des simulations numériques pour étudier l'effet de l'épaisseur de la couche du Plâtre/MCP du mur intégrant 10% des matériaux à changement de phase sur la variation temporelle de la température et du flux de la surface intérieure de la paroi du mur. Pour cela, trois épaisseurs différentes 1 cm, 2 cm et 3 cm ont été considérées.

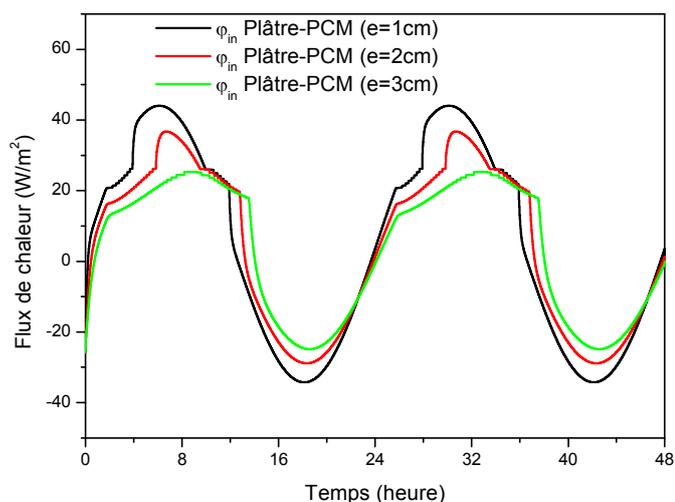


Figure.12 : Variation temporelle du flux thermique de la face interne pour différentes épaisseurs de la couche du plâtre/MCP (90/10)

La figure 10 présente une comparaison de la variation des flux thermiques de la face intérieure du mur pour trois épaisseurs, nous avons apprécié que le matériau à changements de phase microencapsulé dans le mortier ait le même comportement quelle que soit l'épaisseur. D'un autre côté, l'amplitude des oscillations du flux thermique, est influencée par la variation de l'épaisseur et elle a été diminuée avec l'augmentation de l'épaisseur. Pour le cas où l'épaisseur de la couche est de 1 cm, le flux thermique de la surface interne atteint un maximum de 43,98 W/m^2 , alors que pour le cas où l'épaisseur de la couche de 3 cm, le flux atteint un maximum de 25,41 W/m^2 . Cela montre que l'augmentation de l'épaisseur mène à avoir un mur défini par sa grande inertie thermique.

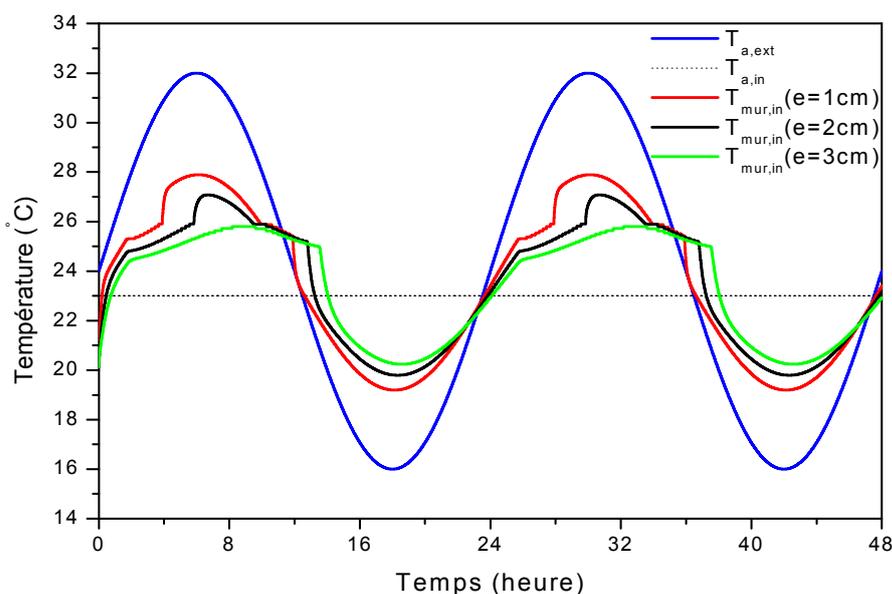


Figure.13 : Variation temporelle de la température de la face interne pour différentes épaisseurs de la couche du plâtre/MCP (90/10)

Nous avons constaté, d'après la figure 11, que la variation de la température simulée de la couche du plâtre/MCP a le même comportement pour les différents cas étudiés de l'épaisseur. D'un autre côté, l'amplitude des oscillations de la température est influencée par la variation de l'épaisseur de la couche du mortier et elle a été réduite en augmentant l'épaisseur. Par exemple, dans le cas où l'épaisseur de la couche du mortier est de 1 cm, la température de la surface interne atteint un maximum de 27,94 °C, tandis que dans le cas où l'épaisseur de la couche du mortier est de 3 cm, la température atteint un maximum de 25.88 °C. Ceci peut être expliqué par le fait que lorsqu'on augmente l'épaisseur, l'inertie thermique de la paroi augmente, l'amplitude des oscillations de la température intérieure est réduite et devient plus stable. L'oscillation observée présente également un déphasage important avec l'oscillation de la température extérieure.

III.8. Conclusion

Dans le présent travail, la performance thermique du nouveau plâtre incorporant le PCM microencapsulé, qui peut être utilisé comme élément de mur pour le contrôle de la température des bâtiments, était étudié numériquement. A cette fin, un modèle numérique, basé sur une méthode de volume fini / enthalpie a été mis en œuvre.

Ensuite, une étude paramétrique a été réalisée en utilisant modèle développé, afin d'étudier l'effet de différents paramètres tels que l'épaisseur du panneau incorporant MCP sur la régulation de la température du bâtiment. Les conclusions suivantes peuvent être tirées de nos principaux résultats : Le modèle numérique basé sur les volumes fini / enthalpie a été validée avec succès par la comparaison avec les résultats analytiques.

1. L'augmentation de l'épaisseur de la paroi plâtre/MCP améliore le confort thermique du bâtiment.
2. La diminution de la transmission de chaleur de l'atmosphère vers l'intérieure du bâtiment dans le cas du plâtre - PCM par rapport au matériau de construction classique (plâtre).

En résumé, nos résultats montrent que l'efficacité du nouveau matériau composite est remarquable. L'incorporation d'un tel matériau composite dans une enveloppe de bâtiment améliore le confort thermique, et les résultats obtenus devraient être utiles pour aider à réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments.

III.9. Conclusion Générale

Ce travail a eu pour objectif l'étude de l'incorporation des matériaux à changements de phase dans les parois d'un mur composite solaire. Le but était d'étudier l'impact des MCP microencapsulés (la paraffine) sur le confort thermique d'un local. Pour atteindre cet objectif, nous avons réalisé un code numérique permettant la détermination de la température au sein du mur et le flux thermique échangé, et de déterminer la capacité de stockage dans ces parois. Diverses étapes ont été élaborées pour atteindre ces objectifs et elles sont décomposées en trois grandes parties :

Le premier chapitre induit l'étude bibliographique sur les matériaux à changement de phase, les méthodes de stockage de la chaleur dans les bâtiments (par chaleur latente et par chaleur sensible), et les différents types existants des MCP. D'après cette analyse, nous avons conclu que le stockage de l'énergie par chaleur latente de fusion (solidification) peut améliorer les performances des systèmes solaires, en effectuant un déphasage temporel entre la production et l'utilisation de l'énergie disponible.

Le deuxième chapitre a consisté à l'amélioration d'un modèle mathématique basée sur une formulation enthalpique en couplage avec un schéma implicite, dont le but était de résoudre le problème de Stefan (solide-liquide) en 1D par modélisation et simulation numériques, plutôt que par des expérimentations. Le modèle mathématique a été mis en oeuvre sur ordinateur.

Le troisième chapitre est dédié à une analyse des résultats obtenus expérimentalement d'un dispositif réalisé dans le laboratoire de recherche. Ce dispositif a permis la caractérisation thermique d'un MCP, dont la variation de la température et du flux thermique des faces extérieures et intérieures ont été mesurées.

Ce travail a permis de montrer tout l'intérêt d'associer de la paraffine microencapsulée dans les matériaux de construction. L'utilisation des MCP permet le stockage d'une grande quantité d'énergie par chaleur latente, et d'avoir des parois légères dont l'épaisseur a été optimisée. Ceci permet de baisser les coûts de la construction des bâtiments tout en respectant les normes pour limiter les pertes thermiques. D'autre part, nous avons observé l'influence de quelques paramètres sur le comportement thermique de ces MCP lors de leur fusion/ solidification.

Les résultats obtenus ouvrent plusieurs perspectives qui nécessitent la poursuite de cette étude afin d'améliorer le fonctionnement et l'efficacité énergétique du mur proposé. Nombreuses orientations de recherche peuvent être envisagées :

- ❖ Tester autres types de matériaux à changement de phase ;
- ❖ Au niveau de l'ensemble du bâtiment, en prenant en compte toutes les sources de production ou d'économie d'énergie disponible, aussi utiliser d'autres matériaux de constructions courantes (utilisation du mortier dans notre cas) en utilisant par exemple le plâtre ;
- ❖ Pour le cas de changement de phase non isotherme, comme on a eu une difficulté de validation du code de calcul, il faut essayer d'appliquer d'autres formulations de la mise à jour de la fraction liquide pour aboutir à des résultats cohérents ;
- ❖ Pour une meilleure intégration des MCP dans l'habitat, il est essentiel de tester le comportement du mur sur de nombreux cycles afin de vérifier que les MCP conservent toutes leurs propriétés, ainsi chercher d'autres types d'isolation plus efficaces afin d'augmenter le taux de stockage de l'énergie et éviter les fuites thermiques.

III.10. Références

- [1] Jin X., Medina M. A., Zhang X, « On the placement of a phase change material thermal shield within the cavity of buildings walls for heat transfer rate reduction », *Energy* 73 (2014) 780-786.
- [2] SHARMA, A., TYAGI, V.V., CHEN, C.R., BUDDHI, V, « Review on thermal energy storage with phase change materials and applications», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, In Press, Corrected Proof, Available online 17 December (2007).
- [3] A. Benmansour et M.A. Hamdan, « Simulation du Stockage de l'Energie Thermique dans un Lit Fixe de Sphères Contenant un Matériau à Changement de Phase », Article, *Rev. Energ. Ren. Vol.4* (2001) 125-134.
- [4] Telkes, M. , « Thermal storage for solar heating and cooling. Proceedings of the workshop on solar energy storage subsystems for the heating and cooling of buildings », Charlottesville, Virginia, USA, 1975.
- [5] Lane, « Solar Heat Storage: Latent Heat Material», Volume 1: Background and Scientific Principles. USA: CRC, 1983.
- [6] Bouyer, J. « Modélisation et simulation des microclimats urbains, étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments », Thèse de doctorat, 2009. Université de Nantes, France.
- [7] L. ZALEWSKI, S. LASSUE, M. BUTEZ, « Study of solar wall - validating a simulation model », *Building and Environnement*, Vol 37, p109-121, 2002.
- [8] Michaël P, « 6 murs trombe (ademe), Maison bioclimatique», Word press, 28 Mai 2012.
- [9] Véronique F, « le solaire passif, service de thermique et combustion», cours, Faculté polytechnique de Mons, 2008.
- [10] Cheikh S, « Analyse et modélisation du comportement thermique d'un système de préchauffage d'air neuf pour l'habitat, intégrant un matériau a changement de phase », Thèse, Université d'Artois.
- [11] Stéphane L, «Habitat éco-énergétique : Conception et caractérisation de parois innovantes» Journée Habitat Durable, Laboratoire d'Artois mécanique, 2009.

- [12] Serge B.E.A, « Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment : développement d'un système actif à matériaux à changement de phase », Thèse de doctorat, Paris Tech, Novembre 2011.
- [13] Sebastien G, « La gestion intelligente de la température sous sa forme la plus légère », Site int : la maison passive.fr.
- [14] Sarra D, « D'développement de nouveaux bétons accumulateurs d'énergie: investigations expérimentale, probabiliste et numérique du comportement thermique », Thèse de doctorats, Paris Est, 2012.
- [15] Ali A.H, « Modélisation et caractérisation de modules de stockage de chaleur comprenant des matériaux à changements de phase », thèse de doctorat, Université Libanaise, 2012.
- [16] Laghzaoui. A, Peerhossaini. D, « Stockage de chaleur : Energie solaire et autres applications», Etude bibliographique, Ecole des mines de Douai, 2010.
- [17] S. Citherlet et J.Bony, « CoSyPCM Combi-système avec matériaux à changements de phase », Rapport, Ecole d'ingénierie et de gestion du Canton de Vaud, 2006.
- [18] Maha.A, « Nouveaux composants actifs pour la gestion énergétiques de l'enveloppe légère des bâtiments », thèse de Doctorat, Université J.F, Grenoble, 2004.
- [19] Vandamme. T, Poncelet. D, Subra-Paternault. P, « Microencapsulation des sciences aux technologies ». Lavoisier, 2007.
- [20] Anthony T.Chronopoulos, C.R.Swaminathan and V.R. Voller. «The Stefan problem solved via conjugate Gradient-like iterative methods on a parallel vector machine ». Int. J.of high performance computing applications 1991,5,74.
- [21] Hu H, Argyropoulos S A. « A review on mathematical modelling of solidification and melting». Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 4 (1996) 371-396.
- [22] Zohir Y, « Etude expérimentale et numérique du comportement thermique des matériaux à changement de phase. Intégration dans un composant solaire passif pour l'habitat ». Thèse de Doctorat, Université d'Artois ,2008.
- [23] Annabelle J, Zohir Y, Laurent Z, Stéphane Lassue, Daniel R.R, Jean-Paul C. « Experimental and numerical investigation of a phase change material: Thermal-energy storage and release ». Applied Energy,Vol.88, Issue 7, July 2011,pp.2454-2462.

- [24] B. Zivkovic, I Fujii, « An analysis of isothermal phase change of phase change material within rectangular and cylindrical containers », *Solar Energy*, Vol 70, Iss 1, 2001, pp 51–61.
- [25] Bruno B, « Étude de la fusion dans des enceintes munies de sources de chaleur discrètes », Thèse de Doctorat, Sherbrooke (Québec), Canada, Novembre 1998.
- [26] Stéphane G, « Contribution à l'étude des parois complexes intégration des matériaux à changement de phase : Modélisation, Expérimentation et Évaluation de la performance énergétique globale », Thèse de Doctorats, Université de la Réunion, France, Mai 2013.
- [27] V. R. Voller, C. R. Swaminathan, « General Source-Based Method for Solidification Phase Change », *Numer. Heat Transfer B*, vol. 19, pp. 175–189, 1991.
- [28] V. R. Voller, C. R. Swaminathan, B. G, « Thomas, Fixed grid techniques for phase change problems », A review, *Int. J. Num. Meth. Eng.*, 30 (1990), 875-898.
- [30] Fabiano.C.C, « Caractérisation thermique de produits de l'état liquide à l'état solide », Thèse de Doctorats, Centre de thermique de Lyon, Janvier 2006.
- [31] V.R.Voller, « Fast implicit finite-difference method for the analysis of phase change problems », *Numerical Heat transfer, part B*, vol 17, pp. 155-169, 1990.
- [32] Abbès .A, « Methodes numériques appliquées aux calculs des écoulements et du transfert de chaleur », Cours, Version 1, 2011, faculté de G.M, Algérie.
- [33] Ramdane .Y, « Simulation numérique du transfert de chaleur et de masse en milieux fluides et poreux », Thèse de Doctorats, Université Houari Boumedienne, Algérie, Décembre 2002.