



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الشهيد حمى لخضر
Université Echahid Hamma Lakhdar – El Oued

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de master académique en science technologie

Spécialité : Energétique

THEME

*Etude du transfert de chaleur dans une cavité rectangulaire
en présence du chauffage oscillatoire forcé et stockage en MCP*

Présentées Par :

Habita Khaoula

Tidjini Amal

Ben Bidari Souhaila

Encadré Par :

Dr. Ali Boukhari

Dr. ATIA Abdelmalek	Président	MCA	Université d'El-oued
Dr. Ali Boukhari	Encadreur	MCA	Université d'El-oued
Dr. BORKAN Houda	Examineur	MCA	Université d'El-oued

Année universitaire : 2022/2023

Remercîments

Nous tenons à exprimer nos profonds remerciements et témoigner notre profonde gratitude à Dr. Ali Boukhari, enseignant à l'université Hama Lakheder d'el Oued, pour son soutien, et l'attention qu'il nous a portées et pour nous avoir guidé tout au long de ce travail. Ses précieux Conseils nous ont été d'une grande utilité.

Nous remercions vivement les membres de jury Mrs Bourekan Houda et Mr Atia abd Malek d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Nous voulons également exprimer toute notre reconnaissance et

Nos sincères remerciements pour tous nos enseignants du département de l'énergétique.

Enfin, nous remercions, tous ceux qui font contribués, de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

Dédicace

*C'est tout plein de joie que je dédie ce travail à ceux qui m'ont été
Une source d'inspiration et de volonté.*

A ma mère et mon frère ,ma sœur.

A la fin je dédie très chaleureusement ce mémoire à mes amis

Habita Khaoula

Dédicace

C'est tout plein de joie que je dédie ce travail à ceux qui m'ont été

Une source d'inspiration et de volonté.

A ma mère et à mon marié et mes enfants.

A tous ma famille.

A la fin je dédie très chaleureusement ce mémoire à mes amis

Tedjini Amel

Dédicace

*C'est tout plein de joie que je dédie ce travail à ceux qui m'ont été
Une source d'inspiration et de volonté.*

A mes parents et à mon marié.

A tous ma famille.

A la fin je dédie très chaleureusement ce mémoire à mes amis

Ben Bidari Souhaila

Résumé :

L'augmentation de la température des cellules photovoltaïques (PV) réduit leur efficacité, mais l'utilisation d'un matériau à changement de phase (MCP) intégré aux modules PV peut maintenir leurs températures proches de l'ambiance.

Dans ce travail, nous effectuons des investigations numériques pour développer et analyser un modèle physique afin d'étudier le phénomène de transfert de chaleur dans une cavité rectangulaire, lorsqu'elles sont couplées à un dispositif de stockage de chaleur latente (stockage d'énergie) utilisant un MCP sachant que, le logiciel ANSYS été utilisé dans une étude numérique bidimensionnelle du processus de la fusion d'un matériau à changement de phase (MCP) placé à l'intérieur d'une enceinte rectangulaire attachée à un panneau PV. Les équations régissant ce type de phénomène sont résolues et une solution numérique est élaborée. Dans le cas où de configuration avec une ailette est utilisée pour améliorer le transfert de chaleur par conduction et renforcer l'homogénéité thermique, Concernant l'ailette interne inclus sur le panneau photovoltaïque

Mots clés :

Transfert de chaleur avec convection, simulation numérique, cavité rectangulaire, matériaux à changement de phase, chaleur latente.

Abstract :

The increase in temperature of photovoltaic (PV) cells reduces their efficiency, but the use of a phase change material (PCM) integrated into PV modules can keep their temperatures close to ambient levels.

in this work ,we carry some numerical investigations to develop and analyze a physical model for the study the heat transfert phenomenon in rectangular cavities ,while they are coupled with a PCM device used for latent heat storage (energy storage).The equations governing this type of phenomenon are solved and a numerical solution is developed. In the case where a configuration with a fin is used to enhance heat transfer by conduction and improve thermal homogeneity, regarding the inclusion of an internal fin on the photovoltaic panel.

Mots clefs :

Convection hest transfer , Numerical simulation , rectangulaire cavity , Phase change material , Latent heat storage

ملخص :

زيادة درجة حرارة خلايا الكهروضوئية (PV) التي تقلل من كفاءتها، ولكن استخدام مادة تغير الطور

(MCP) المدمجة في وحدات الكهروضوئية يمكن أن يحافظ على درجات حرارتها قريبة من مستويات البيئة. في هذا العمل، قمنا بإجراء بعض التحقيقات العددية لتطوير وتحليل نموذج فيزيائي لدراسة ظاهرة نقل الحرارة في التجاويف المستطيلة باستعمال برنامج (ANSYS) بينما تتم ربطها بجهاز تخزين الحرارة الكامنة المستخدم فيه مادة تغير الحالة (MCP). تم حل المعادلات التي تحكم هذا النوع من الظواهر وتم تطوير حل عددي. في حالة استخدام تكوين شريحة يتضمن تعزيز نقل الحرارة عن طريق التوصيل وتحسين التجانس الحراري، بالنسبة لتضمين شريحة داخلية على وحدات الكهروضوئية (PV)

الكلمات المفتاحية: نقل الحرارة بالحمل، المحاكاة العددية، تجويف مستطيل، مادة تغيير الحالة، تخزين الحرارة الكامنة

Nomenclature

T: Température.

C_p: Chaleur spécifique.

L: Chaleur latente de changement de phase.

ρ: Masse volumique.

μ: Viscosité dynamique.

β: Coefficient de dilatation thermique.

K: La conductivité thermique.

t: Variable du temps.

u: Vitesse suivant x.

v: Vitesse suivant y.

Q: Quantité de la chaleur.

x, y: Coordonnées cartésiennes.

Δt: Pas de temps.

λ: Conductivité thermique.

h: Coefficient d'échange.

S_h: Terme de source.

m: La masse.

Indices :

f : liquide.

f : fusion.

s : solide.

Abréviation :

TCS : système de contrôle thermique.

TES : stockage d'énergie thermique.

MCP : matériaux à changement phase.

SOMMAIRE

Résumé

Nomenclature

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale1

Chapitre I Généralité et Revu Bibliographique

I. 1. Introduction	3
I. 2. Stockage d'énergie	3
I. 2.1. Types de stockage d'énergie	4
I. 2.1.1. Stockage de l'énergie thermique par chaleur sensible	4
I. 2.1.2. Stockage thermochimique	5
I. 2.1.3. Stockage de l'énergie chimique	6
I. 2.1.4. Stockage de l'énergie thermique par chaleur latente	6
I. 3. Les Matériaux à changements de phases	8
I. 3.1. Définition	8
I. 3.2 Classification des matériaux à changement de phase	9
I. 3.2.1. Les Matériaux Organiques	9
I. 3.2.2. Les Matériaux Inorganiques	10
I. 3.2.3. Les matériaux eutectiques	11
I. 3.3. Les applications d'un PCM	11
I. 3.3.1. les applications spatiales de MCP	12
I. 3.3.2. les applications terrestres de MCP	12
I. 4. Propriétés thermo physique de MCP	13
I. 4.1. Définition des propriétés de MCP	13
I. 5. Stockage d'énergie par chaleur latente dans MCP	14
I. 5.1. Principe	14
I. 5.2. Application	16

I.5.3. les Avantages	17
I.5.4. les inconvénients	17
I.6. Travaux portant sur le stockage d'énergie thermique (Stockage périodique par chaleur latente) par changement de phase dans les capteurs solaires	17
1.7 Conclusion	23

Chapitre II Modalisation Mathématique

II.1. Introduction	24
II.2. Phénomène de changement de phase	24
II.3. Equation du modèle mathématique	24
II.3.1. Equation de continuité	25
II.3.2. Equation de quantité de mouvement (Navier Stokes)	25
II.3.3. Equation de conservation d'énergie	26
II.3.4. Approximation de Boussinesq	27
II.4. La théorie de solidification	27
II.4.1. Le problème de Stefan	28
II.4.2. Problème de Stefan a deux phases	28
II.4.3. Modélisation thermique de la théorie de la Solidification	28
II.5. Les méthodes d'analyse des écoulements avec changement de phase	30
II.5.1. Méthode à maillage mobile	31
II.5.1.1. Méthode à maillage fixe	31
II.5.1.2. Méthode de la capacité effective	32
II.5.2.2. Méthode enthalpique	33
II.6 Solution analytique	34
II.7. Conclusion	36

Chapitre III Méthode Numérique

III.1. Introduction	37
III.2. Description du problème résoudre	37
III.2.1. Hypothèse générale	38

<i>III.2.2. Les conditions aux limites</i>	38
<i>III.2.3. Propriétés du MCP utilisé</i>	38
<i>III.3. Présentation du logiciel ANSYS</i>	39
<i>III.3.1. Définition</i>	39
<i>III.3.2. Principe d'utilisation</i>	39
<i>III.3.3. L'interface utilisateur de ANSYS</i>	40
<i>III.3.4. Construction de la géométrie</i>	41
<i>III.3.5. Le maillage</i>	42
<i>III.3.6. Les propriétés d'étude (Setup)</i>	44
<i>III.3.7. Résolution du problème</i>	45
<i>III.4. Conclusions</i>	46

Chapitre VI Résultat et discusion

<i>VI.1. Introduction</i>	47
<i>VI.2. Méthodologie</i>	47
<i>VI.3. Evolusion de front de fusion</i>	48
<i>VI.4. Conclusion</i>	55
<i>Conclusion générale</i>	56
<i>Références bibliographiques.</i>	

LISTE DES FIGURES

<i>Figure I. 1</i> : Déférénts types de stockage d'énergie thermique.....	4
<i>Figure I. 2</i> : Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état.....	5
<i>Figure I. 3</i> : Techniques de stockage de l'énergie thermique	6.
<i>Figure I. 4</i> : Graphe de la température-enthalpie présentant l'énergie stockée dans un système de. Stockage latent en comparaison avec un système de stockage sensible.....	7
<i>Figure I. 5</i> : Schémas généraux sur le principe fonctionnement de MCP.....	8
<i>Figure I. 6</i> : Classification Des PCM proposée par Abhet	9
<i>Figure I. 7</i> : Schémas représentant les différents domaines d'applications de MCP.	12
<i>Figure I. 8</i> : Illustration de stockage d'énergie par MCP.	15
<i>Figure I. 9</i> : Représentation graphique de stockage d'énergie par MCP	15
<i>Figure I. 10</i> : Illustration de décharge d'énergie par MCP.	16
<i>Figure I. 11</i> : Représentation graphique de décharge énergie par MCP	16
<i>Figure I. 12</i> : Schéma du capteur solaire et de ses parties.....	18
<i>Figure I. 13</i> : Représentation schématique de l'appareil expérimental.....	19
<i>Figure I. 14</i> : Unité de stockage par changement de phase.	19
<i>Figure I. 15</i> : Schéma d'un collecteur solaire avec PCM.....	20
<i>Figure I. 16</i> : Schéma de principe du dispositif.....	20
<i>Figure I. 17</i> : Schéma du système utilisant.	21
<i>Figure I. 18</i> : Concept et géométrie.....	22
<i>Figure I. 19</i> : Réflecteur parabolique couplé à un distillateur solaire.	23
<i>Figure II. 1</i> : Représentation de l'enthalpie en fonction de la température.	29
<i>Figure II. 2</i> : Courbe de refroidissement lent d'un métal pur en fonction du temps.....	29
<i>Figure II. 3</i> : Capacité calorifique incluant l'effet de la chaleur latente dans un petit intervalle $2\Delta T$ au voisinage T_f	33
<i>Figure II. 4</i> : Schéma explicatif du T_{min} et T_{max} pendant ensoleillement d'une journée.	34
<i>Figure II. 5</i> : Schéma montrant la division d'une onde.	35

<i>Figure III. 1. Modèle physique et représentation du début du processus fusion du MCP</i>	37
<i>Figure III. 2 : L'interface du logiciel de simulation de ANSYS.</i>	41
<i>Figure III. 3 : Dessiné du modèle et sélection de la dimension d'espace.</i>	41
<i>Figure III. 4 : Modélisation de modèle.</i>	42
<i>Figure III. 5 : Importation de la géométrie du modèle.</i>	43
<i>Figure III. 6: Identification des régions à mailler.</i>	43
<i>Figure III. 7 : Le maillage.</i>	44
<i>Figure III. 8 : Schéma de menu de sélection les propriétés d'étude.</i>	45
<i>Figure IV. 1 : Début de la fusion $t=0s$.</i>	49
<i>FigureIV. 2 : Contour de l'interface solide_ liquide à $\dot{q}=cst$.</i>	50
<i>Figure IV. 3 : Contour de l'interface de solide_ liquide à $t=cst$.</i>	51
<i>Figure IV. 4 : Evolution de la fraction liquide à $\dot{q}=cst$ en fonction du temp pour les lignes (H/4,H/3,2H/3)</i>	52
<i>figureVI.5 : Evolution de la fraction liquide à $\dot{q}=cst$ en fonction du temp pour les lignes (L/4,L/2,2L/3).</i>	53
<i>figureVI. 6 : Évolution de fraction liquide pendant un temp constant et $\dot{q}$ variable pour les lignes(V/4,V/2,2V/3).</i>	54

Liste des tableaux

Tableau III.1 : Les propriétés du matériau à changement de phase RT4039

Tableau VI : Porcentage liquéfaction.47

Introduction générale

Introduction générale

La conduction et la convection thermique sont des modes de transfert de chaleur qui revêtent une grande importance à la fois dans le domaine fondamental et dans divers domaines d'application tels que la climatisation et le chauffage résidentiel, le refroidissement des thermosiphons, les systèmes mécaniques ou électroniques, les systèmes de chauffage des fluides (air ou eau) utilisant des capteurs solaires, le séchage des produits agro-alimentaires, les échangeurs de chaleur et les serres agricoles.

Lorsqu'un matériau pur passe de l'état solide à l'état liquide lors de sa fusion, la température du front de fusion reste constante tout au long du processus, indépendamment de la température de la source de chaleur qui provoque ce changement de phase. Cette caractéristique peut être utilisée pour le contrôle thermique des panneaux solaires qui génèrent de la chaleur. Cela peut être réalisé en stockant la puissance thermique générée à l'intérieur de panneaux solaires dans un réservoir rempli d'un matériau à changement de phase (MCP).[1]

La source de chaleur, qui produit une puissance Q , se réchauffe au fil du temps. Les surfaces de la source sont exposées à l'air ambiant, ce qui entraîne des mouvements de convection naturelle dus à la différence de température entre la source et l'air environnant. Lorsque la source est confinée dans une cavité remplie d'un matériau à changement de phase (MCP), la puissance générée est absorbée par le MCP à l'état solide. Lorsque la température du MCP atteint la température de fusion T_f , le MCP commence à fondre et la puissance générée est absorbée sous forme de chaleur latente par le front de fusion, ce qui permet de stabiliser la température de la source de chaleur pendant une période relativement longue. Cela est possible car le changement de phase se produit à une température constante $T = T_f$ pour le matériau pur.[1]

L'utilisation de cette stratégie de refroidissement présente l'avantage que les matériaux à changement de phase (MCP), qui ont une haute densité énergétique, peuvent absorber une quantité importante de chaleur générée par les panneaux solaires sans nécessiter l'utilisation de ventilateurs. Cette méthode est particulièrement adaptée dans des situations où le refroidissement par convection naturelle ou forcée à l'air ambiant n'est pas pratique, comme dans les environnements désertiques.[1]

Notre objectif consiste à simuler le transfert thermique et convectif du matériau à changement de phase (MCP) dans une cavité bidimensionnelle chauffée de manière différentielle. Cette simulation est réalisée en utilisant le logiciel de calcul "FLUENT", qui repose sur la méthode des volumes finis. Ce logiciel peut désormais être considéré comme une véritable "expérience numérique", permettant ainsi de reproduire les phénomènes thermiques avec précision.

Notre étude est de réaliser une simulation du transfert thermique et convectif du matériau à changement de phase (MCP) dans une cavité bidimensionnelle chauffée de manière différenciée. Cette simulation est réalisée à l'aide du logiciel de calcul "FLUENT", qui repose sur la méthode des volumes finis. L'utilisation de ce logiciel permet d'obtenir une véritable "expérience numérique" lorsque les simulations sont réalisées avec rigueur. L'avantage des "expériences numériques" réside dans la disponibilité immédiate de toutes les variables physiques liées à l'écoulement, telles que champ de vitesse, champ de pression, champ de température...etc.

Afin d'atteindre les objectifs établis dans cette étude, le travail a été divisé en quatre chapitres distincts.[2]

Chapitre1 : Le contenu aborde des informations générales sur les diverses techniques de stockage de l'énergie thermique, ainsi que sur les matériaux utilisés pour les changements de phase.

Chapitre2 : Ce chapitre se concentre sur la modélisation mathématique du phénomène de changement de phase associé au transfert thermique, ainsi que sur le processus de stockage et de déstockage de chaleur dans les matériaux à changement de phase.

Chapitre3 : développe l'approche numérique utilisé pour résoudre les problèmes physiques des transferts thermiques permettant le refroidissement du panneau photovoltaïque par fusion du MCP et aussi une brève présentation du logiciel ANSYS.

Chapitre4 : on présente les résultats de la simulation numérique, et ce en étudiant les l'évolution des paramètres étudié tel que le front de fusion.

Une conclusion générale : le travail a été conclu par la reprise des principaux résultats obtenus et par des recommandations pour de futures contributions dans le domaine.

CHAPITRE I

Généralité et revue bibliographique

I.1 Introduction

L'objet de ce chapitre est de présenter le contexte de l'étude et de sélectionner le matériau et la technique de stockage de l'énergie thermique mise en œuvre dans ce mémoire.

Le stockage de l'énergie thermique a été réalisé pour estimer les paramètres utilisés pour la caractérisation des matériaux à changement de phase (PCM) lors du passage de l'état liquide à l'état solide (fusion-solidification). L'avancement de ces techniques est dû principalement au progrès des outils informatiques et au développement des nouvelles méthodes capables de représenter avec bonne précision, les divers processus des transferts thermiques (conduction, convection, changement de phase, etc.). La caractéristique fondamentale du procédé de la fusion et de la solidification est la présence d'une frontière fixe avec un petit vide pensif ça dépend le matériau et ses caractéristiques.

Dans ce chapitre on présente un petit problème du problème des Matériaux à Changement de Phase (MCP).

I.2 Stockage d'énergie:

Un système de stockage de l'énergie thermique Il concerne principalement la chaleur provenant du soleil. Les technologies de stockage de l'énergie peuvent être classifiées dans diverses catégories selon différents critères. Si le critère est la plage de température, les systèmes de stockage sont divisés en « stockage de la chaleur » et « stockage du froid ». Si le critère est la durée de stockage sont considérées deux choses, « le stockage long temp » et le stockage « court temp ». D'autre part, si le critère est l'état du matériau stockage, il existe trois principaux types :

- stockage par chaleur sensible
- stockage par chaleur latente
- stockage par chaleur thermochimique

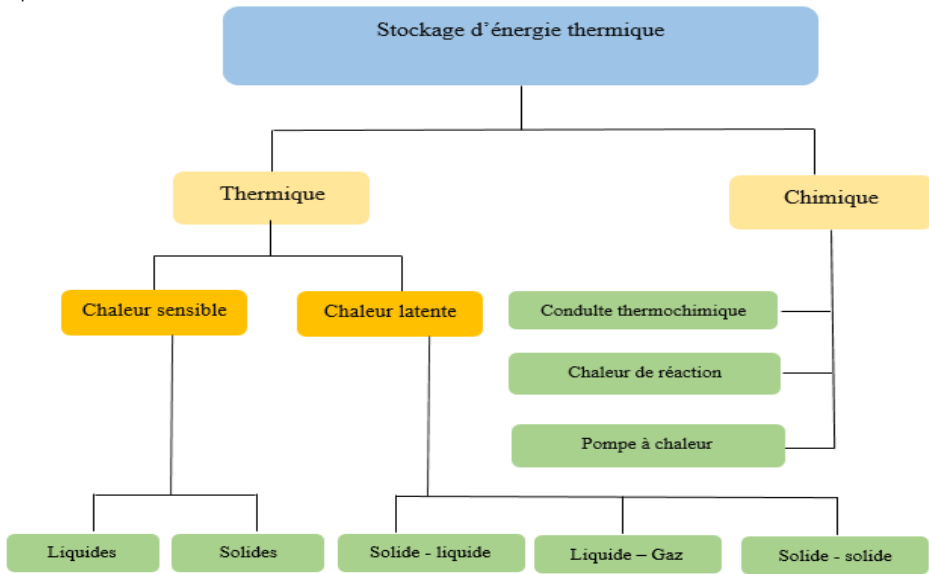


Figure I. 1 : Déférénts types de stockage d'énergie thermique.

Les systèmes de stockage de l'énergie thermique peuvent aussi être classés en deux catégories : le terme de stockage actif est utilisé dans le matériau de stockage circule dans le système. Par contre, dans le cas d'un système de stockage d'énergie passif, le matériau de stockage ne circule pas dans le procédé.

I. 2. 1 Types de stockage d'énergie:

I. 2. 1. 1 Stockage de l'énergie thermique par chaleur sensible:

Dans le cas du stockage par chaleur sensible, l'énergie est emmagasinée sous forme d'augmentation de température du matériau.la quantité d'énergie stockée est proportionnellement directement au volume, à l'élévation de température, et à la capacité calorifique du matériau de stockage. Dans ce cas, le matériau cédé l'énergie dans une gamme de températures excluant le changement d'état la variation de la quantité d'énergie Q récupéré avec le matériau est définis par l'équation suivante :

$$Q=\int_{Ti}^{Tf} m. cp. dt \tag{I.1}$$

avec :

Q : est la quantité d'énergie stockée (J).

m : est la masse du matériau de stockage (kg).

C_p : La chaleur spécifique du matériau de stockage (J.Kg⁻¹.K⁻¹).

dT: est la variation infinitésimale de la température durant l'étape de charge(k).

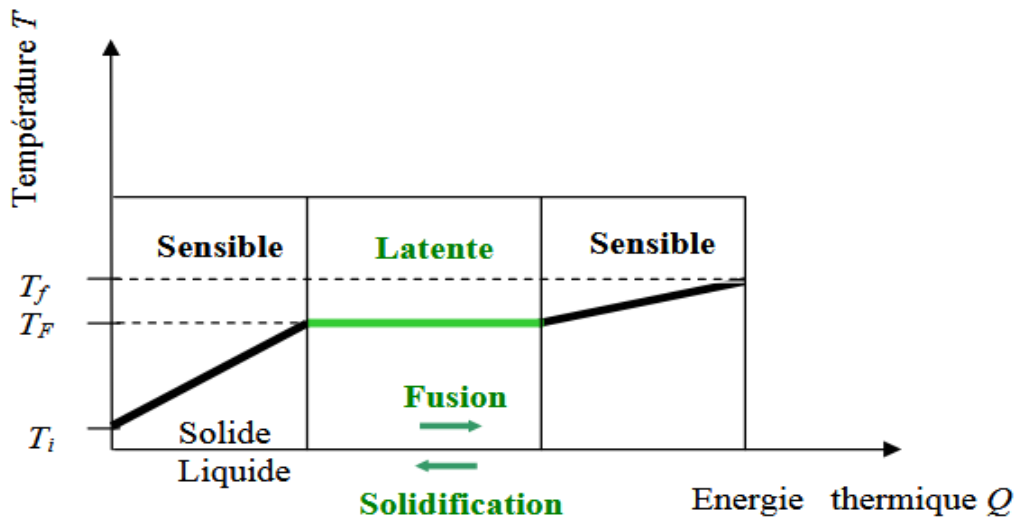


Figure I. 2: Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état [16].

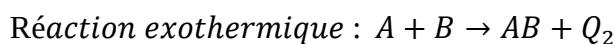
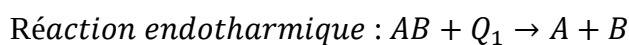
Le stockage par chaleur sensible s'accompagne d'une élévation de la température mais la structure moléculaire du matériau de stockage ne change pas. Selon l'état physique du matériau de stockage [1].

I.2.1.2 Stockage thermochimique:

Certaines réactions chimiques réversibles peuvent être utilisées comme solution pour le stockage thermique de l'énergie. Ce type de stockage est défini par : stockage thermochimique.

L'énergie thermochimique c'est la chaleur absorbée ou libérée au cours d'une réaction chimique endothermique ou exothermique. Le stockage de cette énergie est basé sur l'énergie des liaisons des composés chimiques au cours des réactions chimiques réversibles.

Le principe de base du stockage thermochimique est décrit par les équations :



La quantité d'énergie qui peut être stockée dans une réaction chimique (I.2) est la somme des énergies sensibles des matériaux et de la chaleur de réaction. La quantité d'énergie stockée est exprimée selon la relation suivante :

$$E = \sum_{i=1}^N \int_{T_i}^{T_f} m_i \cdot C_p \cdot dT + n_A \cdot \Delta H_r \quad (I.2)$$

avec :

E : est la quantité d'énergie stockée (J).

n_A : est le nombre du produit A (mol).

ΔH_r : est l'enthalpie de la réaction ($J \cdot mol^{-1}$).

I. 2. 1. 3. *Stockage de l'énergie chimique :*

Le stockage d'énergie par réactions chimiques est un procédé lors duquel les molécules d'adsorbat sont fixées par liaison covalente à la surface de l'adsorbant provoquant l'irréversibilité du mécanisme. Ce type de stockage consiste par exemple à utiliser l'énergie solaire pour initier une réaction chimique endothermique. La chaleur est stockée au sein du système et peut être restituée souvent à l'aide d'un catalyseur [17].

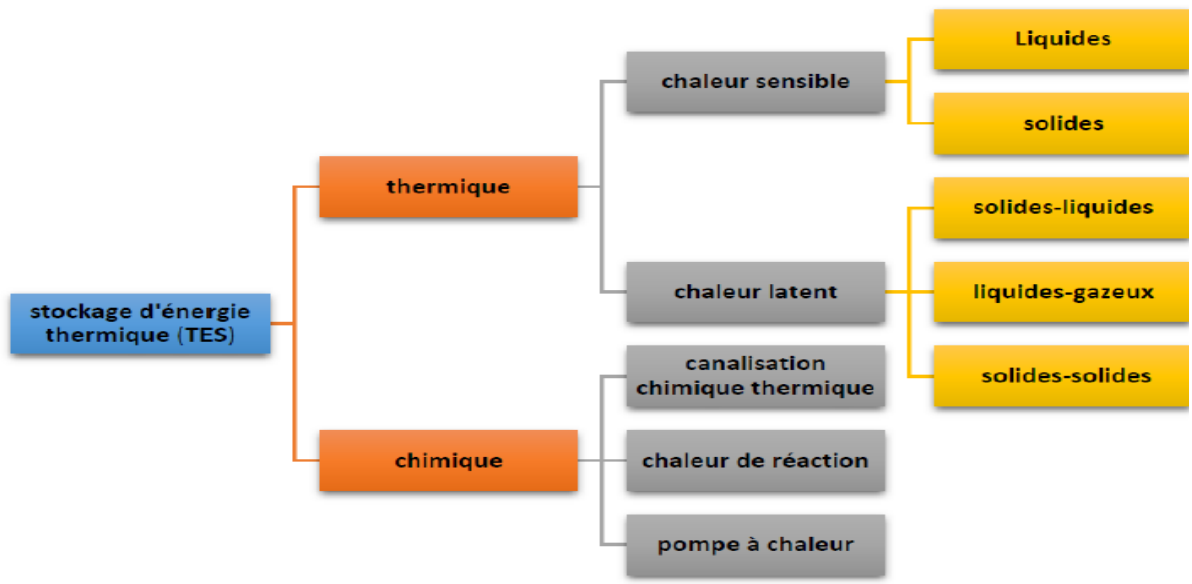


Figure I. 3: Techniques de stockage de l'énergie thermique [17].

I. 2. 1. 4 *Stockage de l'énergie thermique par chaleur latente:*

Le stockage par chaleur latente est une solution de stockage thermique qui exploite la chaleur latente d'un Matériaux à Changement de Phase (MCP), autrement dit sa capacité à passer de l'état solide à l'état liquide(fusion) sous l'effet de chaleur. L'énergie de changement de phase est absorbée lors de la fusion du MCP et est restitué lors de sa solidification. Cette solution nécessite l'utilisation d'un fluide caloporteur pour transférer la chaleur de la source à l'unité de stockage. Le MCP subissant des cycles de fusion/solidification, il ne peut être utilisé directement comme fluide de transfert.

La quantité de chaleur stockée et restituée dépend de la masse du matériau et selon l'équation (1.3) :

$$Q_{latente} = m. Ls$$

(I.3)

avec :

m: La masse du matériau de stockage (Kg).

Ls: La chaleur massique de changement d'état du matériaux (J/Kg).

La quantité de chaleur stockée dans un système latent est présentée sur le graphe température énergie de la Figure 1.3.

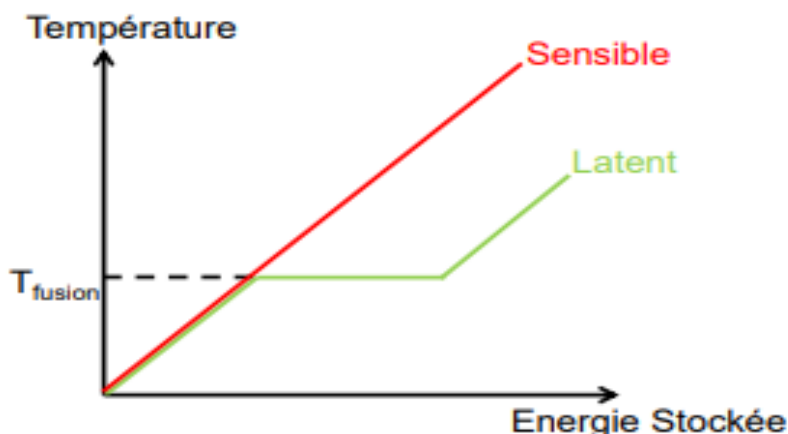


Figure I. 4: Graphe de la température-enthalpie présentant l'énergie stockée dans un système de. Stockage latent en comparaison avec un système de stockage sensible [4]

Lorsque le matériau est chauffé ,il accumule d'abord une quantité d'énergie sensible lui permettant d'atteindre la température de changement de phase .A ce stade ,l'énergie apportée au matériau cesse de la chauffer et est utilisée à la place pour accomplie le changement de phase .la chaleur est stockée de façon isotherme à condition que le corps soit pur sous forme de chaleur latente .Une fois que la transformation est complète ,la température augmente de nouveau proportionnellement à l'énergie apportée jusqu'à atteindre la température de la source de chaleur .Il est donc impossible de ne stocker que la chaleur latente puisque pour arriver au point de changement de phase ,le matériau doit subir une montée en température ,stockant inévitablement une part d'énergie sensible .la quantité d'énergie stockée peut être exprimée pour le cas de la transition solide -liquide selon l'équation (1.4)

$$E = \int_{T_1}^{T_2} m \cdot c_{p,s} \cdot dT + m \cdot \Delta L + \int_{T_1}^{T_2} m \cdot c_{p,i} \cdot dT \quad (I.4)$$

avec :

E : est la quantité d'énergie stockée(J).

m : est la masse du matériau de stockage (Kg).

$c_{p,s}$ et $c_{p,i}$: sont respectivement les chaleurs spécifiques des matériaux solide et liquide ($J.Kg^{-1}.K^{-1}$).

ΔL : est l'enthalpie de changement de phase ($J.Kg^{-1}$). dT : est la variation de la température durant l'étape de charge (K). Les matériaux utilisés pour la chaleur latente MCP peuvent être employés pour leur transition solide-solide ou solide-liquide, solide-gaz.

1.3 Les Matériaux à changements de phases:

1.3.1 Définition:

Un matériau à changement de phase (MCP) est une substance composée de molécules. Son principe est simple. Lorsque la température augmente, le matériau change de phase de solide à liquide. La réaction étant endothermique, le MCP absorbe la chaleur. De même, lorsque la température diminue, le matériau change de phase de liquide à solide. La réaction étant exothermique, le MCP dégage la chaleur [15].

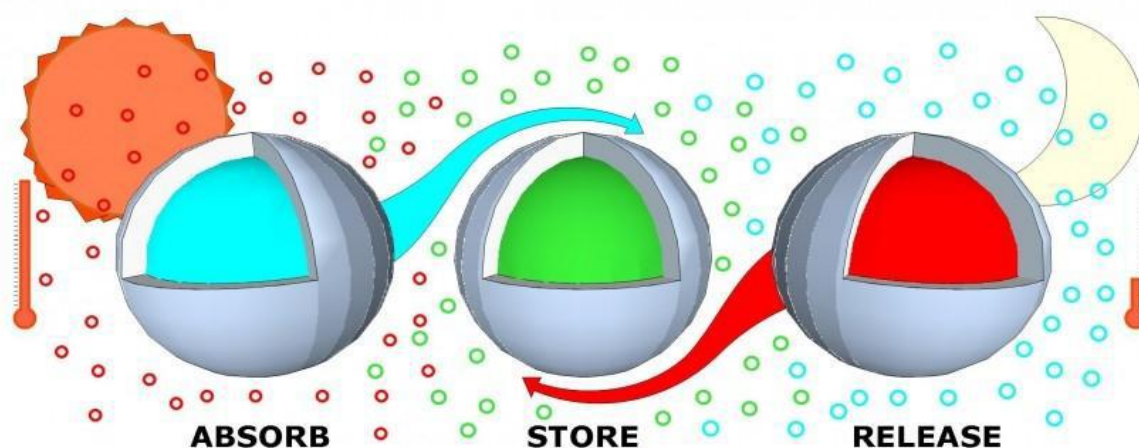


Figure 1.5: Schémas général sur le principe fonctionnement de MCP.

Ce type de matériau a la capacité de stocker et de libérer des quantités d'énergie sous forme de chaleur latente. Le stockage de la chaleur latente peut être obtenu grâce aux changements de phase. Le MCP utilise la chaleur latente du changement de phase pour contrôler les températures dans une plage spécifique. L'énergie utilisée pour modifier la phase du matériau, (la température de changement de phase est autour de la température ambiante de confort souhaitée) conduira à un climat intérieur plus stable et confortable [3].

I.3.2 Classification des matériaux à changement de phase:

La première classification des substances utilisables pour le stockage thermique par chaleur latente à états établi par Abhat [5]. Une revue spéciale sur les matériaux à changement de phase utilisé dans les bâtiments a été publié par Cabeza [6] figure (I.6). Comme dit précédemment on peut les trier sous trois grandes familles, Chaque groupe se caractérise par Une plage de température de fusion et une plage d'enthalpie de fusion.

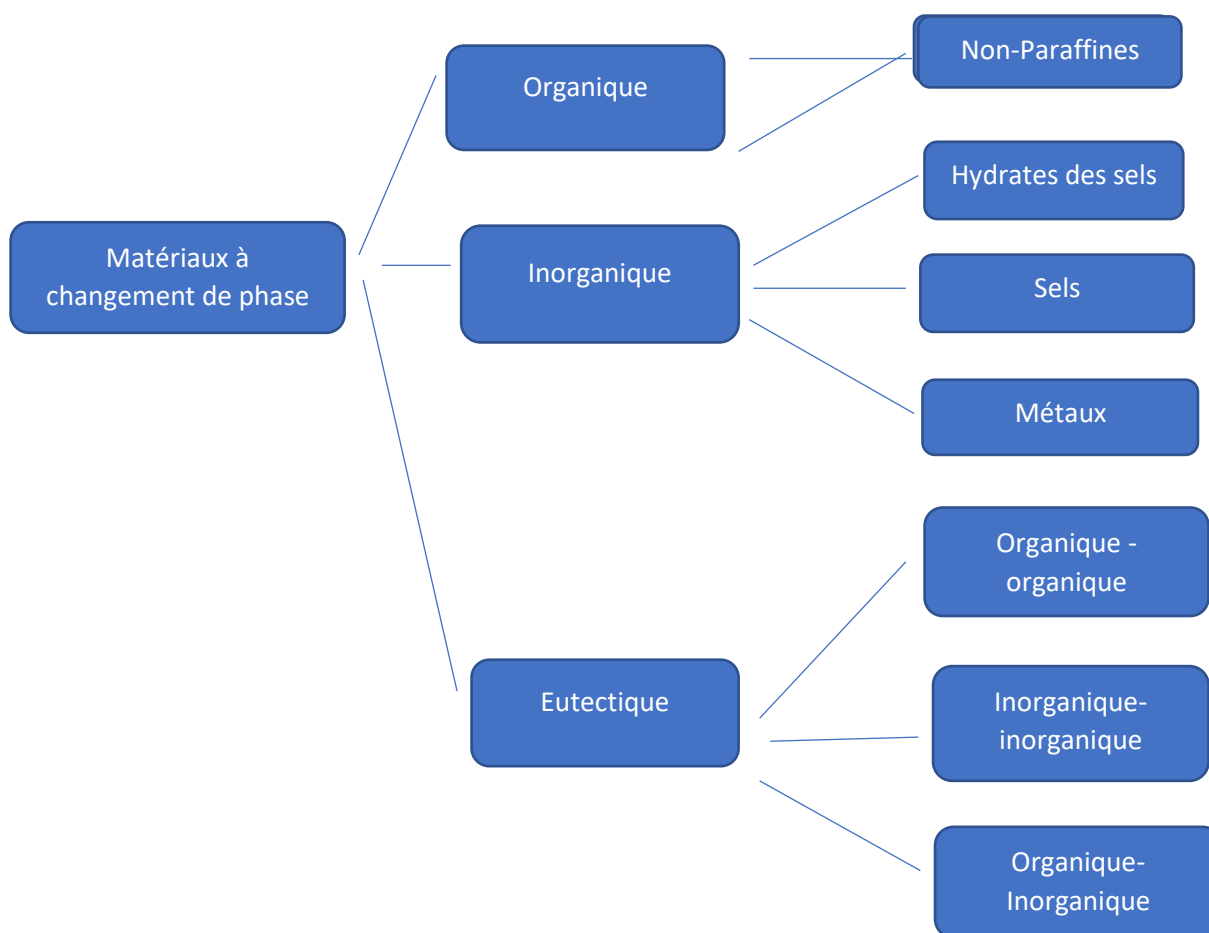


Figure I.6: Classification Des PCM proposée par Abhet [5].

I.3.2.1 Les Matériaux Organiques:

Dans cette famille, on peut trouver les paraffines, les acides gras, les alcools gras, les esters et les polyols. Les plus connus et utilisés sont les paraffines. Ce sont des alcanes avec une formule générale de C_nH_{2n+2} . Plus la longueur de la chaîne hydrocarbonée est élevée, plus la température de fusion et la chaleur latente sont grandes.

Ces matériaux présentent des enthalpies de changement de phase comprises entre

150 et 260 ($J.g^{-1}$), et une capacité thermique variant de 2 à 2.3 ($J.g^{-1}.K^{-1}$). Leur retrait volumique varie de 7% à 15% lors de la solidification. La densité énergétique des paraffines est de l'ordre de 2.10^5 ($Kj.m^3$).

Ces matériaux sont aussi non toxiques et proposent une large gamme de température de changement de phase allant jusqu'à 120°C. Ces produits sont largement disponibles dans le commerce. Cependant, leur majeur inconvénient, est leur faible conductivité thermique qui est de l'ordre de 0.2 ($W.m^{-1}.K^{-1}$), ce qui limite les transferts thermiques dans le milieu du stockage.

Les acides gras sont également largement étudiés. Ils proposent aussi une large gamme de température de changement de phase. Leur chaleur latente est du même ordre de grandeur que celle des paraffines. Cependant, ils présentent un problème de stabilité thermique au-dessus du point de fusion. Ce problème est dû à la vaporisation du matériau quand il est liquide. Ceci est également observé pour les paraffines, mais moins significatif que les acides gras.

Les polyols, ou sucre alcools, peuvent présenter des densités énergétiques plus importantes par rapport aux paraffines et aux acides gras. Ils sont non toxiques et disponibles. Leur majeur inconvénient est un degré de surfusion élevé. Ceci signifie que lors de la cristallisation, le MCP peut rester liquide même en dessous de leur température de fusion. [7]

1.3.2.2 Les Matériaux Inorganiques:

Les matériaux inorganiques sont regroupés en deux groupes : les métaux et les sels hydratés. Les métaux sont utilisés pour des températures de fonctionnement pouvant atteindre 1000°C. Ils présentent l'avantage d'être de bons conducteurs thermiques, et d'avoir une chaleur latente élevée pouvant aller jusqu'à 750 ($J.g^{-1}$). Néanmoins leur coût et les problèmes de corrosion freinent leur usage.

Les sels hydratés sont utilisables dans une large gamme de température, de 250 à 1700°C. Ces MCP présentent l'avantage d'une meilleure conductivité thermique (0.8 $W.m^{-1}.K^{-1}$) par rapport aux paraffines (0.2 $W.m^{-1}.K^{-1}$). Leur chaleur latente peut atteindre les 300 ($J.g^{-1}$). L'expansion thermique est plus faible en comparée aux matériaux organiques qui est de l'ordre de 7% L'inconvénient majeur de ce type de MCP est leur surfusion, qui peut atteindre une centaine de degrés sur certains composés. Un autre point non négligeable est la corrosion avec les métaux, rendant la conception des réservoirs plus compliquée [8].

1.3.2.3. Les matériaux eutectiques :

Les eutectiques peuvent être organiques ou inorganiques, L'eutectique est un mélange de deux ou plusieurs composants qui n'interagissent généralement pas pour former un nouveau composé chimique (En chimie, un corps pur est composé d'un seul type de constituant contrairement au mélange) [9]. Mais ces composés, à certaines proportions, inhibent le processus de cristallisation des composants, ce qui donne un système ayant une température de fusion inférieure à celle de ses composants.

Chacun des deux corps a une fusion et une solidification congruente, c'est-à-dire une fusion ou solidification dans laquelle les deux phases sont de même composition. Le changement d'état des eutectiques se fait presque toujours sans ségrégation. Certains eutectiques ont des températures de fusion optimales pour une application dans le cadre du stockage d'énergie thermique [10]. Ils peuvent être utilisés comme matériaux de stockage dans les collecteurs destinés au chauffage et au rafraîchissement des bâtiments.

Principaux avantages :

- Ils ont un point de fusion net similaire à une substance pure
- Leurs chaleurs latentes volumétriques sont légèrement supérieures à celle des composés organiques purs.

Principaux inconvénients :

- On a peu de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux.
- Ils sont peu utilisés au niveau des systèmes industriels.

1.3.3 Les applications d'un PCM:

L'utilisation des matériaux à changement de phase pour le contrôle thermique n'est pas un concept nouveau ; considérez la glacière utilisée pour stocker les aliments périssables avant que des systèmes de réfrigération active efficaces et peu coûteux ne soient développés. Ces dernières années, cependant, les efforts de recherche et de développement dans le domaine de la technologie MCP ont abouti à de nouvelles applications MCP, à la fois pour les environnements terrestres et spatiaux. Des études récentes indiquent que l'application la plus avantageuse des matériaux à changement de phase sera peut-être dans l'environnement spatial [11].

Les applications MCP sont divisées en deux catégories :

- (1) Les applications spatiales MCP.
- (2) Les applications terrestres MCP.

Les applications réelles et potentielles sont incluses et des exemples sont fournis [11].

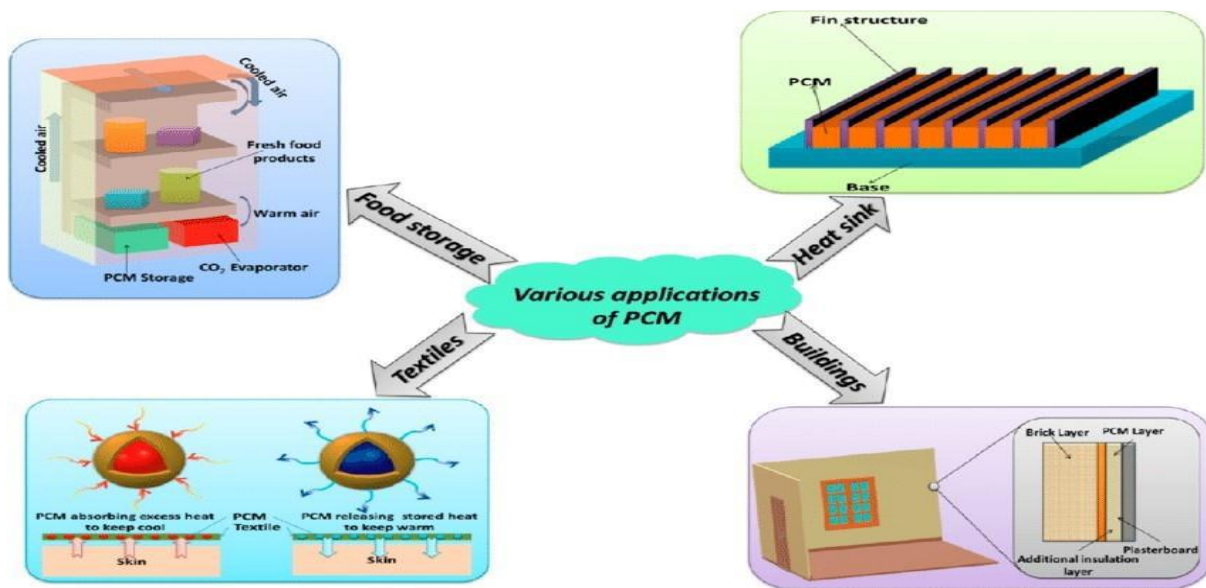


Figure I. 7: Schémas représentant les différents domaines d'applications de MCP.

1.3.3.1 les applications spatiales de MCP:

L'utilisation du MCP dans les systèmes de contrôle thermique (TCS) et les systèmes de stockage d'énergie thermique (TES) dans l'environnement spatial a suscité un large intérêt ces dernières années. Les domaines généraux des applications spatiales MCP sont indiqués ci-dessous [11] :

- système de contrôle thermique des composants électroniques.
- dispositifs de stockage d'énergie thermique.
- appareils électriques.
- dispositifs expérimentaux.
- conteneurs de fret.
- condensateurs thermiques.
- contrôle thermique délicat des instruments.
- contrôle thermique des composants isolés thermiquement.

1.3.3.2 les applications terrestres de MCP:

L'application terrestre des matériaux à changement de phase est bien connue dans des systèmes tels que les conteneurs portables réfrigérés, les glacières et coffres, les tasses à parois

froides, etc. Cependant, d'autres applications MCP nouvelles ont été envisagées et certaines d'entre elles sont nommées ci-dessous [11] :

- contrôle thermique précis des instruments.
- Dispositifs de stockage d'énergie solaire.
- Contrôle thermique des composants d'aéronefs et de missiles.
- Autres Applications Terrestres Exotiques de MCP.

1.4 Propriétés thermo physique de MCP:

La capacité unique des matériaux à changement de phase (MCP) à absorber et à libérer des grandes quantités de chaleur sans changement de température appréciable aura sans aucun doute de nombreuses ramifications dans les domaines du contrôle thermique des engins spatiaux et du stockage d'énergie. Bien que l'effort majeur à ce jour dans la technologie MCP se soit largement limité à des recherches théoriques et empiriques préliminaires, les systèmes de vol MCP réels prévus pour une utilisation sur le véhicule mobile lunaire et le Skylab.

Attestent de la praticité de la technique MCP. Pour l'ingénieur concepteur, cependant, il existe encore un grand écart entre les résultats de la recherche et les systèmes de vol réels [11].

1.4.1 Définition des propriétés de MCP:

Amorphe : Sans forme définie ; pas cristallin. Les solides amorphes peuvent être considérés comme des liquides surfondus. Ils n'ont pas un point de fusion pointu comme un solide cristallin. Le verre est un solide amorphe typique [11].

Température d'auto – inflammation: La température à laquelle un matériau s'enflammera automatiquement et maintiendra la combustion en l'absence d'étincelle ou de flamme.

Calorie (cal): La quantité de chaleur nécessaire pour élever 1 *gramme* d'eau d'un degré *Kelvin* à 288 K. Elle équivaut à 0,00396 *Btu* ou 4,184 *Joules* [11].

Coefficient d'expansion de volume: Le rapport de la variation de volume par degré ° *Kelvin* au volume à 273 *Kelvin* [11].

Cristal : Un solide dans lequel les atomes ou les molécules sont disposés selon un motif répétitif régulièrement espacé. La plupart des solides cristallins sont constitués de millions de minuscules monocristaux appelés grains. A : n'importe quel monocristal, peu importe la taille d'un grain. Les cristaux d'une même substance présentent tous les mêmes structures géométriques ; les faces cristallines correspondantes ont les mêmes angles entre elles. Les cristaux varient considérablement, selon le type et la force des liaisons entre les atomes, les ions ou les molécules constitutifs. La structure cristalline a été utilisée comme base pour

l'identification par rayons X, électron. Et les méthodes de diffraction des neutrons. Les cristaux peuvent être classés en types géométriques qui incluent : cubique simple, cubique à corps-c, cubique à faces centrées, tétraogonales, orthorhombiques, monocliniques, tricliniques et hexagonales [12, 13].

Inflammable: Propriété d'un matériau qui lui permet de s'oxyder rapidement et de libérer de la chaleur de combustion lorsqu'il est exposé à une flamme ou à un feu, et permet une combustion continue après que la source d'inflammation externe est retirée [14].

Point d'éclair: La température à laquelle un liquide ou une vapeur combustible s'enflamme et brûle. L'incendie qui s'ensuit est transitoire et auto-extinguible. Il existe plusieurs tests de point d'éclair communs et chacun donne une valeur différente pour la même substance.

Point de congélation : La température à laquelle un matériau se solidifie en refroidissant à partir d'un état fondu. Le point de congélation n'est pas toujours le même que le point de fusion [14].

Capacité calorifique à pression constante (C_p): quantité de chaleur nécessaire pour élever une unité de masse de matériau homogène d'une unité de température avec une pression maintenue constante. La capacité calorifique est exprimée en énergie par unité de masse par unité de changement de température [14].

Hygroscopie: Propriété d'un matériau qui lui permet d'absorber et de retenir l'eau de l'air ambiant. Les propriétés d'un matériau peuvent être considérablement altérées par l'eau absorbée [14].

Point de fusion: La température à laquelle se produit la liquéfaction d'un solide. Les alliages et les matériaux impurs ont une plage de fusion. Le point de fusion n'est pas toujours le même que le point de congélation [14].

Agents oxydants: Généralement sources d'oxygène. Certains matériaux sont chimiquement constitués de telle sorte qu'ils puissent fournir de l'oxygène à une réaction, même en l'absence d'air [14].

Changement de phase: le changement d'un matériau dans un état physiquement distinct et mécaniquement séparable (comme un état solide défini) en une autre forme distincte (comme un liquide), les changements de phase se composent de quatre types : solide-solide, solide-vapeur, solide-liquide et liquide-vapeur [14].

1.5 Stockage d'énergie par chaleur latente dans MCP:

1.5.1 Principe: Le stockage par chaleur latente est une solution de stockage thermique qui exploite la chaleur latente d'un Matériau à Changement de Phase (MCP), autrement dit sa capacité à passer de l'état solide à l'état liquide (fusion) sous l'effet de la chaleur [15]. L'énergie

de changement de phase est absorbée lors de la fusion du MCP et est restituée lors de sa solidification. Cette solution nécessite l'utilisation d'un fluide caloporteur pour transférer la chaleur de la source à l'unité de stockage. Le MCP subissant des cycles de fusion/solidification, il ne peut être utilisé directement comme fluide de transfert. Les technologies de transfert de chaleur sont diverses : échangeur tubes ailettes, échangeur multitubes, encapsulation du MCP [15].

Les cycles de stockage d'énergie expliqués suivants les schémas suivants :

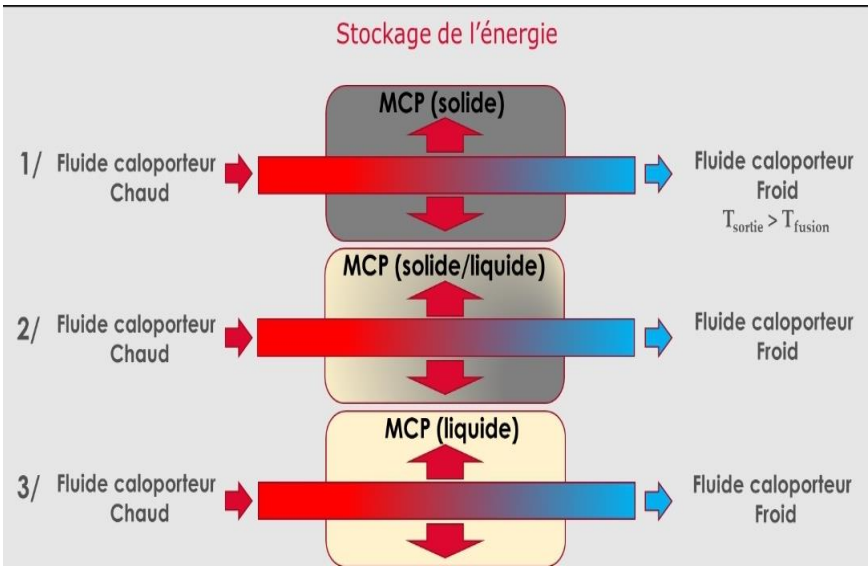


Figure I.8: Illustration de stockage d'énergie par MCP.

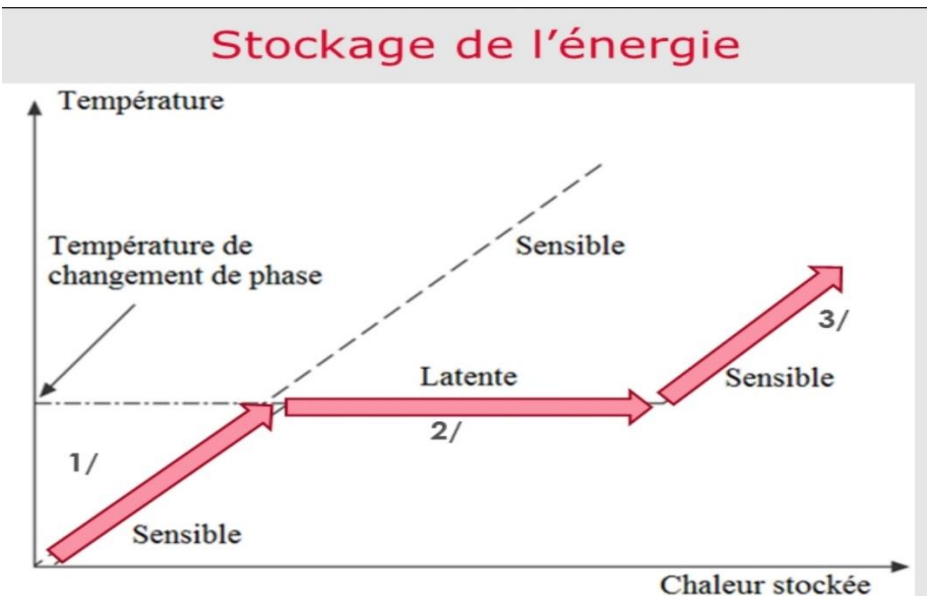


Figure I.9: Représentation graphique de stockage d'énergie par MCP.

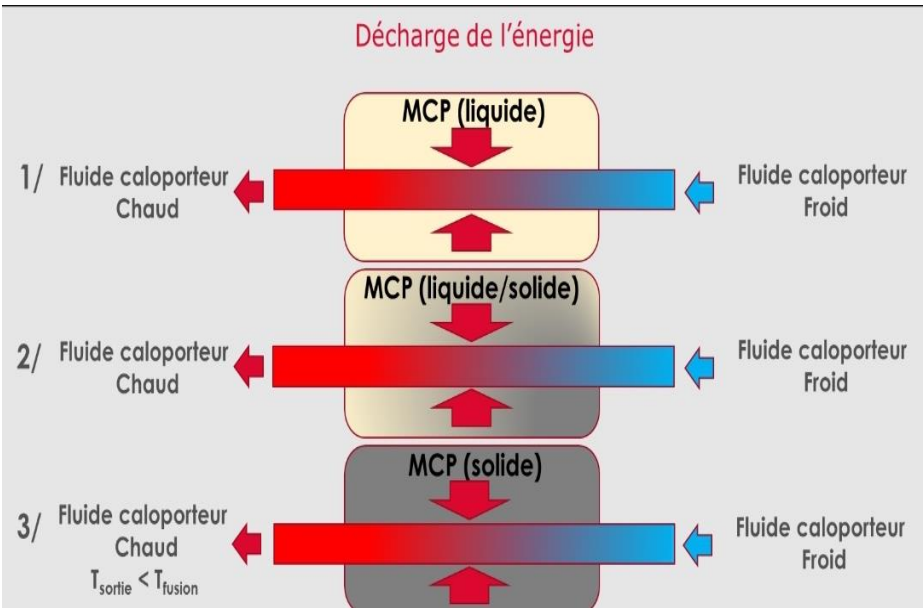


Figure I. 10: Illustration de décharge d'énergie par MCP.

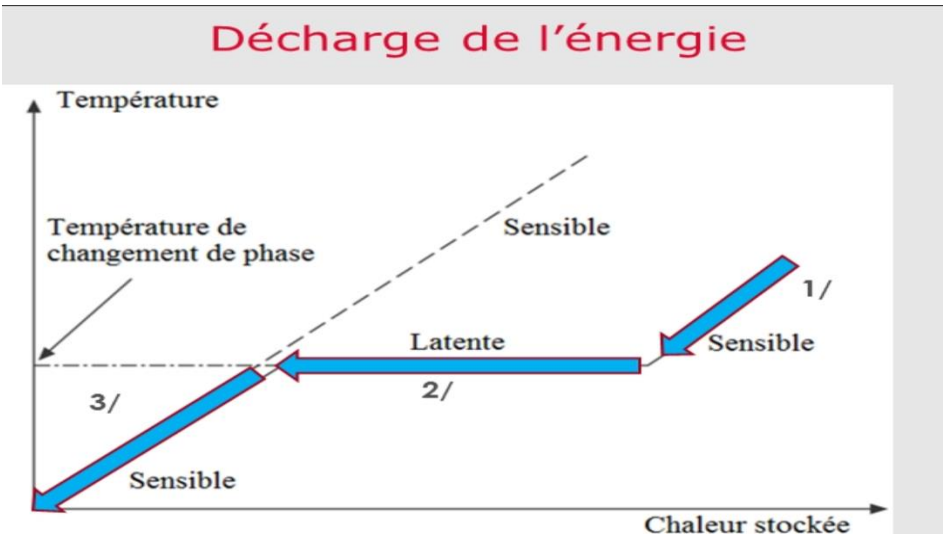


Figure I. 11: Représentation graphique de décharge énergie par MCP.

I.5.2 Application: Le stockage thermique par les MCP peut être utilisé dans diverses applications et industries [15] :

- Stockage sur un réseau de chaleur (en développement).

- Stockage de frais pour la climatisation.
- Stockage de chaleur issue de la récupération de chaleur fatale.
- Stockage de froid (réfrigération et transport des produits agro-alimentaires ou pharmaceutiques par exemple).
- Stockage de chaleur issue de la récupération de chaleur fatale.

I.5.3 les Avantages:

- Densité énergétique importante par rapport au stockage sensible.
- Température de décharge stable.
- Non toxique.
- Pallie le décalage entre la production de chaleur fatale (récupération d'énergie) et les besoins en chaleur sur le site (utilisation de l'énergie récupérée) [15].

I.5.4 les inconvénients:

- Durée de stockage limitée (pertes thermiques).
- Coûts relativement importants comparés au stockage sensible.
- Faible conductivité thermique ($\lambda \ll 0.5 \text{ W/m.K}$) limitant les vitesses de charge et de décharge et imposant de grandes surfaces d'échange [15].
- température de fusion limitée.

I.6 Travaux portant sur le stockage d'énergie thermique (Stockage périodique par chaleur latente) par changement de phase dans les capteurs solaires:

Ces dernières années, une attention considérable a été portée à la réduction des coûts de l'énergie solaire et à l'amélioration de l'efficacité du stockage de l'énergie solaire. Pour le stockage de l'énergie thermique, deux types de systèmes ont été développés : le stockage par chaleur sensible et le stockage par chaleur latente. Comparé au stockage par chaleur sensible, le stockage par chaleur latente présente plusieurs avantages, notamment une grande capacité de stockage et un comportement isotherme lors de la fusion. Le stockage thermique par changement de phase est une technologie innovante et prometteuse en termes d'économie d'énergie. De nombreux travaux sont en cours sur l'utilisation de matériaux à changement de phase pour le stockage de l'énergie solaire par chaleur latente, ce qui constitue une application importante.

Kurklu et al [18], ont réalisé un nouveau type de capteur solaire qui présente deux sections, voir Figure 1.20, la première est rempli avec de l'eau et l'autre avec un matériau à changement de phase dont la température de fusion est située entre 45-50 °C. Les résultats expérimentaux ont montré que, pour une journée avec un ensoleillement élevé, la température

du réservoir est maintenue à 30°C pendant toute la nuit. De plus les valeurs de l'efficacité thermique instantanée étaient entre environ 22% et 80%.

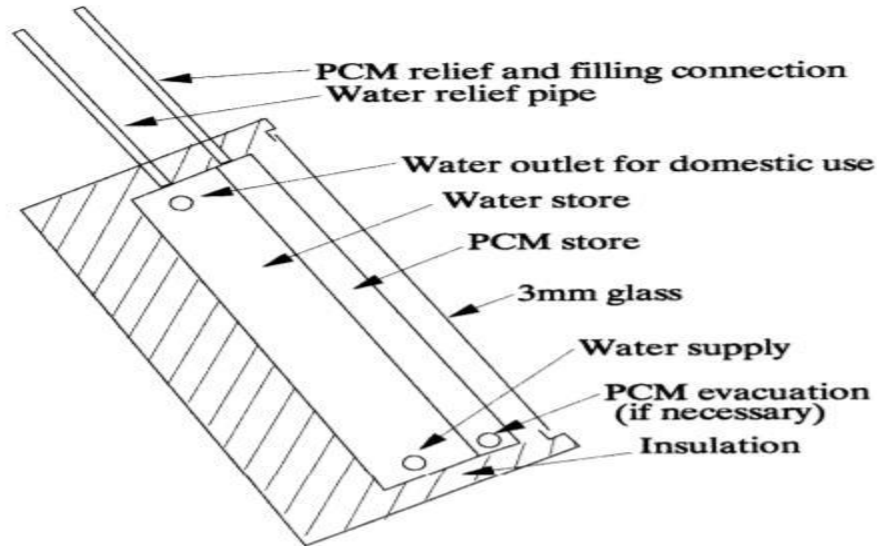


Figure I.12: Schéma du capteur solaire et de ses parties [18].

Les premières études utilisant des MCP pour améliorer les performances thermiques du capteur solaire concernent le FPC. Le matériau à changement de phase MCP est placé sous la plaque d'absorption du collecteur.

Bellah et al. [19], ont étudié expérimentalement la performance d'un matériau à changement de phase intégré à un capteur solaire plan, le matériau utilisé comme MCP est la cire de paraffine, l'absorbeur joue le rôle à la fois de l'absorption de l'énergie solaire et de stockage MCP, et a été déchargé à l'eau froide circulant dans les tuyaux situés à l'intérieur de la cire. Les résultats expérimentaux obtenus ont montré que, dans le processus de charge, la moyenne des coefficients de transfert de chaleur augmente fortement avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche fondue car la convection naturelle devient plus forte. Dans le processus de décharge, le gain de chaleur utile a augmenté à mesure que le débit augmente, (figure I.13).

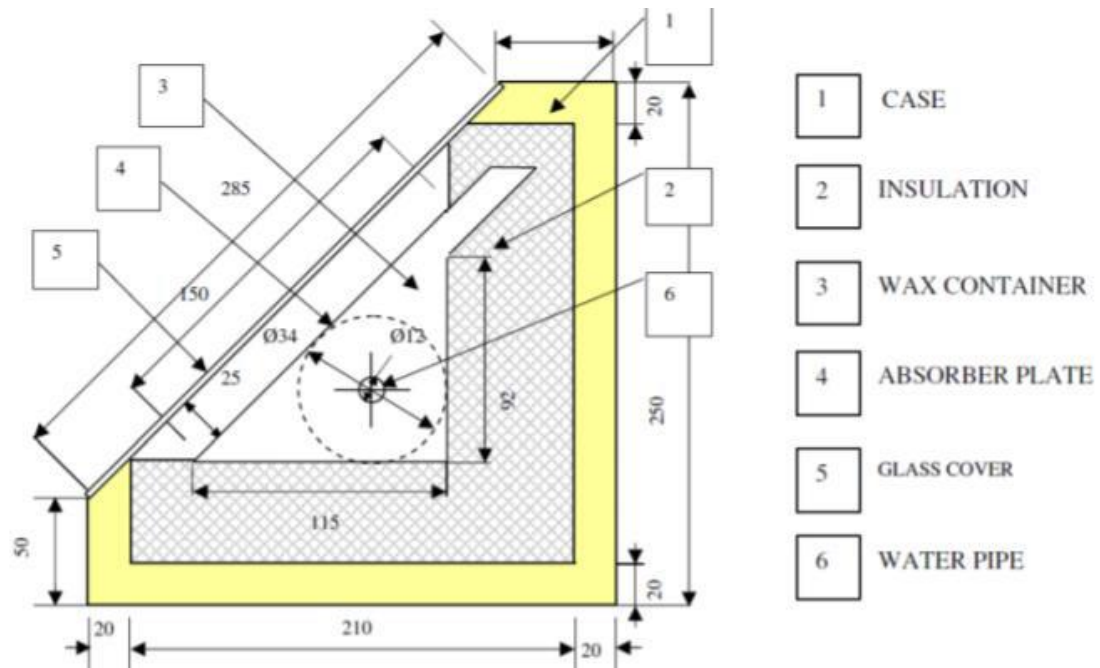


Figure I. 13: Représentation schématique de l'appareil expérimental [19].

Malvi et al. [20] ont étudié les performances des capteurs solaires plan avec différents débits du fluide caloporteur et ils ont montré l'effet du MCP sur le coefficient moyen de transfert thermique. Il a été observé qu'en utilisant le MCP, la valeur du facteur de transfert de chaleur FR diminue jusqu'à la valeur de 0.28, ce qui est inférieur à la valeur de FR sans le MCP. Cependant, l'utilisation du MCP a facilité le stockage de chaleur latente et a fourni du chauffage même en l'absence de la lumière solaire. Les résultats expérimentaux ont montré que le coefficient moyen de transfert thermique augmente avec l'épaisseur de la couche de paraffine fondue, qui est dû à la convection naturelle.

El Qarnia [21] a utilisé le MCP dans une unité de stockage d'énergie thermique séparée du solaire. Les performances thermiques de cette unité de stockage de chaleur latente solaire ont été étudiées avec trois MCPs. Ils ont constaté que l'utilisation de n-octadécane comme MCP n'est pas bénéfique car la température de sortie de l'eau chaude est inférieure à 28°C. Outre la cire de paraffine (P116), la température de sortie de l'eau chaude varie entre 36°C et 47°C. Les résultats ont également montré que l'acide stéarique offre une plage acceptable de la température de sortie de l'eau chaude, voir Figure (I.14).

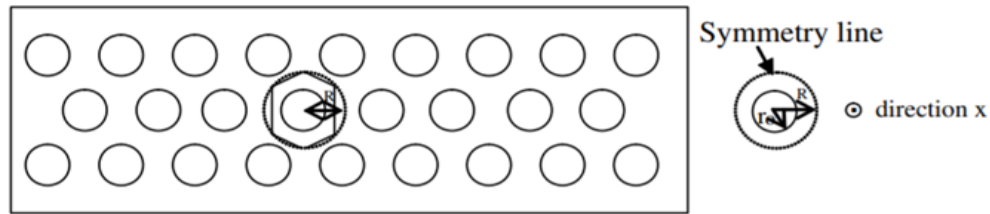


Figure I. 14: Unité de stockage par changement de phase [22].

Sandali et al. [23] a constaté que l'intégration de 1 cm de couche de MCP sous la plaque absorbante augmente le temps de fonctionnement quotidien des capteurs de 2 heures même après le coucher du soleil et la température de sortie de l'eau a été améliorée d'une valeur de 10°C, voir la figure (I.15).

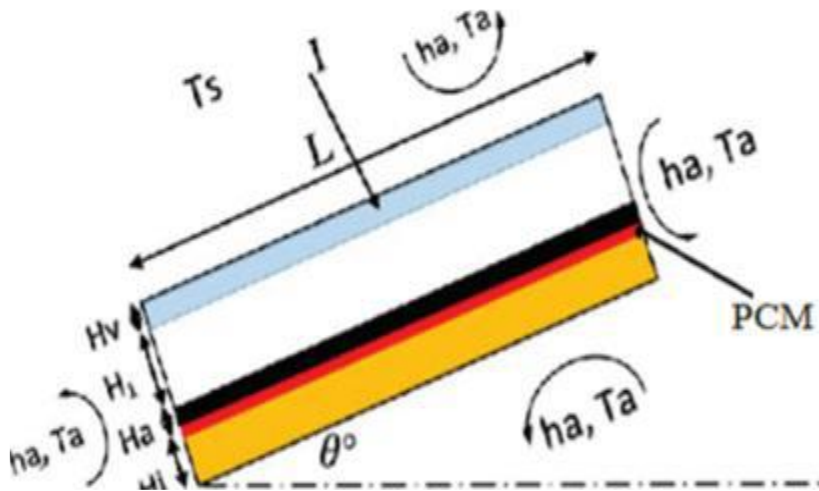


Figure I. 15: Schéma d'un collecteur solaire avec PCM [23].

Djim et al. [24], ont étudié analytiquement et expérimentalement l'évolution du front de fusion d'une plaque de paraffine (R52-R54) comme MCP soumise à l'ensoleillement. L'étude a été menée sur un capteur stockeur parallélépipédique, voir Figure (I.16). Ils ont conclu que la confrontation des résultats numériques et expérimentaux a montré que la conduction est prépondérante dans la phase solide, la concordance est un peu nette au début.

Par contre quand la fusion commence, la convection se développe rapidement et le modèle s'écarte nettement de la réalité.

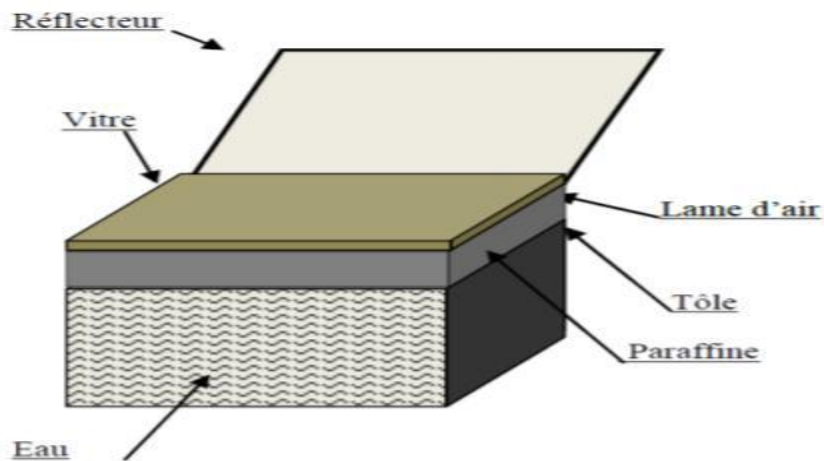


Figure I.16: Schéma de principe du dispositif [24].

Summers et al [25], ont optimisé un capteur solaire utilisé pour le cycle d'humidification déshumidification avec intégration d'un matériau à changement de phase (paraffine wax) comme un système de stockage d'énergie, voir Figure (I.17).

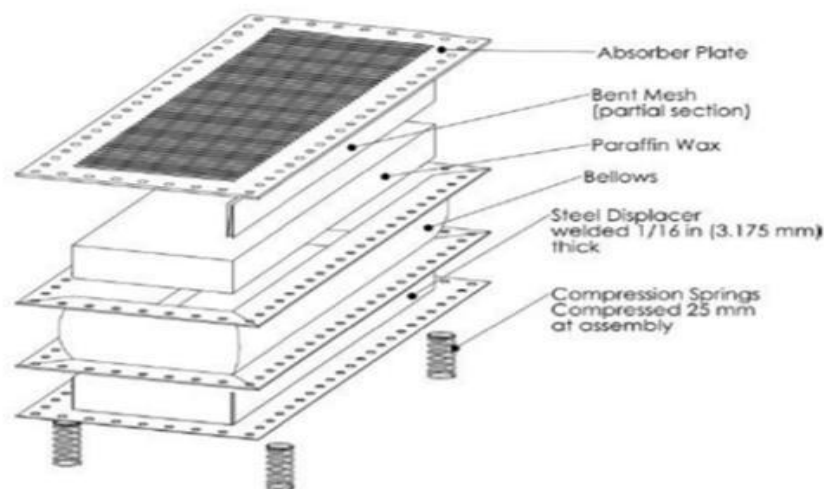


Figure I.17: Schéma du système utilisant [25].

Dans cette conception, comme le montre Figure.1.25, un matériau à changement de phase (MCP) est placé en dessous de la plaque d'absorbeur en contact direct avec l'absorbeur. Cela permet à la chaleur d'être transférée directement à partir de la plaque d'absorption sur le support de stockage, puis directement à partir du support de stockage à l'air lorsque le soleil ne brille pas. L'utilisation d'un système de stockage intégré élimine également la nécessité d'une boucle de fluide de travail secondaire et l'augmentation inhérente de la complexité et de coût. Les résultats expérimentaux ont montré un bon accord avec le modèle dans tous les cas essayés.

Klemm et al.[26], ont proposé un nouveau concept de gestion thermique passive à évaluer en combinant un matériau de changement de phase avec des structures métalliques en fibre dans un module MCP pour avoir des propriétés personnalisées de transfert de chaleur. Le module a été monté à l'arrière d'un module solaire. Les résultats de la simulation ont prouvé que le pic de température du module solaire peut être réduit jusqu'à 20 K en appliquant un MCP avec un point de fusion à environ 54°C pour améliorer les performances des capteurs solaires thermiques voir la figure suivante (I.18).

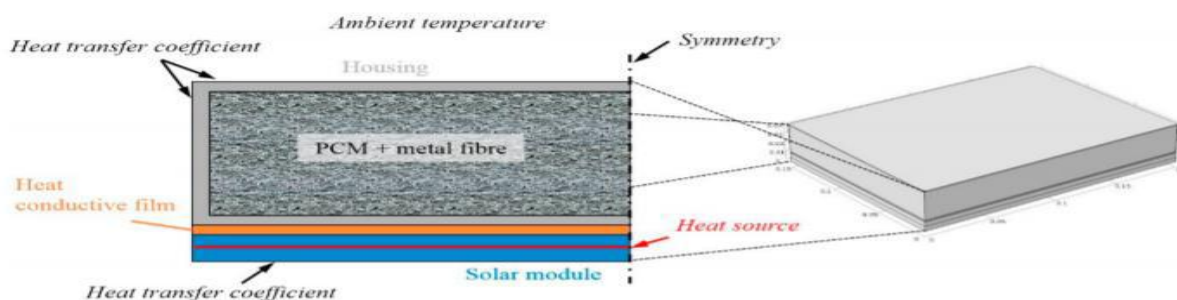


Figure I. 18: Concept et géométrie [26].

Serale et al. [27], ont proposé un nouveau fluide de transfert de chaleur basé sur l'exploitation de la chaleur latente de la fusion/solidification des particules en suspension appelées matériaux de phase à mousse. L'analyse numérique est présentée pour comparer les performances de cette technologie avec celle d'un simple capteur solaire thermique. Ils ont prouvé que l'efficacité instantanée et la conversion globale de l'énergie solaire du collecteur augmentent quand un MCP est utilisé comme un fluide caloporteur pour les climats plus froids. La conversion d'énergie augmente de l'ordre de 4% à 6% pour les concentrations de soleil.

Senthil [28], a étudié l'utilisation des MCP organiques et inorganiques intégrés dans un la cavité du récepteur d'un concentrateur parabolique afin d'améliorer les performances thermiques. L'utilisation du PCM dans le capteur solaire a également produit une distribution uniforme de température dans le capteur.

Kuhe et al. [50], ont conçu un distillateur à simple étage, intégré avec le système de stockage d'énergie thermique par de la chaleur latente et couplé à un concentrateur parabolique. 14 kg de cire d'abeille ont été utilisés comme MCP sous la plaque d'absorption afin de garder l'eau distillée à une température relativement élevée même pendant les heures de coucher du soleil. Les résultats expérimentaux ont montré que l'effet de stockage thermique augmentait la

productivité de l'eau de 26% par rapport au distillateur sans PCM avec un rendement journalier de 85.3%, voir la Figure (I.19).

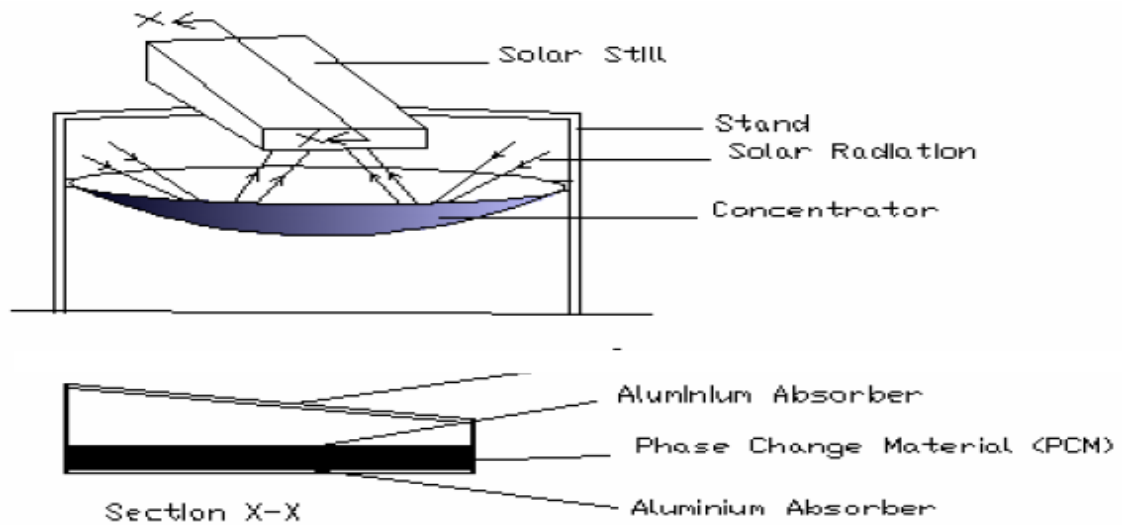


Figure I. 19: Réflecteur parabolique couplé à un distillateur solaire [30].

1.7 Conclusion:

Ce chapitre a été l'occasion de revisiter les concepts fondamentaux du stockage d'énergie thermique, notamment à travers la chaleur latente et la chaleur sensible. Nous avons examiné les différents types de matériaux à changement de phase, ainsi que leurs formes et conditionnements. De plus, nous avons présenté en détail les propriétés caractéristiques de ces matériaux, leur classification et les diverses applications auxquelles ils sont destinés.

CHAPITRE II
Modélisation
mathématique

II.1 Introduction:

L'utilisation de matériaux à changement de phase MCP pour le refroidissement des panneaux photovoltaïque a été l'une des importantes applications pour ces matériaux. La fusion et la solidification du matériau conduit à des processus de changement de phase accompagnés par des phénomènes d'absorption ou de dégagement de l'énergie thermique.

Dans ce chapitre, nous présentons le phénomène de changement de phase et le modèle mathématique permettant de simuler le comportement thermique à la fois en mode conductif et convectif à travers une cavité contenant le MCP. Nous exprimons les équations de conservation de la masse, de quantité de mouvement et d'énergie, ainsi que la théorie de solidification et les méthodes d'analyse des écoulements avec changement de phase.

II.2 Phénomène de changement de phase:

On a déjà connu que la matière existe en quatre états : solide, liquide, gaz ou plasma (un gaz extrêmement chauffé). Le passage d'un état à un autre est appelé changement de phase qui se traduit par des phénomènes physiques en général complexes. Le changement de phase est accompagné soit de dégagement soit d'absorption de la chaleur qui persiste tant que les deux phases coexistent. Au cours de cette transition, le corps subit des modifications internes qui ont fait l'objet de très nombreuses études.

Les chaleurs latentes mises en jeu sont souvent très importantes et jouent de ce fait un rôle déterminant dans les transferts de chaleur et de masse. Il suffit, en effet, de faibles variations de températures (autour de la température de changement de phase) pour libérer des quantités de chaleur considérables [18].

II.3 Equation du modèle mathématique:

Les équations exprimant les phénomènes du transfert thermique en régime laminaire sont principalement celles de dérivées des lois physiques de conservation de masse de la quantité de mouvement et de l'énergie.

Pour construire des modèles suffisamment détaillés et précis, il faut tenir compte d'un certain nombre d'hypothèse simplificatrices, pour notre cas, on suppose que :

- *Le fluide (phase liquide du MCP) est incompressible et newtonien.
- *L'écoulement est bidimensionnel, laminaire, instationnaire.
- *La dissipation visqueuse est négligeable.
- *Les propriétés physiques de la phase solide supposées constantes.

II.3.1 Equation de continuité:

En considérant l'hypothèse d'un fluide incompressible le principe de la conservation de la masse mène à l'équation de continuité s'exprimé mathématiquement sous la forme suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (II.1)$$

ρ : La masse volumique.

$\mathbf{v}$: Le vecteur de vitesse.

Dans le cas des écoulements bidimensionnelles la masse volumique ρ est constante, l'équation de continuité se réduire à :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (II.2)$$

II.3.2 Equation de quantité de mouvement (Navier Stokes):

Le principe de conservation de la quantité de mouvement permet d'établir les relations entre les caractéristiques du fluide (le MCP fondu) et son mouvement et la cause qui le produit. On peut indiquer que le taux de variation de quantité de mouvement contenu dans le volume est égal à la somme de toutes les forces extérieures qui lui sont appliquées, pour un fluide newtonien incompressible, les équations de Navier Stokes pour la convection naturelle en 2D (Direction x et y) s'écrivent sous la forme :

Suivant l'axe x :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \rho g \sin(\alpha) + S_x \quad (II.3)$$

Suivant l'axe y :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v^2) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \rho g \cos(\alpha) + S_y \quad (II.4)$$

Pour modéliser la convection naturelle, il est nécessaire d'introduire une dépendance de la masse volumique à la température. L'approximation de Boussinesq est utilisée.

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \quad (II.5)$$

S_x et S_y Représentent les termes sources dans les directions x et y, et utilisée pour modifiée les équations de quantité de mouvement :

$$S_x = Au \quad S_y = Av \quad (II.6)$$

Avec :

$$A = C \frac{(1-f_l)^2}{f_l^3 + 1 \times 10^{-6}} \quad (II.7)$$

C Et f_l représentent la constante du darcy et la fraction massique, respectivement

$$f_l = \begin{cases} 1 & T > T_l \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & T_s < T < T_l \\ 0 & T < T_s \end{cases} \quad \text{Si} \quad \begin{matrix} T > T_l \\ T_s < T < T_l \\ T < T_s \end{matrix} \quad (II.8)$$

II.3.3 Equation de conservation d'énergie:

L'équation de la conservation d'énergie est obtenue à partir du premier principe de la thermodynamique. Ce principe met en relation les différents termes, soit :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho u h) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + S_h \quad (II.9)$$

avec :

X et Y : coordonnées cartésiennes.

u : composante de vitesse dans la direction X.

T : température de fluide.

T_{ref} : température de référence.

t : le temps.

K : la conductivité thermique.

ρ : la masse volumique.

μ : la viscosité dynamique.

β : coefficient de dilatation.

S_h : terme de source.

h : l'enthalpie spécifique.

h_s : l'enthalpie sensible.

$$h_s = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p \cdot dt \quad (II.10)$$

L'enthalpie totale H :

$$H = h_s + \Delta H \quad (II.11)$$

où $\Delta H = \gamma L$ est le changement d'enthalpie en raison du changement de phase, h_{ref} est l'enthalpie de référence à la température de référence T_{ref} , C_p est la chaleur spécifique, L est l'enthalpie spécifique de fusion (état liquide) et γ est la fraction liquide au cours du changement de phase qui se produisent sur une plage de températures $T_s < T < T_l$ définies par les relations suivantes :

Si $T < T_s$

$$\gamma = \frac{\Delta H}{L} = 0 \quad (II.12)$$

SI $T_s < T < T_l$ (etat mélange)

$$\gamma = \frac{\Delta H}{L} = \frac{T - T_s}{T_l - T_s} \quad (II.13)$$

Si $T > T_l$

$$\gamma = \frac{\Delta H}{L} = 1 \quad (II.14)$$

$$S_h = \rho L \frac{dy}{dt} \quad (II.15)$$

II.3.4 Approximation de Boussinesq:

Pour des configurations d'écoulements dans une cavité, la résultante des forces externes est limitée aux forces gravitationnelles de sorte que l'influence de la convection naturelle provoquée par des gradients de la température soit évidente. L'effet de la convection naturelle est pris en considération dans l'équation de la quantité de mouvement par la variation de la masse volumique, si en prenant un état pour la masse volumique ρ et une température T_0 . L'équation d'état pour la masse volumique ρ en utilisant le développement de Taylor devient :

$$\rho = \rho_0 \left[1 - \frac{T - T_0}{T_0} \right] \quad (II.16)$$

En se limitant à un développement de premier ordre :

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \quad (II.17)$$

avec :

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \rho}{\partial T} \right] \quad (II.18)$$

β : le coefficient de dilatation isobare du fluide.

L'approximation de Boussinesq consiste à négliger les variations de la masse volumique dans les équations de la conservation, sauf son application comme une force motrice dans le terme F de l'équation de conservation de la quantité de mouvement, on peut exprimer la force volumique F (Moteur de la convection naturelle) par :

$$F = g(\beta_0 - 1) \quad (II.19)$$

II.4 La théorie de solidification:

La solidification est considérée largement dans la littérature comme un problème de Stefan. Cette appellation a été attribuée suite aux travaux du fameux chercheur Stefan qui a étudié le problème de fusion et de congélation d'eau en 1890.

C'était le premier travail de modélisation du phénomène de changement de phase liquide/solide.

Généralement, il existe deux approches pour l'analyse des problèmes des changements de phase : Les méthodes à maillage mobile dans le temps, et la méthode à maillage fixe.

II.4.1 Le problème de Stefan:

La libération ou l'absorption de la chaleur latente pendant les transformations de solidification ou de fusion caractérise le changement de phase. A l'interface, on a une variation brusque de l'enthalpie massique "H". Dans le cas où le changement de phase est isotherme, le problème est appelé problème de Stefan. Sa résolution consiste à modéliser les transferts de chaleur dans chacune des phases avec un couplage à l'interface.

II.4.2 Problème de Stefan à deux phases:

La formulation du problème de Stefan est déduite de la conservation d'énergie exprimée séparément pour les deux phases solide et liquide avec un couplage à l'interface. Les équations à résoudre dans les deux phases d'après [22] sont respectivement pour les phases solides et liquides :

$$(\rho C)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla(\lambda_s T_s) \quad (II.20)$$

$$(\rho C)_l \frac{\partial T_l}{\partial t} = \nabla(\lambda_l T_l) \quad (II.21)$$

où ρ est la masse volumique, C la chaleur spécifique, et λ la conductivité thermique.

Le bilan thermique à l'interface où les deux champs de températures sont liés par la condition d'équilibre d'énergie est défini par l'expression

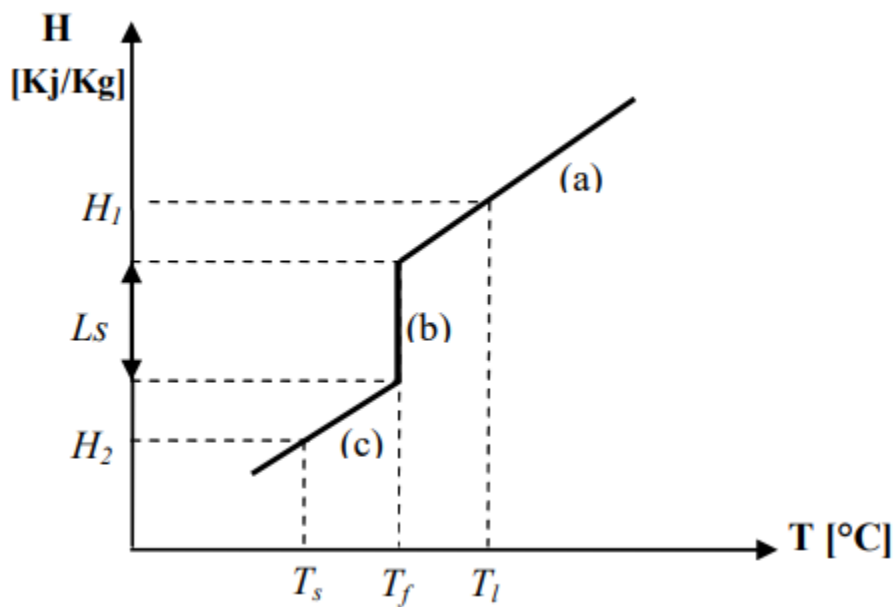
$$\rho L \frac{ds}{dt} = [\lambda \frac{\partial T}{\partial n}]_s - [\lambda \frac{\partial T}{\partial n}]_l \quad (II.22)$$

Cette équation exprime la libération ou l'absorption de la chaleur latente due au changement de phase. Où T est la température de changement de phase T_f , L chaleur de latente du changement de phase, n la normale locale dirigée vers l'extérieur du domaine solide et $\frac{ds}{dt}$ la vitesse normale locale de l'interface solide/ liquide. Il est à noter que dans le cas où le transfert de chaleur dans la phase liquide est purement conductif, le problème est un problème de Stefan à deux phases. Il est nécessaire de résoudre en même temps.

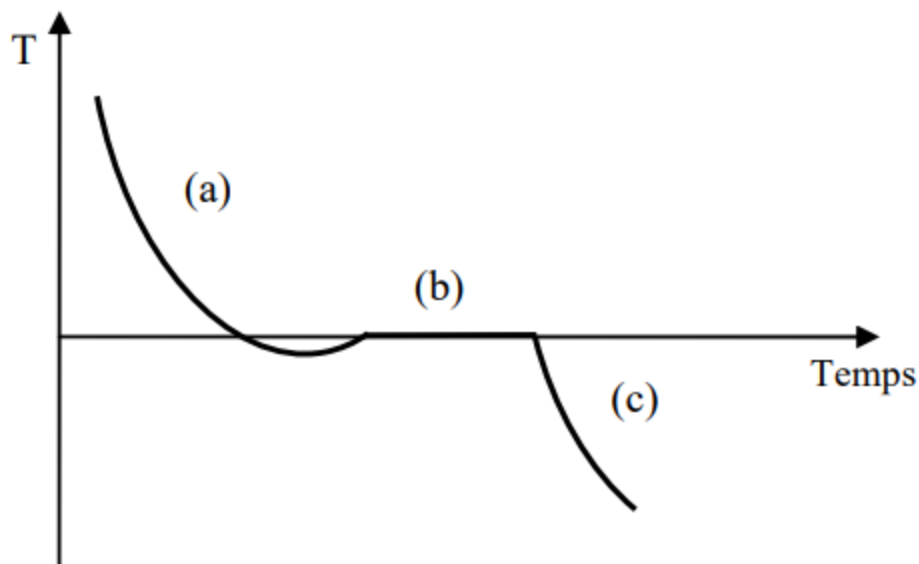
II.4.3 Modélisation thermique de la théorie de la solidification:

Soit un métal pur en état de fusion à une température T_l supérieure à la température de fusion. Pendant la solidification, la température descend progressivement suivant le palier (a), puis se stabilise durant le changement de phase à la température T_f suivant le palier (b), dans lequel le métal est partiellement solidifié. Le métal continue à se refroidir et passe de la

température T_f à la température T_s suivant le palier (c), où il sera complètement solidifié. Ici les changements de phase liquide solide (solidification) et solide liquide (fusion) à une température donnée sont considérés, voir la représentation sur la fig. (II.1-a et -b).



Figure(II.1) : Représentation de l’enthalpie en fonction de la température.



Figure(II.2) : Courbe de refroidissement lent d’un métal pur en fonction du temps.

Chaque palier représente un état spécifique du métal et la variation d'enthalpie dans chaque palier est donnée comme suit [20]:

Palier (a) : $dH = C_p l dT$ pour $T > T_f$

$$\text{Palier (b)} : dH = Ls \quad \text{pour } T = T_f \quad (II.23)$$

$$\text{Palier (c)} : dH = Cps dT \quad \text{pour } T < T_f$$

H est une fonction discontinue à $T = T_f$. Cette discontinuité marque la séparation entre le liquide et le solide elle est appelée interface diphasique. Pour que le métal soit complètement solidifié il faut lui enlever la quantité d'énergie ΔH suivante:

$$\Delta H = C_{pl}(T_l - T_f) + Ls + C_{ps}(T_l - T_s) \quad (II.24)$$

avec:

T_l : Désigne la température du métal à l'état liquide

T_s : Désigne la température du métal à l'état solide

T_f : Désigne la température du métal à l'état fusion

C_{ps} C_{pl} : sont les capacités thermiques du liquide et du solide, représentées par les pentes des paliers (a) et (b) sur le graphe.

Dans sa forme liquide, le métal possède la chaleur latente Ls par unité de masse plus la chaleur sensible représentée par la relation:

$$C_{pl}(T_l - T_f) \quad (II.25)$$

Pour un métal pur, l'enthalpie est reliée à la température par:

$$\Delta H = \begin{cases} C_{pl}\Delta T + Ls & \text{pour } T > T_f \\ C_{ps}\Delta T & \text{pour } T < T_f \end{cases} \quad (II.26)$$

Pour un alliage, où la solidification prend place à travers un intervalle de solidification ($T_l - T_s$), l'enthalpie est reliée à la température par:

$$\Delta H = \begin{cases} C_{pl} \Delta T + Ls & \text{pour } T \geq T_f \\ C_p \Delta T + fl Ls & \text{pour } T_s < T < T_l \\ C_{ps} \Delta T & \text{pour } T \leq T_f \end{cases} \quad (II.27)$$

sachant que fl désigne la fraction liquide.

Dans le procédé de solidification ou de fusion, la température évolue dans chacune des phases et les interfaces diphasiques se déplacent. Le fait de parler ici de plusieurs interfaces diphasiques, car l'imagination qu'il y ait plusieurs fronts de solidification et de fusion. Par la suite, la présence d'un seul front, bien que plusieurs fronts puissent être présents. Le déplacement de l'interface diphasique ne peut pas être suivi en ne considérant que l'évolution de la température pour certains points du domaine, la transmission de la chaleur étant dépendante du déplacement de l'interface et inversement.

II.5 Les méthodes d'analyse des écoulements avec changement de phase:

Généralement, il existe deux approches pour l'analyse des problèmes des changements de phase:

Les méthodes à maillage mobile dans le temps, et la méthode à maillage fixe.

II.5.1 Méthode à maillage mobile:

Dans cette méthode, les équations de conservation sont écrites en termes de température dans chaque phase, elles sont résolues séparément dans la région liquide et dans la région solide, la position de l'interface est obtenue par la résolution de l'équation du bilan à l'interface (condition de Stefan). Les équations gouvernantes le transfert de chaleur sont:

- Région liquide :

$$C_{pl}\rho_l \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda_l \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (II.28)$$

- Région solide :

$$C_{ps}\rho_s \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda_s \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (II.29)$$

A l'interface liquide-Solide, les deux équations (II.28) et (II.29) sont couplées par la condition de Stefan [21]:

$$\begin{cases} T_l = T_s = T_f \\ -\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial n} + \lambda_s \frac{\partial T_l}{\partial n} = \rho_s L_s \frac{\partial \xi}{\partial n} \end{cases} \quad (II.30)$$

où n Désigne la normale au front et ξ la position du front de solidification. La condition de Stefan traduit la chute de l'enthalpie du système (dégagement de la chaleur latente L_s) à la température de fusion T_f . Cette approche est adaptée dans le cas d'un métal pur où le changement de phase s'effectue à une température constante. Généralement, les solutions analytiques pour les modèles de Stephan restent très limitées pour des cas unidimensionnels avec des conditions aux limites et des propriétés thermophysiques constantes. Dans les situations pratiques les conditions aux limites et les propriétés thermophysiques sont variables et multiples ainsi que les géométries sont multidimensionnelles et irrégulières, ce qui nécessite des techniques numériques puissantes pour les étudier.

II.5.1.1 Méthode à maillage fixe:

Dans ces méthodes, une seule équation d'énergie devient applicable dans les deux phases et donc il n'est pas nécessaire de considérer les deux phases liquides et solides séparément. Pendant le calcul, le maillage reste fixe et les équations gouvernant le transfert de chaleur dans la région liquide et la région solide est résolue simultanément malgré la

discontinuité du gradient de la température à l'interface. L'avantage de ces méthodes réside dans la simplicité et la facilité de mettre en œuvre même dans le cas tridimensionnel [22]. Dans cette famille de méthodes, les deux méthodes les plus utilisées sont la méthode de la capacité effective (apparente) et la méthode enthalpique.

II.5.1.2 Méthode de la capacité effective:

La méthode de la capacité effective introduit l'effet de la chaleur latente sur la capacité calorifique du matériau dans un petit intervalle de température voisinage de la température de fusion (changement de phase). Globalement, cette méthode est assez simple mais la moins précise dans les méthodes à maillage fixe [22-25]:

- L'équation d'énergie:

$$\rho C_{eff} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (II.31)$$

avec :

$$C_{eff} = \begin{cases} C_{ps} & \text{si } T < T_f \\ \frac{L_s}{T_l - T_s} & \text{si } T = T_f \\ C_{pl} & \text{si } T > T_f \end{cases} \quad (II.32)$$

où $\delta(T - T_f)$ représente la fonction de Dirac, qui est infinie à $T=T_f$ et nulle ailleurs. Elle satisfait l'équation suivante:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(T - T_f) dT = 1 \quad (II.33)$$

Afin de faciliter le calcul numérique, on introduit la fonction Delta pour pouvoir localiser les nœuds où la chaleur latente est incluse dans la chaleur spécifique (voir Figure (II.3)), ce qui donne [26-27]:

$$C_{eff} = \begin{cases} C_{ps} & \text{pour } T < T_f - \Delta T \\ C_p + \frac{L_s}{2\Delta T} & \text{pour } T_f - \Delta T \leq T \leq T_f + \Delta T \\ C_{pl} & \text{pour } T > T_f + \Delta T \end{cases} \quad (II.34)$$

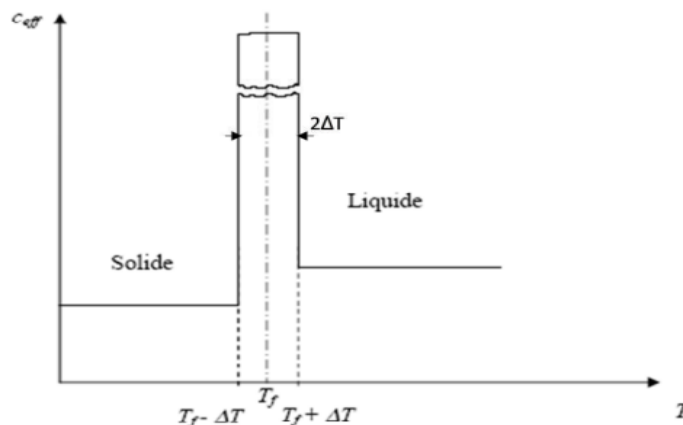


Figure II.3 : Capacité calorifique incluant l'effet de la chaleur latente dans un petit intervalle $2\Delta T$ au voisinage T_f .

II.5.2.2 Méthode enthalpique:

Les modèles enthalpiques permettent d'éviter le suivi du front. Le maillage de calcul reste fixe et la condition de changement de phase au niveau d'interface n'est pas imposée. Ces modèles introduisent généralement une zone pâteuse entre les deux phases liquide et solide, ce qui élimine la nature de front dans les modèles de Stefan. Le concept de fraction a été introduit dans la zone pâteuse pour prendre en compte la présence d'une mixture des deux phases liquide et solide.

La méthode enthalpique traite l'enthalpie comme variable dépendante de la température, et l'équation de la chaleur est écrite en fonction de l'enthalpie et de la température. Le modèle de transfert thermique que nous adoptons est basé sur une formulation enthalpique qui est la plus adoptée à la résolution numérique des problèmes avec changement de phase. La forme enthalpique de l'équation de la conduction thermique est formulée mathématiquement dans le cas bidimensionnel comme suit [27-29]:

$$\rho \left(\frac{\partial H}{\partial T} + u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - S_h \quad (II.35)$$

H est l'enthalpie du système, elle prend la forme générale:

$$H = C_p T + f_l L_s \quad (II.36)$$

avec:

$f_l = 1$ Dans la région liquide, $f_l = 0$ dans la région solide et $0 \leq f_l \leq 1$ dans la région pâteuse où coexistent les deux phases. Dans la littérature, on suppose très souvent que la chaleur latente varie linéairement avec la température comme suit:

$$\left\{ \begin{array}{ll} 1 & T > T_l \\ \frac{T-T_s}{T_l-T_s} & T_s \leq T \leq T_l \\ 0 & T < T_s \end{array} \right. \quad (II.37)$$

Après réarrangement on obtient:

$$\rho C_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right] = \lambda \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] - S_h \quad (II.38)$$

S_h représente le terme source dans l'équation qui est donné par:

$$S_h = \rho L_s \left[\frac{\partial f_l}{\partial t} + u \frac{\partial f_l}{\partial x} + v \frac{\partial f_l}{\partial y} \right] \quad (II.39)$$

Le modèle enthalpique est considéré comme le plus efficace et le plus précis des méthodes à maillage fixe.

II.6 Chauffage oscillatoire:

Dans le but de modéliser plus ou moins la réalité physique de l'échauffement solaire résultant d'un rayonnement incident à une surface donnée ayant un contact parfait avec notre matériau à changement de phase adopté, pour un jour donné de l'année (le 26 décembre) dans la région d'El-Oued (Sud-est de l'Algérie), on a considéré deux cas distincts à savoir:

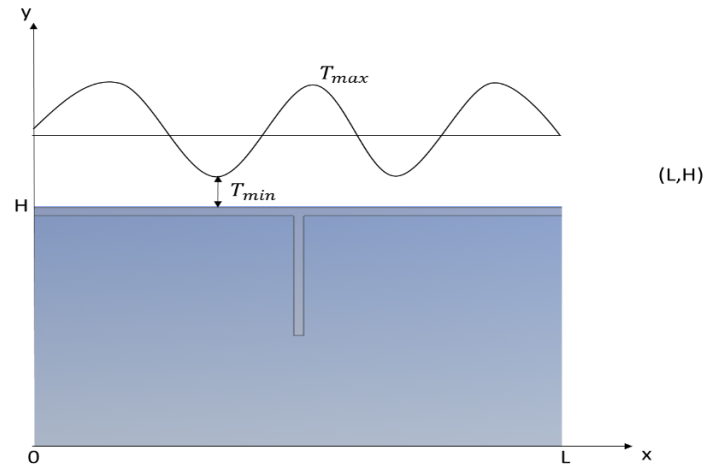


Figure II.4 : Schéma explicatif du T_{min} et T_{max} pendant ensoleillement d'une journée.

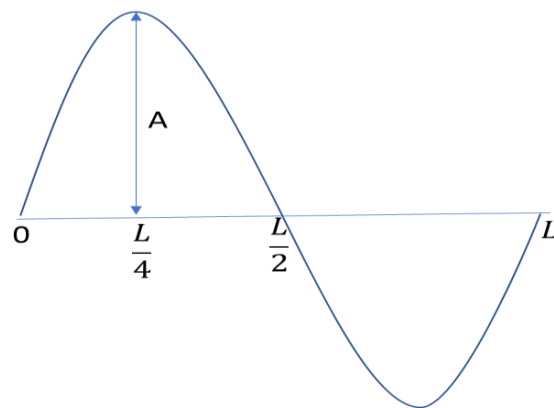


Figure II.5 : Paramètres considérés pour le cas de figure à une seule onde.

1^{er} cas à oscillation unique (une seule sinusoïdale):

$$f(x) = B + A \sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right)$$

avec:

$\lambda = L$ est la longueur d'onde en mètres.

$$\begin{cases} A_{\max} = A \\ A_{\min} = A(-1) \end{cases} \quad \text{et} \quad y = A \sin(\omega x)$$

$$\begin{cases} x = \frac{L}{4} & \Rightarrow y = A_{\max} = A \\ x = \frac{3L}{4} & \Rightarrow y = A_{\min} = -A \end{cases}$$

$$y = B + A \sin(\omega x)$$

$$T_{\max} = B + A$$

$$T_{\min} = B - A \Rightarrow B = T_{\min} + A$$

$$\text{alors: } T_{\max} = T_{\min} + 2A$$

$$\Rightarrow A = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2}$$

$$B = T_{\min} + \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} \quad \Rightarrow B = \frac{T_{\min} + T_{\max}}{2}$$

alors:

$$f(x) = \frac{(T_{\max} - T_{\min})}{2} \left[\left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \right) + \sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \right]$$

2^{ème} cas à oscillation double (deux ondes sinusoïdales):

$$f(x) = B + A \sin\left(\frac{4\pi x}{L}\right)$$

suivant le même développement que dans le cas 1^{er}:

$$A = \frac{T_{max}-T_{min}}{2} \quad \text{et} \quad B = \frac{T_{min}+T_{max}}{2}$$

et pour le 2^{ème} cas on aura:

$$f(x) = \frac{(T_{max}-T_{min})}{2} \left[\left(\frac{T_{max}+T_{min}}{T_{max}-T_{min}} \right) + \sin\left(\frac{4\pi x}{L}\right) \right]$$

II.7 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons établi le modèle mathématique pour le problème considéré. Ce modèle représente un système complexe composé d'équations dérivées de la thermodynamique et de la mécanique des fluides. Les équations de bilan nécessaires sont bien connues, cependant, en raison de la non-linéarité présente dans ces équations, leur résolution analytique s'avère difficile. Par conséquent, l'utilisation de méthodes numériques est indispensable pour résoudre les équations du modèle mathématique. Dans le cadre de notre étude, nous avons fait appel au progiciel ANSYS Fluent®.

CHAPITRE III

Modélisation numérique

III. 1 Introduction:

Le stockage thermique revêt une grande importance dans de nombreux domaines, offrant de nombreux avantages pour la gestion des procédés industriels. L'un des problèmes majeurs rencontrés dans les capteurs photovoltaïques est l'élévation de la température des cellules lors des périodes d'ensoleillement intense, ce qui entraîne une diminution de leur rendement. Afin de refroidir ces capteurs, un système passif utilisant un matériau à changement de phase (MCP) a été utilisé pour récupérer cette chaleur. Pour étudier le système PV/MCP, le logiciel ANSYS Fluent a été utilisé. Cependant, le défi principal était de déterminer et de maîtriser les différents paramètres (physiques et géométriques) afin d'obtenir un modèle optimisé, notamment en termes d'amélioration du rendement thermique. Par conséquent, il est essentiel de développer des systèmes efficaces permettant de récupérer la chaleur pendant les périodes d'irradiation intense.

III. 2 Description du problème considéré:

Le solveur Fluent® du progiciel ANSYS Workbench dans sa version estudiantine 2022, a été utilisé pour simuler le transfert thermique à travers une cavité rectangulaire remplie d'un MCP. La Figure III.1 illustre la géométrie de la cellule test étudiée, qui représente une structure modulaire composée d'un panneau solaire couplé à une couche de MCP située à l'intérieur d'une cavité. Le boîtier du MCP a une hauteur de 2.9 cm, une largeur de 5 cm et une épaisseur de 3 cm. On considère que le transfert de chaleur à travers le système PV/MCP se produit à la fois par conduction et par convection, et que le MCP fondu est un fluide incompressible. La cavité contenant le MCP est de forme rectangulaire bidimensionnelle, avec toutes les faces de la cavité thermiquement isolées, à l'exception de la face avant qui est en contact avec la face arrière du panneau solaire, recevant ainsi de la chaleur de ce dernier.

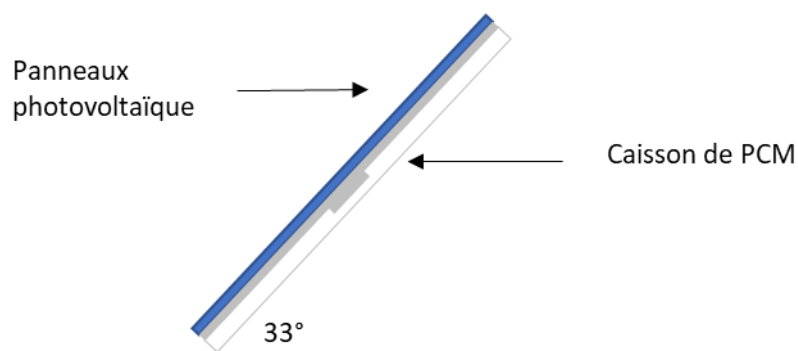


Figure III. 1 : Modèle physique du problème étudié.

III. 2. 1 Hypothèses générales:

Le problème formulé repose sur plusieurs hypothèses simplificatrices concernant la géométrie, le type d'écoulement, les mécanismes de transfert et les phénomènes de changement de phase. Les hypothèses adoptées sont comme suit:

- Le matériau à changement de phase est considéré comme étant parfaitement pur de bulles d'air.
- Le matériau à changement de phase est homogène et isotrope.
- Le fluide en phase liquide est considéré comme étant newtonien et incompressible.
- Les propriétés physiques sont des fonctions de la température uniquement.
- L'écoulement est supposé laminaire et sans dissipation.

III. 2. 2 Les conditions aux limites:

- Les parois extérieures de l'enceinte contenant le MCP sont supposées adiabatiques.
- Les deux côtés extérieurs de la plaque d'Aluminium sont considérés en état de convection avec l'air ambiant (Condition du 3^{ème} type ou de Robin).
- Aux interfaces aluminium-PCM les résistances de contact sont prises comme nulles (contacts parfaits).
- Pendant le processus de fusion, le MCP est considéré comme un solide (immobile) qui est maintenu à une température constante (isotherme).

III. 2. 3 Propriétés du MCP utilisé :

Le MCP utilisé dans cette étude est le RT40 ces propriétés thermophysiques sont citées dans le tableau III.1

Tableau III. 1 : Propriétés thermophysiques du matériau à changement de phase RT40.

Propriété	Symbole	Unité	Valeur
Chaleur latente	L_f	$[kj/kg]$	165
Solidus température	T_s	$[^{\circ}C]$	43
Liquidus température	T_l	$[^{\circ}C]$	38
Conductivité thermique	K	$[W/m.K]$	89
Chaleur spécifique (solide)	C_{ps}	$[j/kg.K]$	3000
Chaleur spécifique (liquide)	C_{pl}	$[j/kg/K]$	2300
Densité du solide	ρ	$[Kg/m^3]$	880
Densité du liquide	ρ	$[Kg/m^3]$	760
Viscosité	μ	$[Kg/m.s]$	0.0034
Coefficient de dilatation thermique	β	%	12.5

III. 3 Présentation du progiciel ANSYS:

III. 3. 1 Définition:

ANSYS est un progiciel (groupe de logiciels) de simulation numérique largement utilisé dans le domaine de l'ingénierie et de la science. Il offre une suite complète d'outils de modélisation, d'analyse et de visualisation pour résoudre des problèmes complexes liés aux domaines de la mécanique des structures, de la dynamique des fluides, de l'électromagnétisme, de l'acoustique et bien d'autres encore. ANSYS permet aux ingénieurs et aux chercheurs d'effectuer des simulations virtuelles avancées pour comprendre le comportement des systèmes physiques, optimiser les conceptions, prévoir les performances et réduire les coûts et les délais de développement. Il est utilisé dans de nombreux secteurs, notamment l'aérospatiale, l'automobile, l'énergie, l'électronique et la fabrication.

III. 3. 2 Principe d'utilisation:

- i. **Modélisation:** avec ANSYS Fluent (ou autre solveur), on peut créer des modèles virtuels de systèmes réels en définissant leur géométrie, leurs propriétés matérielles et leurs conditions aux limites.

- ii. **Préparation du maillage:** ANSYS nécessite la discrétisation de la géométrie en volumes finis à l'aide d'un maillage. On peut générer un maillage adapté à tout modèle, en veillant à ce qu'il soit suffisamment fin pour capturer les détails importants.
- iii. **Définition des propriétés matérielles et des conditions aux limites:** On devra spécifier les propriétés physiques des matériaux utilisés dans votre modèle, ainsi que les conditions aux limites qui décrivent les interactions avec l'environnement extérieur.
- iv. **Configuration de l'analyse:** ANSYS propose différents types d'analyses, tels que la dynamique des fluides, la mécanique des structures, l'électromagnétisme, etc. C.-à-d. on pourra sélectionner le type d'analyse approprié et configurer les paramètres spécifiques, tels que les sources/puits de chaleur, charges/forces appliquées, les contraintes ou autres.
- v. **Résolution (après invocation du solveur dédié):** Une fois configurés, le modèle et les paramètres d'analyse, ANSYS Fluent (ou tout autre solveur) effectue les calculs numériques pour résoudre les équations qui décrivent le comportement du système. Cela peut impliquer des itérations et des calculs complexes, en fonction de la complexité du modèle.
- vi. **Post-traitement:** Après la terminaison des analyses, on pourra visualiser et interpréter les résultats à l'aide des outils de post-traitement d'ANSYS (tels que CFX[®] ou CFD-Post[®]). On pourra générer des graphiques, des tableaux et des animations pour mieux comprendre le comportement du système et prendre des décisions adéquates.

III. 3. 3 L'interface graphique d'utilisateur (GUI) de ANSYS Workbench:

Lorsqu'on lance le logiciel, l'interface du navigateur de modèles s'affiche. Cette interface nous permet de créer de nouveau projet de simulation.

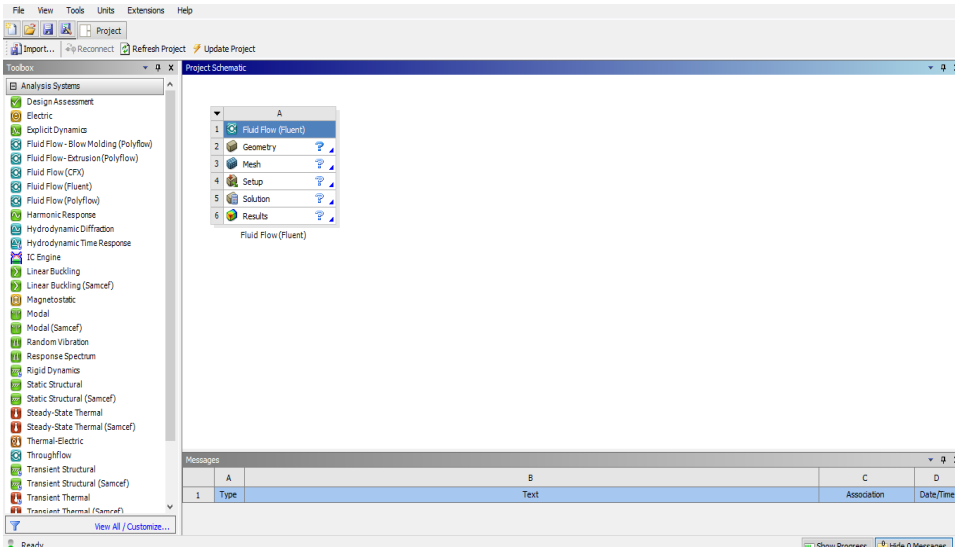


Figure III.2 : L’interface utilisateur graphique de ANSYS Workbench.

III. 3. 4 Construction de la géométrie:

En sélectionnant l'assistant de modélisation dans la section "Géométrie" de la fenêtre Nouveau, ANSYS nous guide pour choisir la géométrie sur laquelle on souhaite travailler.

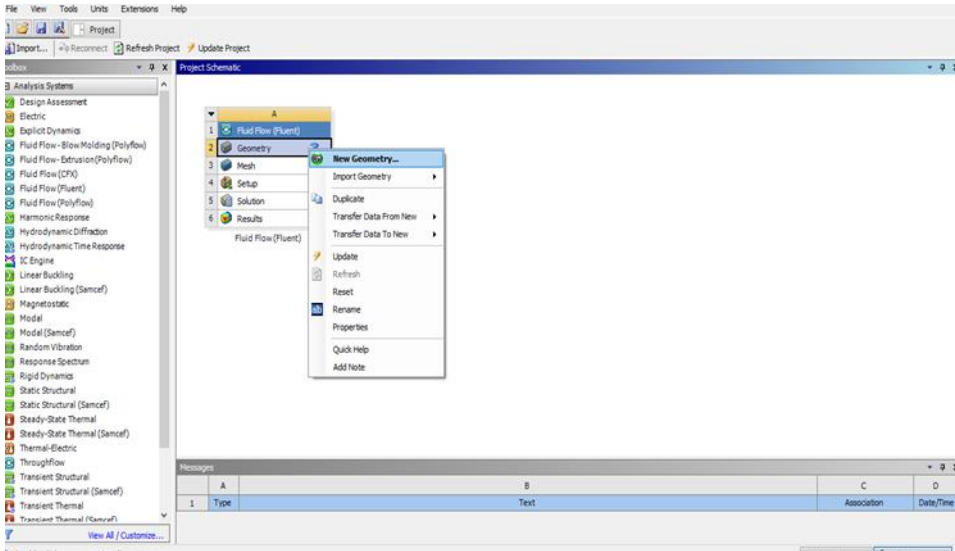


Figure III.3 : Dessin du modèle et sélection de la dimension d’espace.

La géométrie du modèle est représentée dans le logiciel de simulation. La conception géométrique est modélisée en dimension sous la forme d'un rectangle mesurant 0.03 m de

hauteur et 0.05 m de largeur, composé de dix étages ayant une épaisseur de 0.03 m, comme illustré dans la figure III.4 ci-dessous.

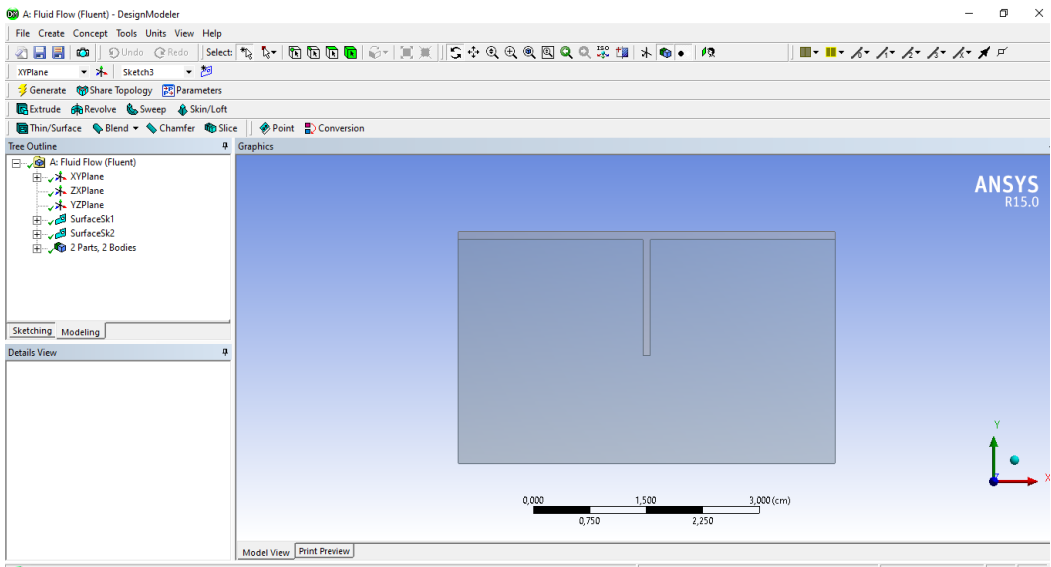


Figure III.4 : Modélisation de modèle.

III.3.5 Le maillage:

Le maillage est une représentation de la géométrie composée de mailles, définies par des points appelés nœuds. Ces nœuds servent de liaisons entre les mailles. Le processus de maillage peut être automatisé par le logiciel. L'algorithme commence par les éléments de la géométrie et ajoute des nœuds supplémentaires jusqu'à ce que des critères prédéfinis tels que le nombre de mailles ou la taille maximale des mailles soient satisfaits. Les paramètres de génération du maillage permettent d'utiliser des tailles prédéfinies (extra grossier, grossier, normal, fin, extra fin, etc.) ou de les ajuster selon les besoins.

Pour obtenir une meilleure précision et stabilité, nous avons opté pour un maillage régulier quadratique structuré. Ce maillage régulier a une taille de pas de 0.1 mm. Après cela, nous importons la géométrie du modèle créée directement dans ANSYS Mesh® ou TurboGrid®.

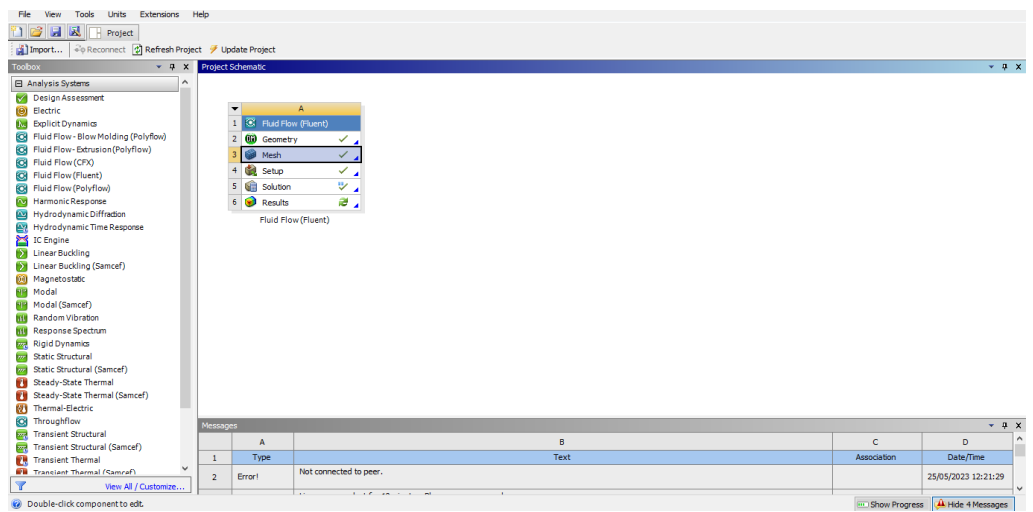


Figure III.5 : Importation de la géométrie du modèle.

Sélection des zones de maillage en identifiant les zones de la géométrie qui nécessitent un maillage en fonction de l'analyse souhaitée. Cela peut inclure les surfaces, les volumes, les lignes ou les points spécifiques.

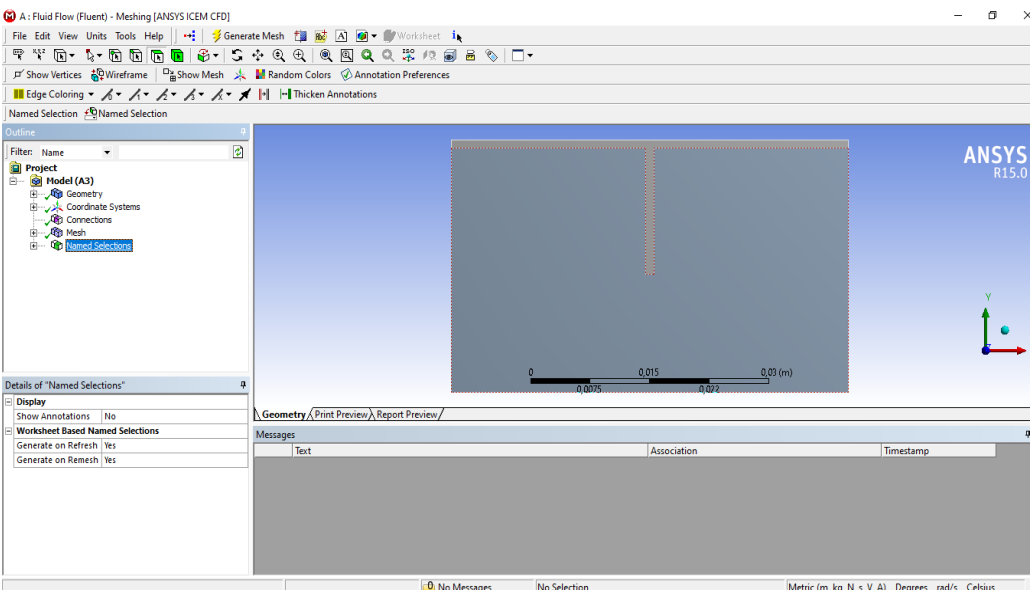


Figure III.6 : Identification des régions à mailler.

Puis sélectionnons le type de maillage approprié en fonction de la géométrie et du type d'analyse. Les options de maillage peuvent inclure le maillage structuré, non structuré, tétraédrique, hexaédrique, quadrilatère, triangle, etc. Ensuite, on configure les paramètres de

maillage tels que la taille d'élément, la densité de maillage, les critères de raffinement, les options de connectivité, etc., en fonction des exigences de l'analyse et de la précision souhaitée. On utilise les outils de maillage d'ANSYS pour générer le maillage à partir de la géométrie sélectionnée et des paramètres spécifiés. Vous pouvez visualiser le maillage généré pour vérifier sa qualité et son adéquation.

On contrôle de la qualité du maillage, et on vérifie la qualité du maillage en analysant des paramètres tels que la qualité des éléments, la distorsion, la connectivité, etc. Un éventuel raffinement du maillage, pourra être effectué suite aux opérations de raffinement localisé pour obtenir une résolution plus fine dans des régions spécifiques du modèle, en fonction des zones d'intérêt ou des résultats attendus.

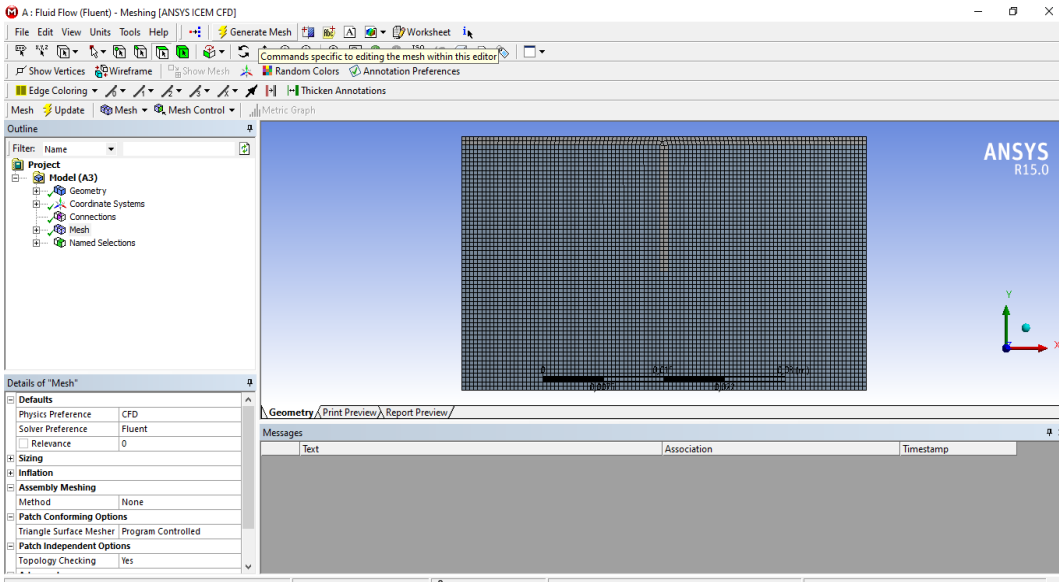


Figure III.7 : Le maillage.

III. 3. 6 La configuration (Setup):

Dans le contexte du progiciel ANSYS, le terme "setup" fait référence à la phase de configuration ou de paramétrage du modèle avant de lancer l'analyse. C'est une étape cruciale où on définit les conditions initiales, les propriétés des matériaux, les charges, les contraintes, les contacts, les paramètres du solveur, etc. Cela permet de préparer le modèle pour l'analyse spécifique qu'on souhaite effectuer.

En résumé, le "setup" dans ANSYS englobe toutes les actions nécessaires pour configurer le modèle, choisir les options appropriées et définir les conditions requises avant d'exécuter une simulation ou une analyse.

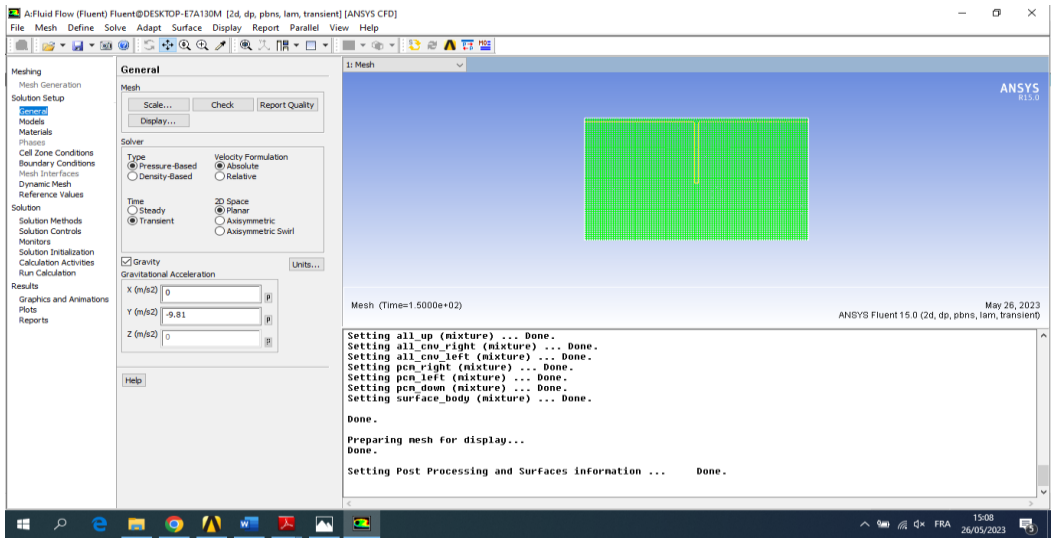


Figure III.8 : Schéma de menu de sélection les propriétés d'étude.

III. 3. 7 Résolution du problème:

Une fois que le problème est entièrement défini, il ne reste plus qu'à le résoudre. On peut accéder aux menus dédiés à la résolution pour effectuer cette étape. Dans le cas d'un problème impliquant plusieurs phénomènes physiques, il est possible de résoudre uniquement pour une partie spécifique des variables. Si des problèmes de convergence surviennent, cela peut être dû à une mauvaise formulation du problème (conditions aux limites, géométrie, etc.). La durée de résolution d'un problème est directement liée au nombre de nœuds impliqués. Sa vitesse dépend également du choix du solveur. Il est possible de définir une initialisation, qu'il s'agisse d'une valeur fixe ou d'une solution préalablement enregistrée. Dans le cas d'un problème multi-physique, il est possible de sélectionner les variables à résoudre et de les traiter de manière indépendante.

Pour effectuer une résolution numérique complète, il est nécessaire de créer un jeu de données comprenant le modèle de comportement, les propriétés physiques telles que la conductivité du matériau, ainsi que les conditions aux limites appliquées au maillage. Ces données sont généralement saisies à l'aide de l'interface de maillage et enregistrées dans un fichier texte. Ce fichier peut être modifié ultérieurement à l'aide d'un éditeur de texte. L'utilisateur doit ensuite donner l'ordre au logiciel d'effectuer la résolution en spécifiant les fichiers de données préalablement créés et le fichier contenant le maillage.

III. 4 Conclusions:

Dans ce chapitre, une présentation d'un modèle la première partie de ce chapitre, une vue d'ensemble du progiciel de simulation ANSYS a été présentée. On a pu observer l'importance d'une interface adaptée à chaque étude et sa facilité d'utilisation. ANSYS, quant à lui, offre une large gamme d'analyses physiques, avec des modules spécifiques dotés d'interfaces optimisées pour accéder aux paramètres et fonctionnalités qui leur sont attribués. La deuxième partie a été consacrée à la construction du modèle physique, à l'intégration des propriétés du système et aux modifications apportées. Ces étapes permettent à ANSYS de prendre en compte des phénomènes tels que le changement de phase et le déplacement de l'interface, qui ne sont pas initialement pris en compte dans le logiciel.

CHAPITRE VI

Résultats et discussions

VI.1. Introduction :

Ce chapitre se concentre sur la présentation des résultats de la simulation numérique d'un modèle bidimensionnel. L'objectif principal est de démontrer la capacité du logiciel de calcul ANSYS à modéliser l'écoulement de convection naturelle dans une cavité contenant un matériau à changement de phase utilisé pour le refroidissement d'un panneau solaire.

Dans notre étude, nous avons analysé l'évolution du front de fusion sur ce processus. Le chapitre 3 présente la géométrie spécifique utilisée dans nos simulations ainsi que les conditions aux limites associées.

VI.2 Méthodologie :

Dans le but d'améliorer la visualisation des résultats, nous avons choisi de prendre plusieurs valeurs différentes répartis sur différents temps. Cela nous permet d'observer de manière optimale l'évolution des paramètres étudiés sur l'ensemble de liquéfaction du MCP. Sont détaillés dans le tableau IV. 1 :

<i>Time</i>	$T = 500s$	$T = 1000s$	$T = 1800s$
<i>Heat flux</i>			
$\dot{q} = 200w$	15.4%	15.4%	15.5%
$\dot{q} = 350w$	15.4%	15.4	15.5%
$\dot{q} = 600w$	15.4%	15.4%	15.5%

Tableau VI : Pourcentage liquéfaction.

Ce tableau représente le taux de fraction liquide du MCP RT40 par rapport à la valeur de solide, au cours de simulation et à différents moments suiviez par des différentes quantités de flux de chaleur.

Un changement significatif notable dans les valeurs maximales et minimales dans les taux. Ces résultats confirme qu'il existe un processus de fusion dans le MCP même si par un petit pourcentage.

VI. 3. Evolusion de front de fusion :

Les résultats quantitatifs obtenus sont illustrés à l'aide de pas mal simulation du fraction liquide. Nous nous sommes particulièrement intéressés à l'impact des ailettes sur la fonte du MCP au fil du temps, dans le but de déterminer la configuration optimale.

Avec un flux de chaleur constante $q' = 350w$ imposé à l'interface d'aluminium qui coller avec le MCP, *figure (VI. 2)*.

Cela influe sur le taux de fusion et la forme du front de fusion, c'est-à-dire y a un changement dans l'état de la matière ou le MCP.

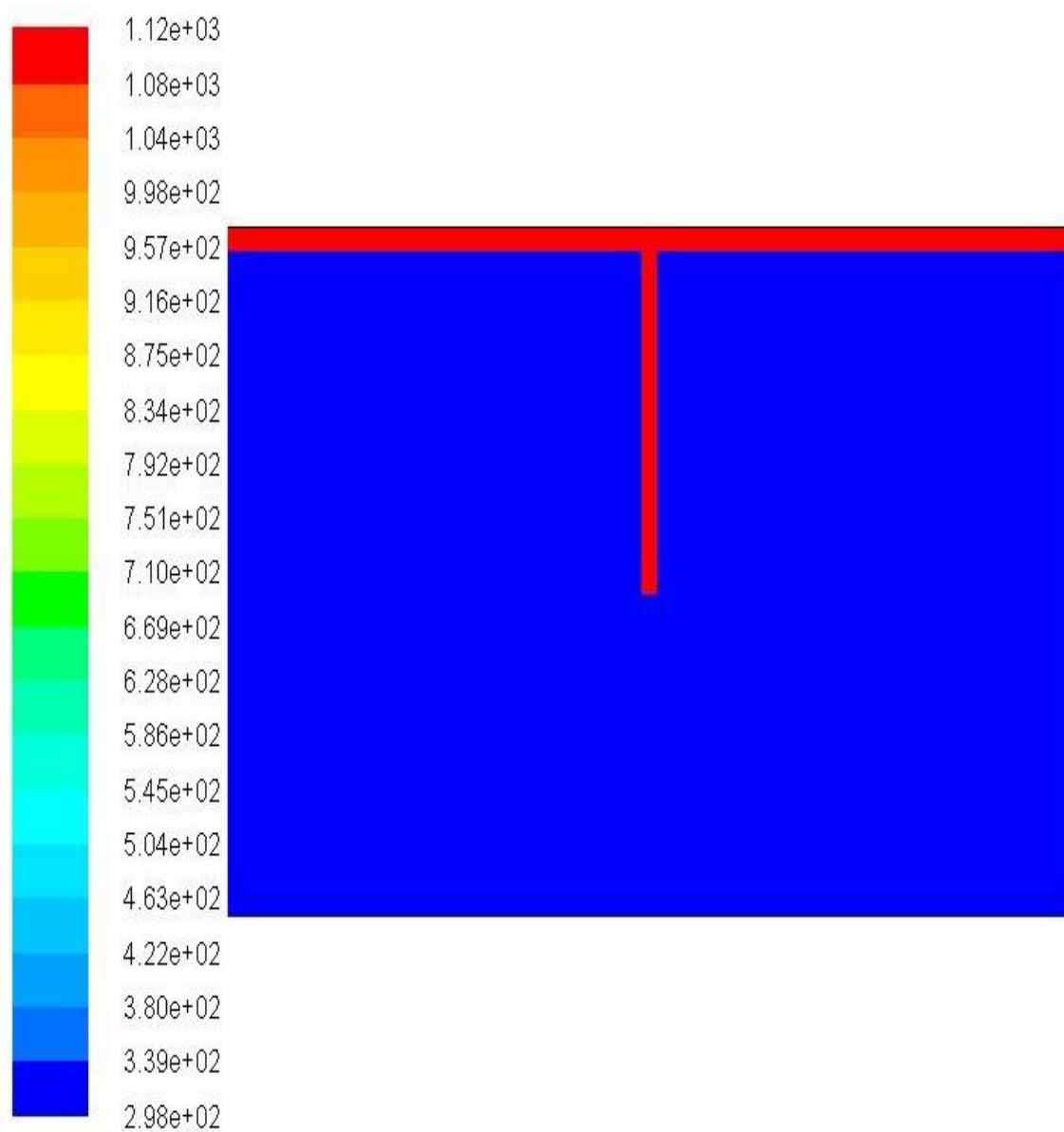
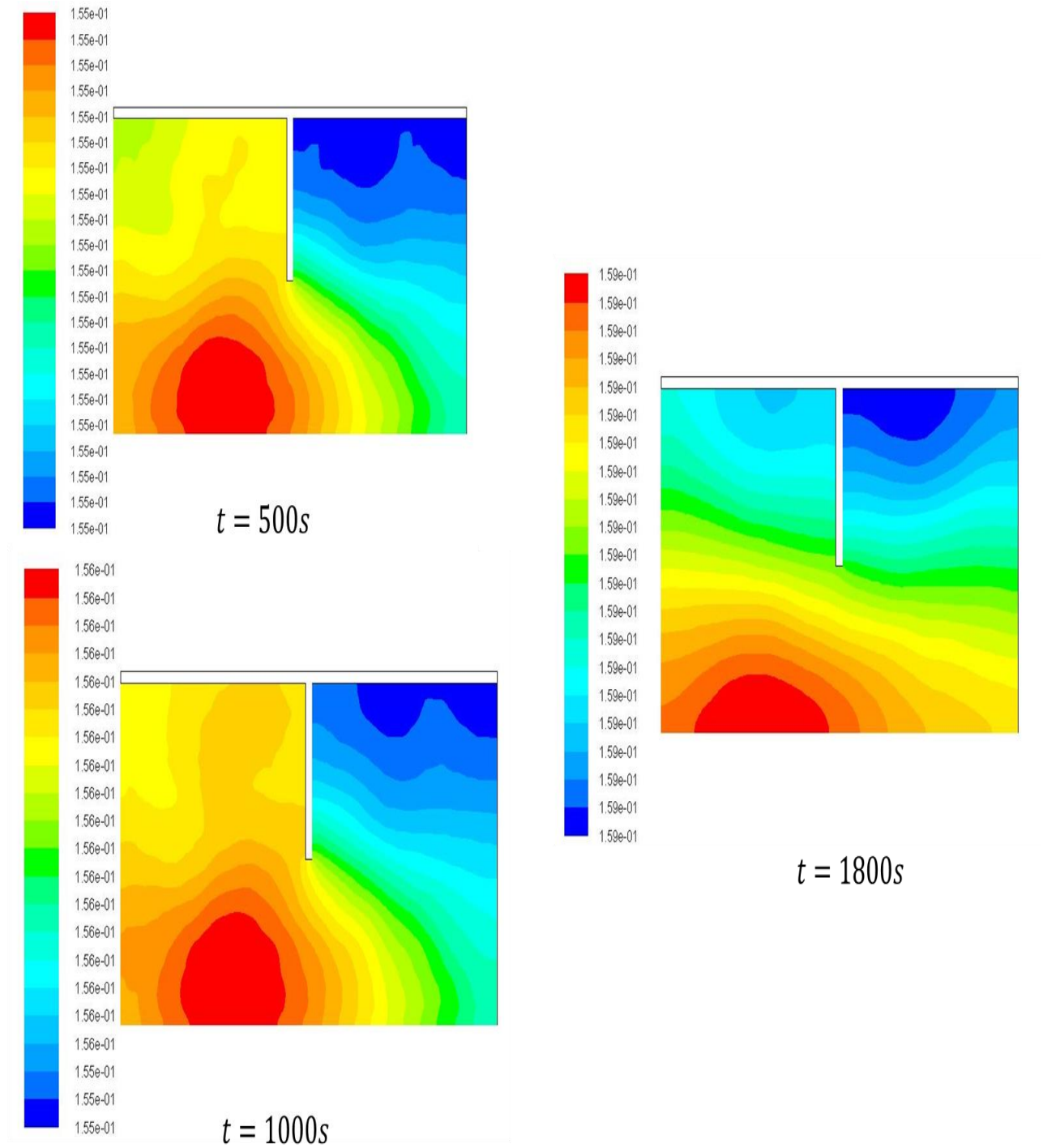


Figure VI. 1 : Début de la fusion $t=0s$



FigureVI.2 : contour de l'interface solide_ liquide à $q = \text{cst}$.

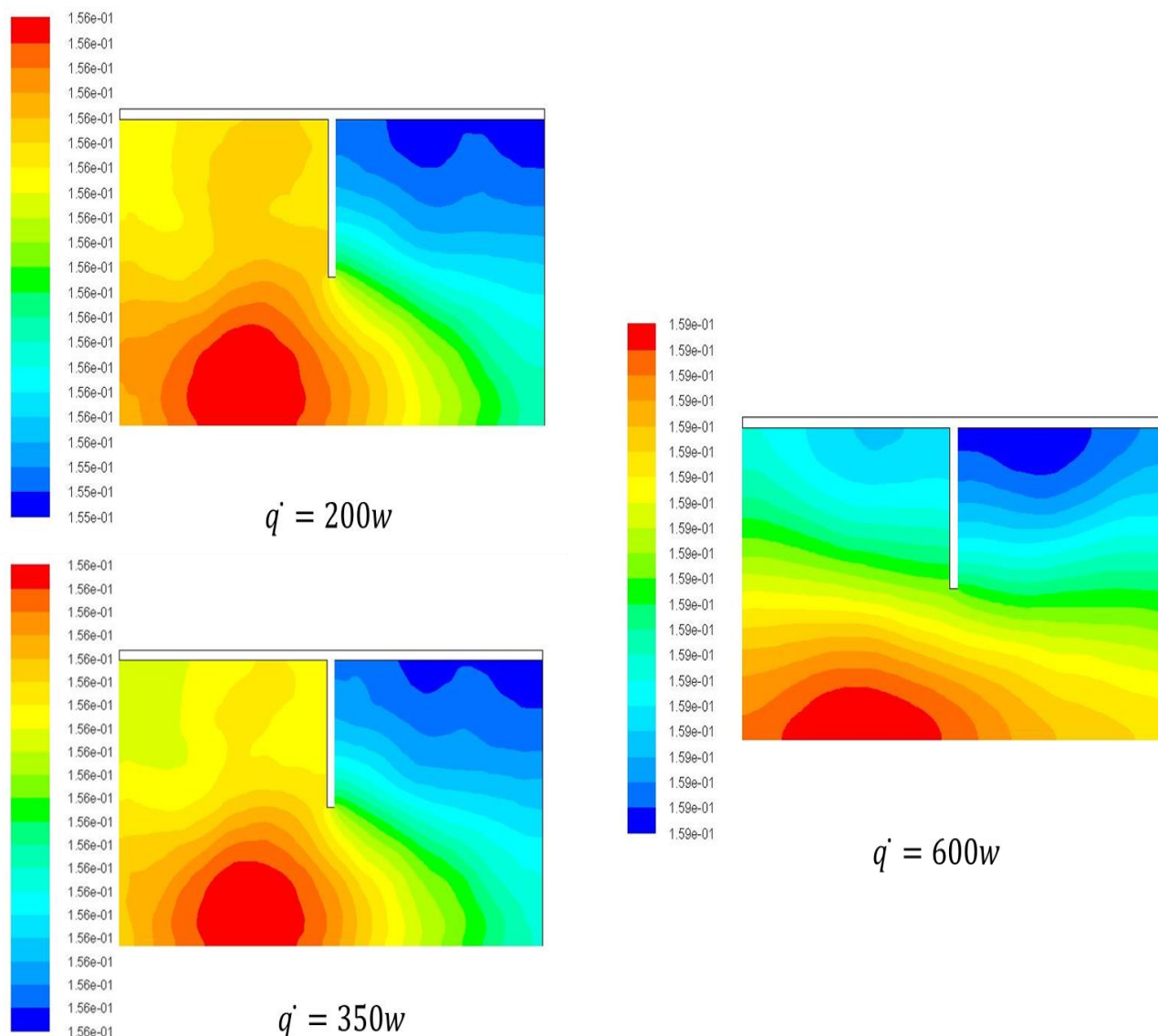
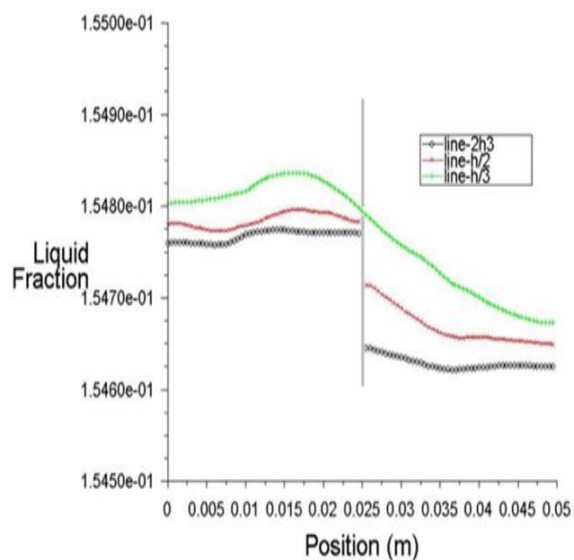


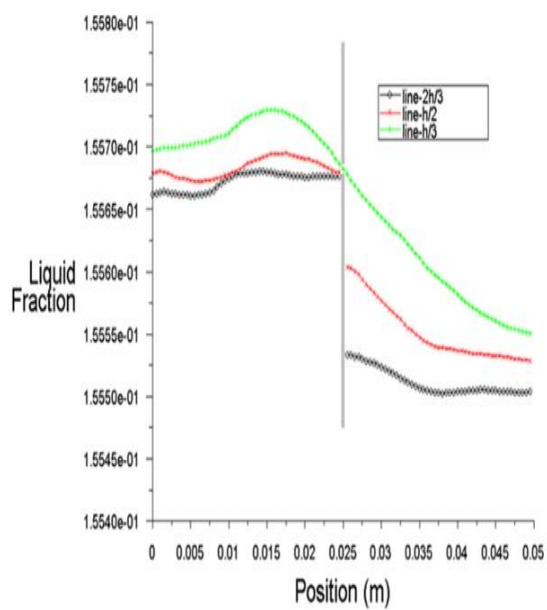
Figure VI.3 : Contour de l'interface de solide_liquide à $t = cst$.

Il faut noter que L'augmentation de fraction liquide relie avec la quantité de flux de chaleur qui à travers le MCP chaque moment comme le montre la *figure (VI.3)*.

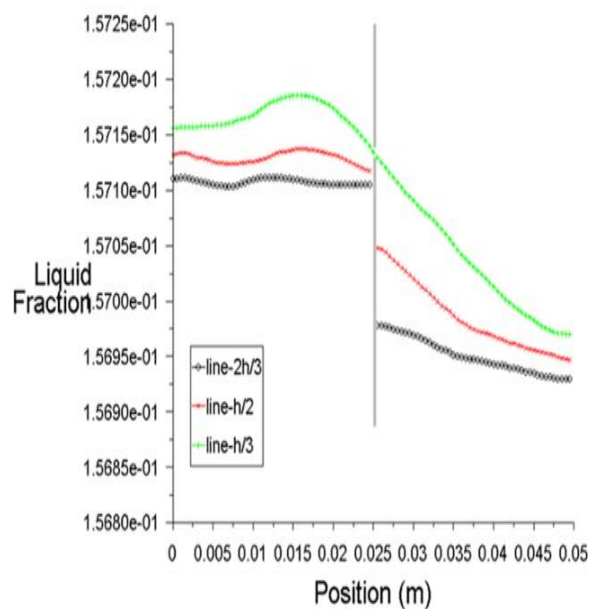
Les contours des lignes de courant montrent deux mouvements dans la zone fondue. Un mouvement ascendant au niveau de taux de fraction liquide et l'autre descendant proche de l'interface explique le taux de fraction solide.



$t = 500s$

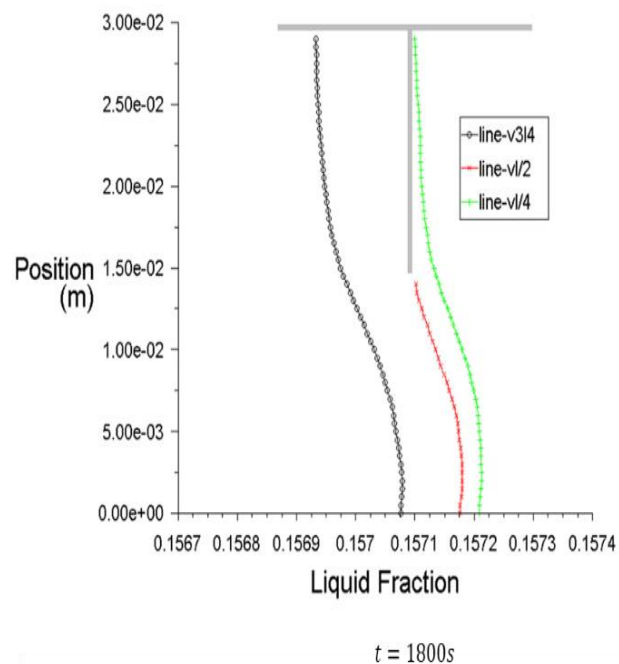
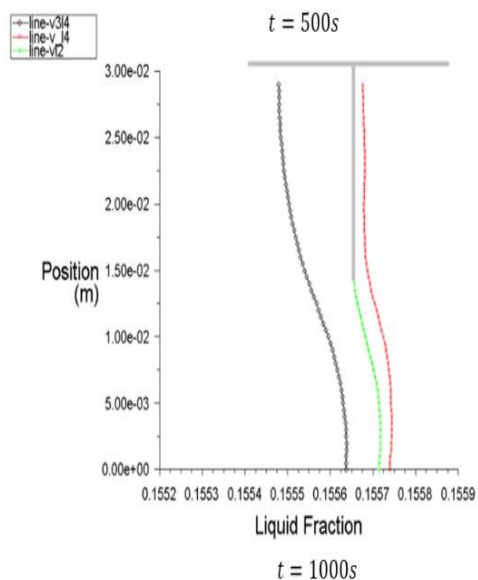
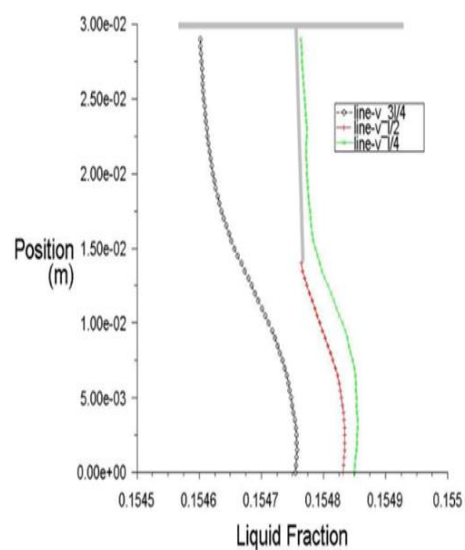


$t = 1000s$

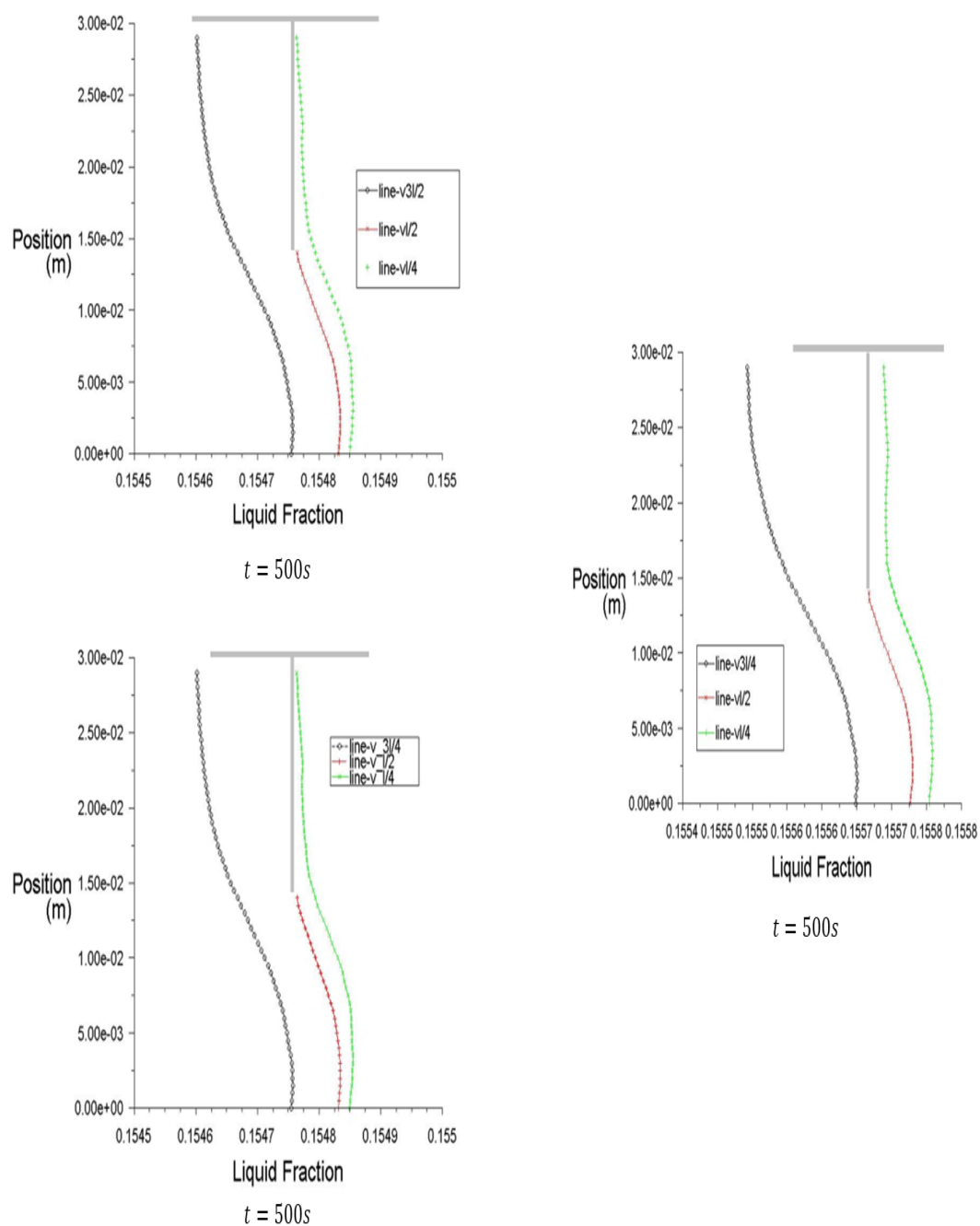


$t = 1800s$

Figure VI.4 : Evolution de la fraction liquide à q^* est en fonction du temps pour les lignes (H/4,H/3,2H/3)



FigureVI.5 : Evolution de la fraction liquide à q^*cst en fonction du temps pour les lignes ($L/4, L/2, 2L/3$)



FigureVI.6 : Evolution de la fraction liquide à q'est en fonction du temp pour les lignes (L/4,L/2,2L/3)

Notre objectif est d'analyser comment l'augmentation de flux évolue fraction liquide à l'intérieur de la cavité dans différentes zones de la géométrie dans les lignes de références cité plus haut. Les graphes VI. 4 et VI. 5 ,VI. 6 quelque ce soit le flux et constant à un changement du temp ou le contraire.

Au début de la fusion l'ailette la seule qui augmente leur température, par contre le MCP reste le même.

Après un bon moment la fusion on commence légèrement dans le bas de cavité, cette différence est probablement due à la différence de densité des états solide et liquide du MCP. Le liquide étant le plus chaude se trouve en le bas de la cavité cela revient à l'isolation du MCP dans les trois cotés. Elle continue d'augmente lentement à cause le matériau à changement de phase que nous avons choisi et ses caractéristiques contradictoires. En générale, peuvent être obtenus des résultats mais à long terme.

VI. 4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exposé les résultats essentiels obtenus à l'aide de l'approche numérique basée sur un modèle bidimensionnel pour décrire la fusion dans une unité de stockage remplie d'un matériau à changement de phase, l'absence de résultats récents et précis, étant donné que le travail n'est pas lié au réel juste un petit essai a permis découvrir la structure de la fusion de RT40 d'après le logiciel ANSYS.

Conclusion générale

Conclusion Général

La température de la cellule photovoltaïque est largement reconnue comme l'un des paramètres clés qui influence considérablement les performances énergétiques du panneau solaire.

Au cours de cette étude, notre objectif était de maintenir la température du panneau photovoltaïque (PV) à un niveau approprié en utilisant la chaleur latente.

Dans cette approche, nous avons intégré un matériau à changement de phase (PCM) solide-liquide ainsi qu'une ailette interne. Le MCP "RT40" sélectionné subit une transition de phase à 40°C.

Après avoir présenté les divers types de matériaux à changement de phase envisagés pour le stockage thermique, ainsi que les critères de sélection de ces matériaux et les applications les plus courantes du stockage par chaleur latente, il est apparu, à partir des recherches bibliographiques, qu'il existe une grande diversité en termes de types, de propriétés et de classifications des matériaux à changement de phase, adaptés à différentes applications.

Afin d'aborder une base théorique solide dans cette étude et compte tenu de la complexité du transfert de chaleur à l'intérieur de la cavité lors de la fusion, nous avons d'abord établi, dans le deuxième chapitre, les équations de conservation en utilisant certaines hypothèses simplificatrices.

Pour modéliser l'échange thermique à travers le système PV-MCP et prédire son comportement, nous avons opté pour la méthode des éléments finis. Cette méthode nous a permis de déterminer l'évolution du front de fusion de manière précise et détaillée dans la cavité. D'autre part, un maillage quadratique régulier structuré a été utilisé.

Les conclusions suivantes ont été tirées de notre étude :

- Insertion des ailettes dans la cavité pour améliorer le transfert thermique.
- L'étude du processus de la solidification.
- L'utilisation de différents types de MCP pour ce genre d'application.
- Cette étude devra être complétée par une étude expérimentale pour obtenir une analyse plus approfondie.

Références Bibliographiques

- [1] thèse doctorat Nehari Taieb, « Etude du refroidissement des cellules photovoltaïques par un matériau à changement de phase ».
- [2] <http://www.recuperation-chaleur.fr/stockage-par-chaleur-latente>.
- [3] R. Baetens, B.P. Jelle, A. Gustavsen, "Phase change materials for building applications: a state of-the-art review". Energy Build. (2010) 1361–1368
- [4] H.Mehling et L.F.Cabeza, Heat and cold storage with PCM, Springer - Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [5] ABHAT A. (1983) « Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials », Solar Energy Journal.
- [6] CABEZA « Review on thermal Energy Storage with phase change: materials, heat Transfer analysis and applications », Applied Thermal Engineering.
- [7] Mariam JADAL, Thèse de doctorat, « Caractérisation thermique d'un échangeur–stockeur constitué d'un matériau à changement de phase dans une structure conductrice », université de NANTES.
- [8] M. M. Ken sarin, « High-température phase change Materials for thermal Energy storage».2010
- [9] G.P. Fernanda, "Salt hydrates used for latent heat storage: corrosion metals and reliability of thermal performance", Solar Energy, vol. 41(2), (1988) 193–197.
- [10] V.V. Tyagi, D. Buddhui, "PCM thermal storage in buildings: A state of art", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2005.
- [11] Handbook of Chemistry and Physics, 47th Edition; Chemical Rubber Co., Cleveland, Ohio,1966
- [12] McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Engineering, McGraw-Hill Co., New York, 1971.
- [13] Besancon, R. M., The Encyclopedia of Physics, Reinhold Publishing Corp., New York, 1966.
- [14] Van Nostrand' s Scientific Encyclopedia, Third Edition; D. Van Nostrand Company, Inc., Princeton, New Jersey, 1958.
- [15] By D. V. Hale, M. J. Hoover, and M. J. O'Neill, PHASE CHANGE MATERIALS HANDBOOK; NASA CR-61363, Huntsville Research and Engineering Center 4800 Bradford Drive, September 1971.

[16] Dincer.I., Marc Rosen Thermal Energy Storage: Systems and Applications
Second Edition, edition Wiley, 2010.

[17] Jessica.K., and Giro.P., Types, method techniques. and applications for micro
encapsulated phase change materials (MCP): A review, Renewable and
Sustainable Energy Reviews, 53, 2016, pp 1059-1075.

[18] Dumas J. P., "Le stockage du froid par chaleur latente ", Technique de l'ingénieur, traité génie
énergétique, BE 9 775, pp.1-22, 1995

[19] Hill.J.M., One Dimensional Stefan Problems: an introduction, Scientific and
Technical, 1987.

[20] Stéphane Guichard. Contribution à l'Étude des Parois Complexes intégrant des Matériaux à
Changement de Phase : Modélisation, Expérimentation et Évaluation de la performance énergétique
globale. Physique Générale [physics.gen-ph]. Université de La Réunion, 2013. Français. -tel-01186458-

[21] Alain bricad-Dominique Gobi, Transmission de la chaleur, technique de l'ingénieur à 1570,1986. A

[22] A. Boumahrat et Gourdin, Méthodes numériques appliquées, Réimpression 1993 Alger. Edition TEC
et Doc- PARIS.

[23] A.N.KORTI, Modélisation numérique du transfert de chaleur lors de la solidification des métaux,
Mémoire de magister, Université Abou bekr belkaid, Algérie 2000.

[24] D. G. R. Sharma, Krishnan M., Ravindran C., Determination of the rate of latent heat liberation in
binary alloys, Materials Characterization 44 (2000) 309–320.

[25] J.S. Hasio, An effecient algorithm for finite difference analyses of heat transfer with melting and
solidification, Numerical heat transfer, (1985) vol 8, 653-666.

[26] s.v. patankar, Numerical heat transfer and fluid flow, Hemispher, Washinpto, DC (1980)196.

[27] R.I. Issa,A.D. gosman, A.P.Watkins.

[28] **Rong**-Tsonglce and Wu-Yao Chiou, Finite element analyses of phase-change problem using multivel
techniques, Numerical heat transfer, (1995),277-290.

[29] Saib Hind, Etude de simulation des phénomènes de transfert thermique lors de la solidification
d'alliages, mémoire de magister 2009.