

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique

Université M'Hamed Bougara Boumerdes

Faculté des Sciences de L'Ingénieur

Département énergétique



## *Mémoire*

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Mécanique

**Spécialité:** Thermique et Combustion

## *Thème*

*Simulation numérique du stockage thermique  
par chaleur latente dans une capsule sphérique*

*Encadré par :*

**Mr: K.MANSOURI**

*Réalisé par :*

- **BERREKSI SARA**
- **LATARSA SAMIHA**

**2015 /2016**



## ***REMERCIEMENT***

Nous tenons à remercier *Dieu* le tout puissant de nous avoir donné le courage, la force et la volonté pour réaliser ce travail.

Nous remercions vivement et chaleureusement Monsieur **Mansouri Kacem** notre promoteur, pour nous avoir soutenus et guidés tout au long de ce mémoire.

Nous remercions tous nos enseignants qui nous ont orientés dans notre parcours d'étude de licence et de master sans oublier le chef de département **Mr Brachemi**.

Nous tenons à remercier Mr. M.Bechiri pour son aide.

Mes remerciements vont aux membres de jury qui ont pris soin d'examiner le travail présenté dans ce mémoire.

Sans oublier ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail, et ceux qui ont fait l'honneur de jurer ce mémoire.



# Dédicace

*J'ai un grand plaisir de dédier ce modeste travail à :*

*Ma très chère mère, cette femme qui m'a donnée tous ce que j'ai  
Voulue dans tous ma vie, le courage, la volante, et l'apprentissage  
culture, c'est ma mère ma fierté dans ma vie, qui demeure à jamais  
dans mon cœur.*

*Mon cher père en témoignage et en gratitude de son dévouement ;  
de son soutien permanent durant toutes mes années d'étude ;  
son sacrifice illimité ; son réconfort moral.*

*Ma très chère sœur : Rawya.*

*Mes chers frères : Mourad, Khaled.*

*Ma sœur et binôme Sara.*

*Ma très chère amie Meriem.*

*Mes meilleurs amies: Sara, Sonia, Merry, Marwa, Aziza.*

*Toute la famille LATARSA surtout mes oncles sans exception.*

*Tous mes enseignants chacun son nom*

*Chaque personne qui nous aidé chacun son nom.*

*Tout le groupe de MTC14.*

**SAMAH**

# Dédicace

*J'ai un grand plaisir de dédier ce modeste travail à :*

*A ma très chère mère et mon très chère père, qui n'ont jamais cessé de m'encourager et de me soutenir dans les moments difficiles, pour leur affection, leur amour et leur confiance pour que je puisse réussir. Que*

*ELLAH me les protège*

*A mes très chers frère : fouzi et abdellah*

*A mes très chers sœur : Zahra, Assia, Razika, Hafida*

*A mon petit frère Radwane*

*A une personne qui ma très cher Hamza*

*A ma sœur et binôme Samiha*

*A ma très cher amie Meriem*

*A toutes ma famille chacun son nom*

*Ainsi que tout ma belle famille*

*Tout les enseignants qui m'ont suivi depuis le début de mon parcours scolaire surtout les enseignants de département*

*ENERGETIQUE*

*Mes Amies : Sara, Sonia, Meriem, Marwa*

*Ainsi que tous mes amis*

*Tout le groupe MTC14*

**SARA**





# *Sommaire*

# Sommaire

---

## Remerciement

## Dédicaces

## Liste des figures

## Liste des tableaux

## Nomenclature

## Introduction générale..... 1

### Chapitre 01: Recherche bibliographique

1-1-Introduction .....	3
1-2- Stockage d'énergie par chaleur latente dans les plaques .....	3
1-3- Stockage d'énergie par chaleur latente dans les cylindres.....	6
1-4- Stockage d'énergie par chaleur latente dans les capsules sphériques.....	10
1-5- Introduction de nanoparticules dans les fluides de base.....	21
1-6- Conclusion .....	23

### Chapitre 02 : Généralités sur le stockage thermique et les matériaux à changement de phases

#### Le stockage d'énergie

2-1-Introduction .....	24
2-2-Stockage d'énergie.....	24
2-3-Différentes types de stockage .....	25
3-1-Stockage mécanique .....	25
3-2- Stockage thermochimique .....	25
3-3- Stockage électrique .....	25
3-4- Stockage thermique .....	25
3-5- Stockage chimique.....	26
2-4- Le stockage d'énergie thermique.....	26
4-1- Stockage d'énergie thermique par chaleur sensible.....	26
4-2- Stockage d'énergie thermique par chaleur latente.....	27
2-1- Les avantages du stockage par chaleur latente .....	27
4-3- stockage d'énergie thermique par voie thermochimique.....	28
3-1- Principe de fonctionnement .....	29
2-5- Comparaison entre les différents types de stockage d'énergie thermique.....	30



#### Les matériaux à changement de phase

2-1- Définition d'un matériau à changement de phase.....	31
2-2- Les différents changements d'état.....	32



## Sommaire

---

2-3- Principe de fonctionnement .....	32
2-4- Types des matériaux à changement de phase (MCP) .....	33
a- Les MCP Organiques .....	33
b - Les MCP inorganiques.....	35
c- Les MCP eutectiques.....	35
2-5 - Caractéristiques de quelques MCP .....	36
2-6-Classification des matériaux à changement de phase .....	38
2-7-Comparaison entre les différents types de MCP.....	38
2-8 -Classe de MCP.....	39
8-1-Matériaux changement de phase SP .....	39
8-2-Matériaux changement de phase RT .....	39
2-9- Quelques phénomènes ayant un impact sur l'efficacité du stockage .....	40
2-10-Applications des MCP .....	41
10-1-Le transport de produits alimentaires .....	41
10-2-Stockage de l'énergie thermique .....	41
10-3-L'industrie textile .....	42
10-4 - Application aux bâtiments .....	42
4-1-Méthodes d'utilisation du MCP dans les bâtiments .....	43
4-2-Exemples d'application des MCP aux bâtiments .....	44
 Les nanoparticules	
2-1-Introduction .....	45
2-2-Définition des nanoparticules .....	45
2-3-Nanoparticules et les fluides porteurs.....	45
2-4-Utilisation des nanoparticules dans le domaine d'énergie.....	46
2-5-Propriétés thermophysiques des nanofluides.....	46
5-1- Conductivité thermique .....	46
5-2-Masse volumique et chaleur massique .....	49
5-3-Viscosité dynamique.....	49
Conclusion.....	49
<b>Chapitre 3: Simulation numérique</b>	
 <b>Partie I</b>	
3-1-Introduction .....	50
3-2- Description du problème.....	50
2-1- Modèle physique.....	50
2-2-Condition aux limites.....	52
3-3-Modélisation mathématique.....	53
3-1-Maillages .....	54



## Sommaire

---

3-4-Résultats et discussion .....	55
4-1-Analyse des résultats .....	56
<b>✚ Partie II</b>	
3-5- Introduction .....	66
3-6- Modèles mathématiques des NEPCM .....	66
3-7- Résultats et discussion .....	67
7-1- Analyse des résultats .....	67
3-8- Conclusion .....	69
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>70</b>
<b>Références bibliographiques</b>	

### Liste des figures

#### Chapitre 1 : Recherche bibliographique

<b>Fig.1.1:</b> Mur avec MCP et isolant transparent .....	4
<b>Fig.1.2:</b> Schéma du plancher chauffant.....	4
<b>Fig.1.3 :</b> Coupe verticale.....	5
<b>Fig.1.4 :</b> Dispositif expérimental de stockage.....	6
<b>Fig.1.5:</b> Schéma de système d'énergie thermique de tube à ailette.....	7
<b>Fig.1.6:</b> Distribution du front de fusion Suivant la direction axiale pour différents temps ( $\tau=50,150,400$ ).....	7
<b>Fig.1.7:</b> Unité de stockage de chaleur latente .....	8
<b>Fig.1.8 :</b> Distribution de température radiale à $X = 12.73$ en fonction du temps pendant la solidification.....	8
<b>Fig.1.9 :</b> Le modèle physique étudié.....	9
<b>Fig.1.10 :</b> Schéma du système de stockage d'énergie thermique latente: a) unité de stockage, b) module de stockage.....	9
<b>Fig.1.11 :</b> Energie stockée dans le MCP pour différent nombre de Reynolds ( $R_1=1$ cm, $R_2=2$ cm et $L=10$ cm). .....	10
<b>Fig 1.12 :</b> Schéma du nodule et cuve de stockage .....	10
<b>Fig1.13 :</b> Températures aux différentes positions du nodule durant un refroidissement continu. ....	11
<b>Fig.1.14:</b> Schéma du lit de stockage .....	12
<b>Fig.1.15:</b> Evolution de la température moyenne du lit en fonction du temps.....	12
<b>Fig.1.16:</b> Distribution de la température dans le lit pour une température d'air constante, durant le stockage.....	12
<b>Fig.1.17:</b> Plan de la situation expérimentale.....	13
<b>Fig.1.18 :</b> Système solaire à changement de phase.....	13
<b>Fig.1.19:</b> Effet de fondre de température et l'efficacité en fonction de pourcentage de stockage d'énergie.....	14
<b>Fig1.20:</b> Effet du MCP multiple sur la fraction de l'exergie détruite.....	14
<b>Fig.1.21:</b> Photographies de l'expérience avec la N-octadécane encapsulé dans une sphère et les résultats des simulations .....	15
<b>Fig.1.22:</b> Evolution de T vs. Temps, pour les résultats numériques et expérimentales, a deux positions différents de l'axe verticale.....	15
<b>Fig.1.23:</b> Le modèle Physique. ....	16

## Liste des figures

---

<b>Fig.1.24 :</b> Résumé des résultats numériques: (a) ...Variation de la fraction de fusion en fonction du temps pour différent diamètres et les différences de température et(b)...Variation de la fraction de fusion pour différent produit Foste.....	16
<b>Fig.1.25:</b> Lit garni et détails de système de stockage .....	17
<b>Fig.1.26:</b> Fraction solide de capsule sphérique pour différent rayons de la capsule .....	17
<b>Fig.1.27:</b> Schéma du montage expérimental.....	18
<b>Fig.1.28:</b> Variation de température de MCP en fonction de temps pour différent diamètres de capsule.....	19
<b>Fig.1.29:</b> Diagramme schématique de lit garni stratifié.....	19
<b>Fig.1.30 :</b> Comparaison entre les résultats numérique et les résultats expérimentaux.....	20
<b>Fig.1.31:</b> Taux de transfert d'énergie par rapport au temps de charge .....	20
<b>Fig.1.32:</b> Schéma du système étudié.....	21
<b>Fig.1.33 :</b> Une comparaison entre les résultats de simulation numérique et les données expérimentales sur le profil de température du lit.....	21
<b>Fig.1.34 :</b> Variation de temps de charge pour le système TES à $y/H= 0,5$ avec une vitesse d'écoulement de HTF de 1 L / min .....	22
<b>Fig.1.35 :</b> Conductivité thermique du mélange paraffine/ $Al_2O_3$ et de la paraffine pure.....	23
<b>Fig.1.36(a) :</b> Conductivité thermique en fonction de la fraction massique.....	24
<b>Fig.1.36(b):</b> Chaleur latente du NEPCM en fonction de la fraction massique.....	24
<b>Chapitre 2 : Généralités sur le stockage thermique et les matériaux à changement de phases</b>	
<b>Fig.2.1 :</b> Stockage d'énergie thermique par chaleur sensible et latente.....	29
<b>Fig.2.2 :</b> Schéma de principe d'un système de stockage par voie thermochimique .....	30
<b>Fig.2.3 :</b> Exemple : l'eau.....	32
<b>Fig.2.4 :</b> Principe de fonctionnement des MCP .....	33
<b>Fig.2.5 :</b> Acide gras.....	34
<b>Fig.2.6 :</b> Paraffines brutes, en capsulées, en poudre ou en granulés.....	35
<b>Fig.2.7:</b> Sels Hydratés.....	35
<b>Fig.2.8 :</b> Lauric Acide.....	36
<b>Fig.2.9 :</b> Classification des matériaux à changement de phase (PCM).....	38
<b>Fig.2.10 :</b> Représente le phénomène de surfusion .....	40
<b>Fig.2.11 :</b> Les applications Transport de produits alimentaires.....	41
<b>Fig.2.12 :</b> L'efficacité de MCP dans les textiles.....	42
<b>Fig.2.13 :</b> Isolation thermique d'un bâtiment.....	43
<b>Fig.2.14:</b> paraffine encapsulé.....	43

## Liste des figures

---

<b>Fig.2.15:</b> Capsules de différentes formes: parallélépipédiques, cylindriques, sphériques.....	44
<b>Fig.2.16 :</b> Mur béton intégrant un MCP.....	44
<b>Fig.2.17:</b> La micro encapsulation des MCP Dans le domaine de construction.....	44
<b>Chapitre 3 : Simulation numérique</b>	
<b>Fig.3.1 :</b> Circuit de stockage par chaleur latente.....	50
<b>Fig.3.2 :</b> Module de stockage.....	51
<b>Fig.3.3 :</b> Le domaine du calcul.....	53
<b>Fig.3.4 :</b> Maillage du domaine de calcul.....	55
<b>Fig.3.5:</b> Variation de la fraction liquide en fonction du temps pour différentes températures de la paroi.....	57
<b>Fig.3.6 :</b> Variation de flux de chaleur en fonction du temps pour différentes températures de la paroi.....	58
<b>Fig.3.7 :</b> Variation de température au centre de la sphère en fonction de temps pour différentes températures de la paroi. ....	58
<b>Fig.3.8 :</b> Effet de nombre de Stefan sur la fraction liquide en fonction de temps.....	59
<b>Fig.3.9 :</b> Effet de nombre de Stefan sur le flux de chaleur en fonction de temps.....	60
<b>Fig.3.10 :</b> Effet de nombre de Stefan sur la température au centre de la sphère en fonction de temps. ....	61
<b>Fig.3.11 :</b> Effet de rayon sur la fraction liquide en fonction de temps .....	62
<b>Fig.3.12 :</b> Variation de la température en fonction de temps au centre de la sphère pour différentes $T_i$ .....	63
<b>Fig.3.13a:</b> Contour de la fraction solide et les lignes de courant.....	64
<b>Fig.3.13b:</b> Contour des isothermes durant la fusion .....	65
<b>Fig.3.14 :</b> Module de stockage par chaleur latente. ....	66
<b>Fig.3.15:</b> Variation de la fraction liquide en fonction du temps pour différentes concentrations .....	68
<b>Fig.3.16 :</b> Evolution transitoire de la température du NEPCM au centre de la sphère pour différentes concentrations.....	68

## Liste des tableaux

### Chapitre 2 : Généralités sur le stockage thermique et les matériaux à changement de phase

Table.2.1 : Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur.....	31
Table.2.2 : Avantages et inconvénients des différents changements d'état.....	33
Table.2.3 : Propriétés thermiques de certains MCP .....	36
Table.2.4: Caractéristiques de quelques MCP organiques .....	37
Table.2.5 : Caractéristiques de quelques MCP inorganiques .....	37
Table.2.6 : Liste de quelques eutectiques.....	38
Table.2.7 : Avantages et désavantages des différentes catégories de MCP .....	39

### Chapitre 3: Simulation numérique

Table.3.1: Propriétés thermophysiques des matériaux utilisés.....	52
Table.3.2 : les différentes cas analysés.....	56
Table.3.3: Propriétés thermophysiques des nanoparticules utilisées .....	67
Table.3.4 : Propriétés thermophysiques du mélange (NEPCM). .....	67

---

### Nomenclature

#### Symboles

T	Température (°C)
$T_i$	Température initiale de la paroi (°C)
t	Temps (s)
k	Conductivité thermique ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )
h	Coefficient de transfert thermique convectif ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ )
$C_p$	Chaleur spécifique ( $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ )
L	Chaleur latente de fusion ( $\text{J}/\text{kg}$ )
G	Accélération gravitationnelle ( $\text{m}/\text{s}^2$ )
$R_i$	Rayon intérieur (m)
$T_m$	Température de fusion (°C)
$T_w$	Température de la paroi (°C)
$\bar{T}$	Température de référence (°C) $((T_m + T_w)/2)$
Pr	Nombre de Prandtl ( $\mu C_p/k$ )
Ste	Nombre de Stefan ( $C_p (T_w - T_m)/L$ )
Gr	Nombre de Grashof ( $g\beta(T_w - T_m)R_i^3\rho^2/\mu^2$ )

#### Symboles grec

$\rho$	Densité ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$\alpha$	Diffusivité thermique ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
$\beta$	Coefficient de dilatation thermique ( $\text{K}^{-1}$ )
$\mu$	Viscosité dynamique ( $\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$ )
$\nu$	Viscosité cinématique ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
$\xi$	Paramètre de sous refroidissement $1-(T_i/T_m)$
$\chi$	Paramètre de matériaux de sphère $1-(k_{\text{pcm}}/k_{\text{paroi}})$
$\gamma$	Fraction liquide
$\phi$	Fraction volumique

#### Abréviation

MCP	matériaux à changement de phase.
HTF	fluide caloporteur.
SET	stockage d'énergie thermique.
NEPCM	nano-matériau à changement de phase.

---



***Introduction  
Générale***



# Introduction générale

---

## Introduction générale

Au cours de ces dernières décennies, la demande de l'énergie sous ses différentes formes n'a cessé d'augmenter, vue le développement et la croissance de l'activité industrielle et la demande du confort dans la vie quotidienne comme dans le transport, le chauffage et la climatisation. Les énergies fossiles dont le pétrole, le charbon et le gaz naturel fournissent actuellement la majeure partie des besoins mondiaux.

Pour cela, la production de nouvelles sources d'énergie est l'enjeu majeur le plus important de notre temps, aux vue des publications et les recherches réalisées dans ce domaine dans le but d'améliorer l'efficacité énergétique.

Parmi les énergies renouvelables, on cite l'utilisation de rayonnement solaire qui est associé à des systèmes de stockage d'énergie thermique. En général, stocker de l'énergie consiste à l'emmagasiner pendant une période où elle est abondante ou moins coûteuse (solaire, tarifs de nuit...) pour l'utiliser pendant une période durant laquelle elle est rare ou plus chère.

La nature intermittente de l'énergie solaire pose des problèmes de stockage. Il est nécessaire de développer des dispositifs de stockage permettant le transfert d'énergie des périodes excédentaires aux périodes déficitaires et adapter ainsi sa production à sa consommation. Ce stockage peut être sous forme de chaleur sensible ou de chaleur latente.

Le stockage thermique par chaleur latente dans les liquides ou les solides peut être un moyen très intéressant en utilisant des matériaux à changement de phase, ce sont des matériaux capables de changer d'état physique dans une plage de température restreinte. Dans cet intervalle de température, le changement de phase le plus courant est la fusion /solidification. Ces matériaux présentent l'avantage de stocker une grande quantité d'énergie avec un bon rapport masse/volume.

Actuellement, les matériaux à changement de phase (MCP) ont une conductivité thermique assez faible de l'ordre de 0,2 w/m.K en moyenne ce qui ne permet pas d'avoir un bon transfert thermique pendant les processus de charge/décharge. Pour résoudre ce problème pendant chaque processus, l'injection des particules solides très fines dans le PCM est proposée.

Dans le cadre de ce travail, on s'intéresse à l'étude numérique de stockage de l'énergie thermique par chaleur latente dans un matériau à changement de phase encapsulé dans une enceinte sphérique, le présent mémoire comporte trois chapitres :

## Introduction générale

---

Le premier chapitre est une synthèse bibliographique des recherches sur le stockage thermique dans les matériaux à changement de phase dans les trois configurations plane, cylindrique et sphérique. Aussi quelques études de stockage d'énergie avec un mélange PCM/nanoparticules.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté des généralités sur le stockage thermique, les matériaux à changement de phase et les nanoparticules.

Le troisième chapitre est consacré à la simulation numérique, discussion et interprétation des résultats. En fin dans la conclusion, on donne un résumé de l'essentiel des résultats obtenus.

# Chapitre I

Etude

Bibliographie

## 1-1-Introduction

Le contexte énergétique a poussé les scientifiques à réfléchir à l'utilisation de l'énergie solaire qui possède le double avantage d'être gratuite et propre. Toutefois, l'inconvénient de cette source d'énergie est son intermittence. En effet, souvent le besoin de l'apport d'énergie est décalé par rapport aux besoins. L'une des solutions envisagées pour faire face à ces problèmes est le stockage de l'énergie.

Le stockage est un moyen très important pour une gestion optimale de l'énergie thermique. Il permet en effet d'adapter la production aux besoins et de créer les conditions les plus favorables à cette gestion en réalisant une relation constante entre l'énergie demandée et l'énergie fournie. Le stockage d'énergie thermique est généralement fait sous deux formes:

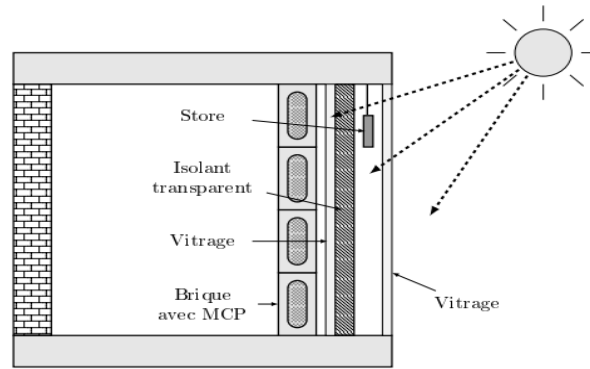
Le stockage par chaleur sensible consiste à apporter de la chaleur à un matériau sans changement de phase et exploiter la capacité calorifique d'un matériau. Le stockage par chaleur latente consiste à exploiter la quantité d'énergie engagée lors du changement d'état d'un corps. La règle des phases implique qu'à pression atmosphérique et pour un corps pur, ce changement d'état se produit à température constante.

Les matériaux à changement de phase (PCM) présentent un inconvénient majeur, à savoir leur faible conductivité thermique. L'addition des nanoparticules de haute conductivité thermique améliore les performances de stockage.

Dans notre travail on s'intéresse au stockage d'énergie par chaleur latente dans les matériaux à changement de phase. Afin de réaliser ce travail on fait une recherche bibliographique sur le stockage de la chaleur dans un matériau à changement de phase.

## 1-2- Stockage d'énergie par chaleur latente dans les plaques

**Manz et al (1997)** [1] ont proposé un mur alliant un MCP et un TIM. Le MCP est contenu dans des briques en verre et transmet le spectre visible du rayonnement solaire, en produisant un éclairage naturel. L'autre partie du rayonnement –principalement l'infrarouge- est absorbée et stockée comme chaleur latente lors de la fusion du matériau. En outre, pour remédier aux déperditions constatées dans d'autres types de mur stockeurs, sans empêcher la lumière de passer au travers, un matériau isolant transparent est mis en surépaisseur de la paroi.

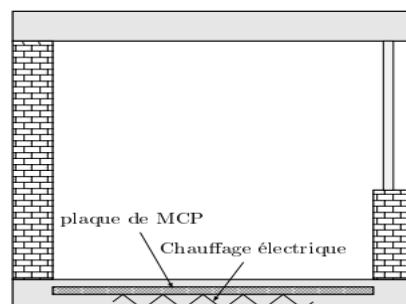


**Fig.1.1:** Mur avec MCP et isolant transparent.

Le MCP utilisé par Manz et al était un sel hydraté avec température de fusion de  $26.5^{\circ}\text{C}$ . Outre leur prototype (FIG. 1.1), ils ont fait un modèle numérique unidimensionnel couplant conduction et rayonnement. Ils ont comparé leurs résultats numériques aux expériences, en utilisant les données d'une seule brique au milieu de la paroi afin d'éviter les effets des bords.

**Kudhair et al (2004) [2]** présentent une revue détaillée des systèmes de stockage de l'énergie thermique utilisant les MCPs pour des applications du bâtiment. Ce travail présente les différentes méthodes d'incorporation des MCPs au sein de l'enveloppe. Les auteurs concluent que l'inclusion des MCPs dans l'enveloppe du bâtiment permet de minimiser les fluctuations de température en utilisant l'énergie solaire. Néanmoins, des problèmes persistent quant à la sélection du matériau.

**Tyagi et Buddhi (2007) [3]** ont utilisé un système actif pour délester le réseau électrique durant les périodes de consommation de pointe ; l'énergie électrique est donc préférentiellement utilisée en heure creuse lorsqu'elle est à moindre coût pour être stockée sous forme de chaleur latente. Le principe est de fondre ou de solidifier un MCP en heure creuse pour le solidifier en heure pleine et ainsi restituer la chaleur à la pièce.



**Fig.1.2 :** Schéma du plancher chauffant.

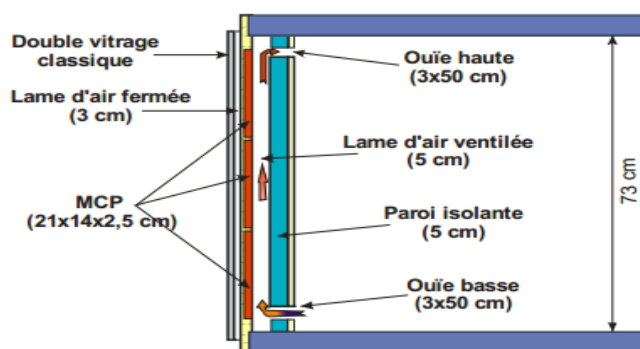
## Chapitre 1

---

Une application de ce système est le plancher chauffant (voir Fig.1.2). Dans ce système, une couche de MCP est placée entre le sol et une plaque électrique. La plaque électrique est utilisée pour chauffer et fondre le MCP pendant la nuit (ou les heures durant lesquelles l'électricité est moins chère), puis, pendant la matinée, le MCP restitue la chaleur vers la pièce sans besoin d'énergie électrique. Des études expérimentales ont montré une amélioration du confort thermique, du fait de la stabilité des températures et un avantage économique, car plus de la moitié de la puissance électrique totale est utilisée en heure creuse au lieu de l'être en heure pleine.

**Zhu, Ma et Wang (2009) [4]** relatent les travaux sur la caractérisation dynamique du comportement des MCPs, nécessaire pour optimiser leur utilisation. Un point sur les performances des bâtiments intégrant des MCPs est présenté. Les auteurs concluent que l'utilisation des MCPs a des conséquences positives sur les performances énergétiques d'un bâtiment mais que les études demeurent insuffisantes pour prédire correctement les gains possibles. Aussi, le transfert de chaleur est parfois insuffisant et la sélection d'un MCP doit être faite selon le climat dans lequel se trouve le bâtiment.

**Younsi (2009) [5]** a réalisé une étude thermique d'un mur solaire composite intégrant des matériaux à changement de phase. Dans les composants solaires passifs intégrables dans les parois de l'enveloppe des bâtiments. Le mur étudié est un mur solaire composite (fig.1.3) qui intègre des éléments (briquettes parallélépipédiques) contenant du matériau à changement de phase. Le MCP est un mélange de sels hydratés, eau + chlorures de calcium et de potassium + additifs. Sa température de fusion est égale à +27 °C. Le MCP est conditionné dans une enveloppe en polyoléfine.



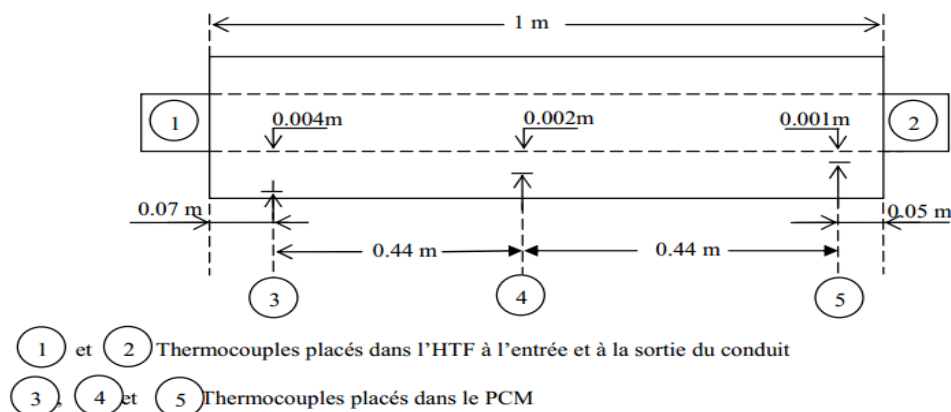
**Fig.1.3 :** Coupe verticale.

Ils ont montré quelles précautions étaient nécessaires lorsqu'ils voulaient comparer le stockage d'énergie sensible d'un matériau classique avec le stockage d'un matériau à changement de phase. Ensuite, ils se sont intéressés au déphasage qu'engendrait un mur solaire composite constitué de 2,5 cm de matériau à changement de phase comparé à un mur de béton de 15 cm d'épaisseur ayant approximativement les mêmes capacités de stockage. Pour terminer, ils se sont penchés sur l'efficacité de la paroi solaire en s'intéressant à différents paramètres susceptibles de les renseigner sur son comportement thermique.

### 1-3- Stockage d'énergie par chaleur latente dans les cylindres

Lacroix (1993) [6] a développé un modèle théorique pour prédire le comportement transitoire d'une unité de stockage constituée de tubes cylindriques en matériau à changement de phase (PCM), avec un fluide caloporteur (HTF) circulant à l'intérieur des tubes en régimes laminaire et turbulent. Le problème de stockage est traité avec la méthode d'enthalpie couplée avec le transfert de chaleur par convection dans le fluide caloporteur. Les prédictions numériques sont validées avec les données expérimentales. Une série d'expériences numériques est réalisée pour évaluer les effets de différents paramètres thermiques et géométriques sur le processus de transfert de chaleur et sur le comportement du système de stockage. Les résultats montrent que le rayon du tube, le débit massique et la température d'entrée du fluide doivent être choisis avec soin afin d'optimiser les performances de l'appareil.

L'unité de stockage est montrée dans la [figure \(1.4\)](#).



**Fig.1.4 :** Dispositif expérimental de stockage.

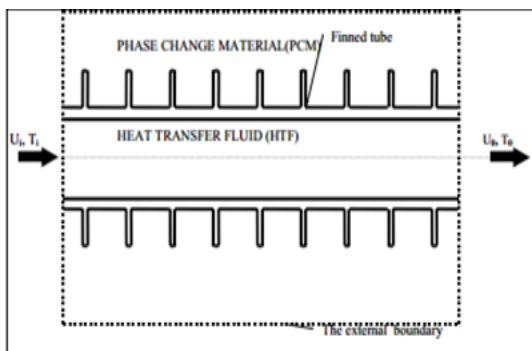


## Chapitre 1

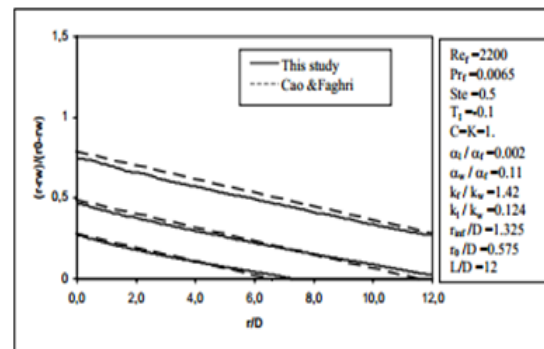
**Erek (2003) [7]** a étudié l'amélioration du transfert de chaleur dans un système de stockage d'énergie thermique en utilisant des tubes à ailettes. La solution du système consiste en la résolution des équations du fluide de transfert (HTF), de la paroi et la nageoire, et le matériau à changement de phase (PCM) en un seul domaine.

Le changement de phase étudié est un phénomène bidimensionnel autour d'un tube horizontal à ailettes radiales. La distribution de la température dans le réservoir de stockage, la quantité d'énergie stockée sont calculés avec précision.

Le modèle physique du problème, est représenté sur la [figure 1.5](#).



**Fig.1.5:** Schéma de système d'énergie thermique de tube à ailette.



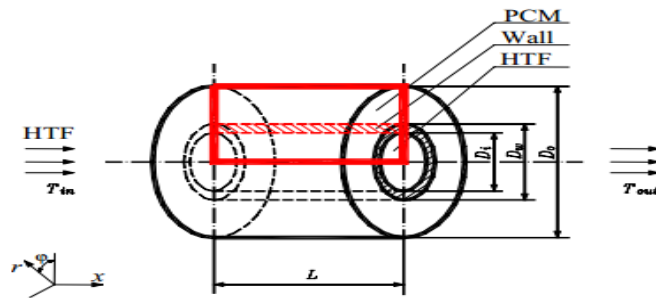
**Fig.1.6:** Distribution du front de fusion suivant la direction axiale pour différents temps ( $\tau=50,150,400$ ).

Le système est initialement à une température  $T_i=3.5^\circ\text{C}$ . Cette valeur est température initiale utilisée dans l'étude expérimentale et supérieure à la température de fusion. Le fluide entre dans le tuyau à une température  $T_{in} = -10^\circ\text{C}$ . Dans les calculs numériques, deux valeurs du nombre de  $Re$  sont pris en considération, à savoir 500 et 1000.

Les résultats montrent la solidification fronts peuvent être considérablement augmenté si la hauteur d'ailette est augmentée.

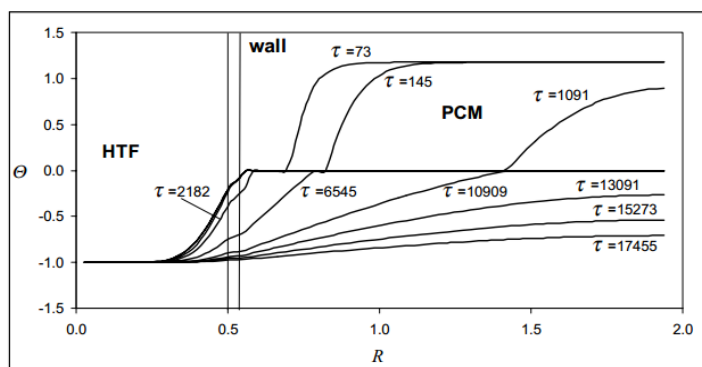
Ces résultats donnent une certaine connaissance pour la conception du système de stockage d'énergie thermique.

**Anica Trp(2005) [8]** a traité un système de stockage d'énergie thermique par chaleur latente constitué de deux types de paraffines, fusion non-isotherme et solidification isotherme. Afin de fournir des lignes directrices pour les performances du système et l'optimisation de la conception, les distributions transitoires des températures de la HTF, de la paroi du tube et du PCM ont été obtenues par une série de calculs numériques pour différentes conditions de travail, et divers paramètres géométriques.



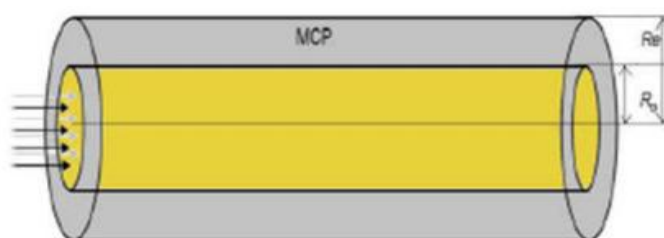
**Fig.1.7:** Unité de stockage de chaleur latente.

La figure ci-dessous montre la distribution de température en fonction de temps pendant la solidification.



**Fig.1.8 :** Distribution de température radiale à  $X = 12.73$  en fonction du temps pendant la solidification.

**El Bahjaoui (2013). [9]** à présenté une étude numérique d'un élément de stockage d'énergie par chaleur latente de fusion d'un matériau à changement de phase MCP, la n-octadécane. L'élément de stockage d'énergie est constitué de deux tubes concentriques. L'espace annulaire de ceux-ci est rempli de MCP. Celui-ci est chauffé par un fluide caloporteur (Eau) en écoulement pulsé dans le tube intérieur .



**Fig.1.9 :** Le modèle physique étudié.

## Chapitre 1

Ce modèle montre l'importance d'un écoulement pulsé par rapport à un écoulement de Poiseuille, pour favoriser la fusion du matériau à changement de phase pour certaines conditions favorables de la fréquence et l'amplitude adimensionnelles de l'écoulement pulsé.

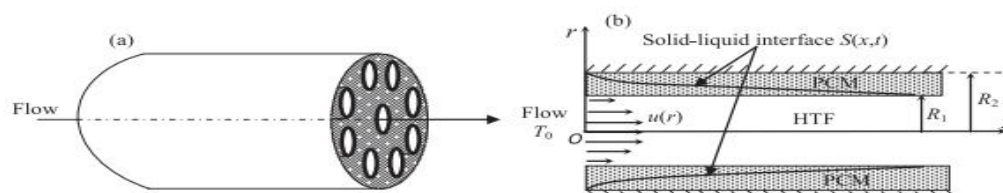
Les investigations numériques menées ont permis de dégager les résultats suivants :

**1.** Pour une amplitude adimensionnelle relativement élevée et une fréquence adimensionnelle faible ( $W \rightarrow 0$ ), l'utilisation d'un fluide caloporteur en écoulement pulsé est favorable pour le stockage thermique.

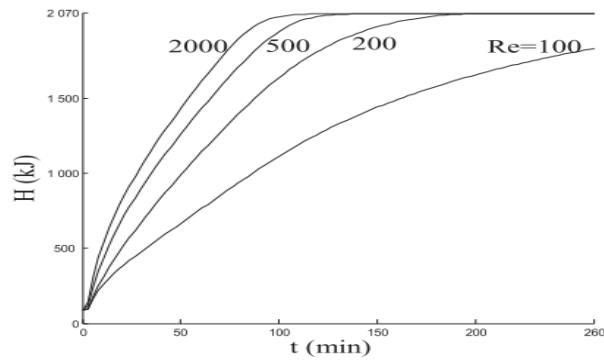
**2.** Un nombre de Reynolds élevé est favorable pour le transfert de chaleur et contribue à la réduction de la durée de fusion du MCP pour les faibles valeurs de la fréquence adimensionnelle et les valeurs élevées de l'amplitude adimensionnelle.

**3.** Pour une fréquence adimensionnelle très élevée, l'utilisation d'un fluide caloporteur en écoulement pulsé est équivalent à un écoulement de Poiseuille.

**Bechiri et Mansouri (2015) [10]** ont présenté une solution analytique d'une unité de stockage de chaleur latente (LHSU) constituée de deux tubes concentriques. La solution a été obtenue en utilisant la fonction exponentielle intégrale et la technique de séparation des variables. Le fluide de travail (eau) circulant par convection forcée à l'intérieur du tube intérieur charge et décharge le PCM. La comparaison entre les prévisions analytiques et les données expérimentales montrent un bon accord. Afin d'étudier la performance du système et son optimisation, la distribution des températures dans le PCM au cours de la fusion /solidification, l'énergie stockée, la position de l'interface et l'efficacité thermique ont été obtenues par une série de calculs numériques et représentés graphiquement.



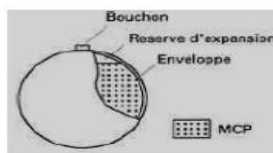
**Fig.1.10 :** Schéma du système de stockage d'énergie thermique latente: a) unité de stockage, b) module de stockage.



**Fig.1.11 :** Energie stockée dans le MCP pour différent nombre de Reynolds ( $R_1=1$  cm, $R_2=2$  cm et  $L=10$ cm).

### 1-4- Stockage d'énergie par chaleur latente dans les capsules sphériques

**Bédécarrats et al (1993) [11]** ont étudié la transformation solide-liquide d'un PCM confiné dans des enveloppes sphériques appelées nodules. L'enveloppe est en polyéthylène haute densité de 2 mm d'épaisseur. Ces nodules dont le diamètre externe est de 77 mm, remplissent une cuve cylindrique placée dans une boucle de réfrigération.



**(a) :** Nodule



**(b) :** Cuve de stockage

**Figure 1.12 :** Schéma du nodule et cuve de stockage.

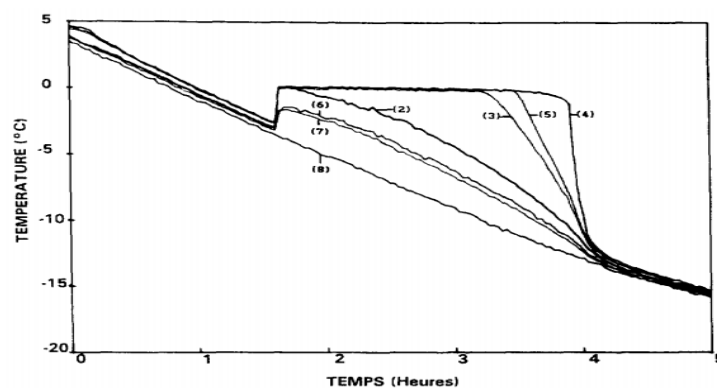
Un fluide caloporteur circule à l'intérieur de la cuve autour des nodules permettant les échanges d'énergie. Au cours du stockage, le fluide caloporteur refroidi par un groupe frigorifique absorbe l'énergie du matériau à changement de phase permettant sa cristallisation. Au cours du déstockage, le fluide caloporteur cède de l'énergie au matériau entraînant sa fusion. L'utilisateur récupère ainsi le "froid" qu'il a fourni pendant la phase de stockage. Les nodules sont disposés aléatoirement dans la cuve, et le remplissage de ce dernier est le plus compact possible. Le rapport du volume occupé par les nodules par le volume interne de la cuve vaut sensiblement 0,6.

## Chapitre 1

---

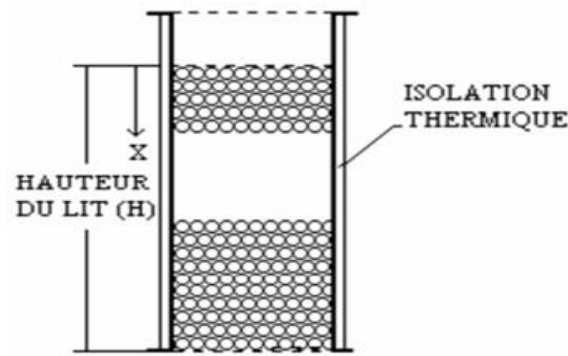
En plus des avantages évidents communs à tous les types de stockage par chaleur latente, l'encapsulation du MCP présentent les intérêts suivants :

- ❖ il est possible d'avoir différentes températures de déstockage ; les matériaux à changement de phase utilisés dans les nodules couvrent, pour le domaine du froid, une plage de températures allant de  $-33\text{ °C}$  à  $+27\text{ °C}$  et sont en général des mélanges eutectiques ou des corps purs, dont la caractéristique est de fondre à température constante.
- ❖ la quantité totale de MCP est séparée dans plusieurs capsules et la surface d'échange entre le fluide caloporteur et le MCP est maximale ;



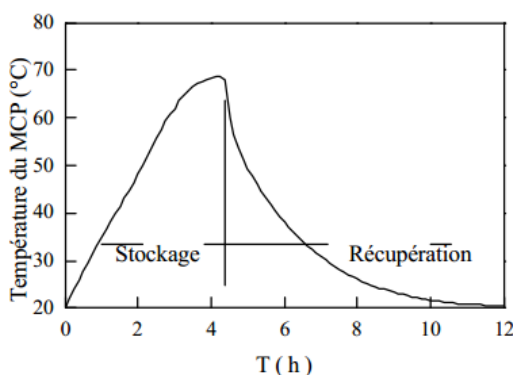
**Fig.1.13 :** Températures aux différentes positions du nodule durant un refroidissement continu.

**Benmansour (2001) [12]** a présenté une étude numérique du stockage de l'énergie thermique par chaleur latente à basses températures ( $0\text{ °C}$  à  $100\text{ °C}$ ) dans un lit cylindrique rempli de sphères uniformes, disposées au hasard et contenant chacune un matériau à changement de phase MCP, traversé par un flux d'air. Un modèle numérique mono dimensionnel à deux phases séparées est appliqué ([Fig.1.14](#)). Il a permis de prédire la distribution axiale de la température du fluide et du matériau en fusion le long du lit ainsi que les performances de ce lit fixe dans les deux modes (stockage, déstockage) et de récupération de la chaleur pour une température du fluide à l'entrée constante et un nombre de Reynolds variable.

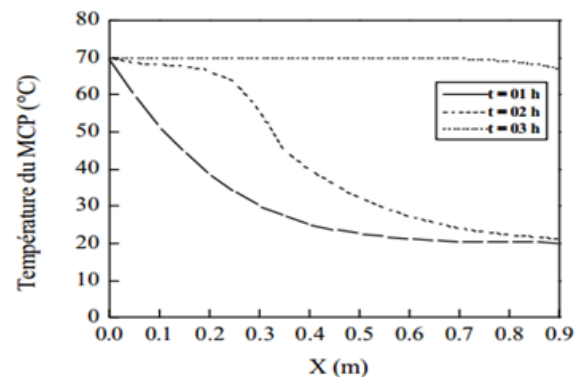


**Fig.1.14:** Schéma du lit de stockage.

La Figure 1.15 représente l'évolution de la température moyenne du lit en fonction du temps, au cours d'un cycle (stockage suivi du déstockage).



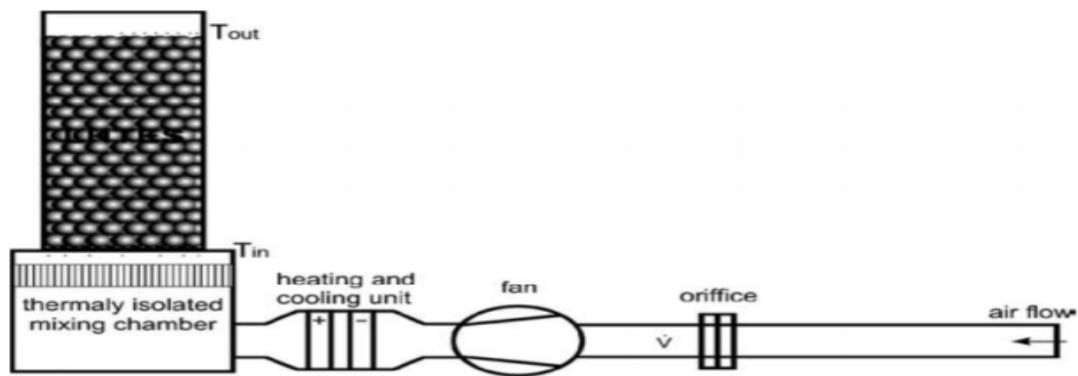
**Fig.1.15:** Evolution de la température moyenne du lit en fonction du temps.



**Fig.1.16:** Distribution de la température dans le lit pour une température d'air constante, durant le stockage.

La stratification thermique initiale du lit durant la période de stockage est illustrée sur la Figure.1.16, qui montre la distribution horaire de la température le long du lit durant le stockage de la chaleur à l'intérieur du lit.

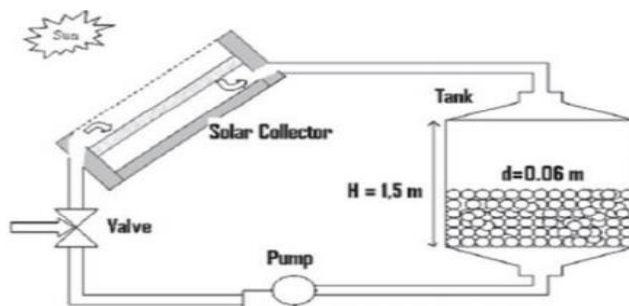
**Arkar (2005) [13]** a étudié la chaleur latente de stockage d'énergie thermique dans un cylindre contenant des sphères remplies de paraffine a été développé. Un lit a été adapté pour prendre en considération la non-uniformité de la porosité du MCP et la vitesse du fluide. Le modèle prend aussi en considération les propriétés thermiques dépendantes de la température du MCP. La distribution de la température de la paraffine (RT20) utilisée dans l'expérience a été déterminée par une utilisation d'une analyse différentielle calorimètre (ADC).



**Fig.1.17** : Plan de la situation expérimentale.

La capacité de la chaleur apparente du RT20 a été déterminée. La fonction polynomiale obtenue,  $C_{app}(T, \theta)$ , pour la fonte et solidification ont été intégrées dans le modèle numérique.

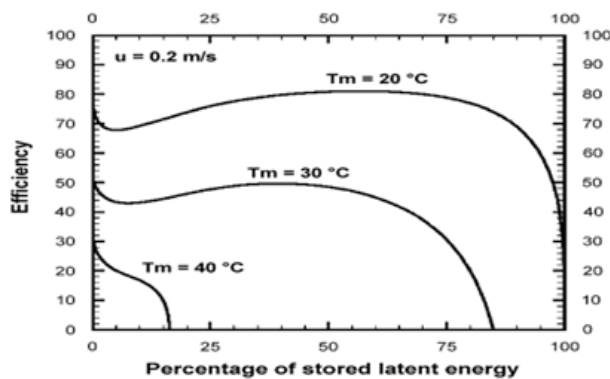
**Kouskso et al (2007) [14]** ont présenté un système constitué d'un collecteur solaire chauffant l'air associé avec un réservoir cylindrique contenant des capsules sphériques rempli d'un MCP.



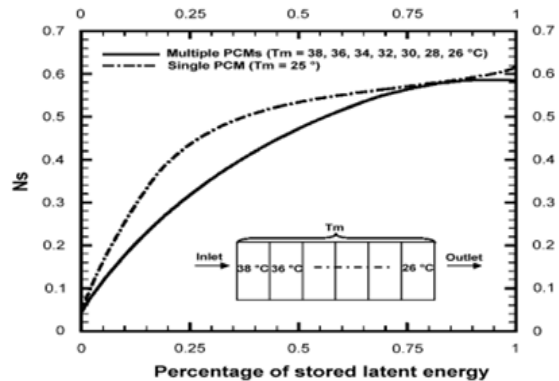
**Fig.1.18** : Système solaire à changement de phase.

Le modèle numérique utilisé dans cette étude a montré que l'efficacité thermique du système peut être considérablement améliorée pour une sélection adéquate de la température de fusion du MCP, et peut réduire aussi l'irréversibilité à l'intérieur du système en utilisant un MCP multiple.





**Fig.1.19:** Effet de fondre de température et l'efficacité en fonction de pourcentage du stockage d'énergie.



**Fig.1.20:** Effet du MCP multiple sur la fraction de l'exergie détruite.

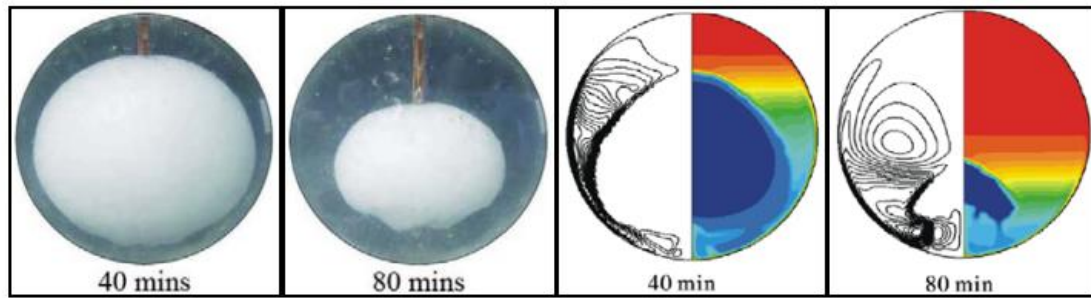
Fig.1.19 représente la variation de l'efficacité en fonction de pourcentage du stockage d'énergie par chaleur latente et la vitesse  $u$ . Nous remarquons que l'efficacité augmente avec la diminution de température  $T_m$  de PCM.

Tan (2008) [15] a étudié expérimentalement le processus de fusion contrainte et sans contrainte de n- octadécane à l'intérieur d'un récipient en verre et faire la comparaison entre les deux. Plus tard, Tan et al (2009) [16] ont effectué une simulation numérique et des expériences sur des sphères verticales contiennent de cire de paraffine. Ils ont confirmé le comportement quasi-constant de la partie supérieure de la sphère tout en observant le motif de fusion instable de la partie inférieure de la sphère. Dans cette région, une convection naturelle 'jet' est rapporté ainsi qu'un comportement chaotique de convection.

Encore une fois, ce phénomène est considéré comme 2D. Les paramètres du problème sont :

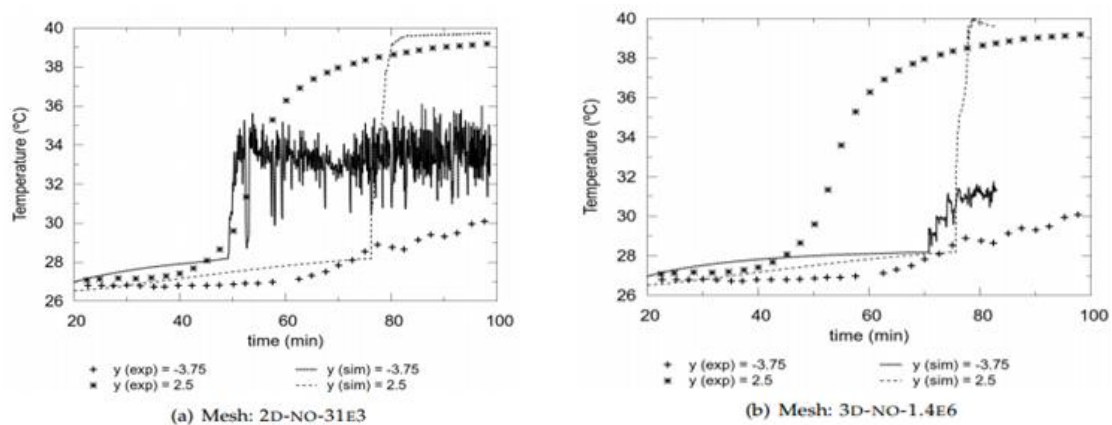
- $D$  (diamètre de la sphère) = 0,10166 m ;  $C_p = 2330 \text{ J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$  ;
- $Ra = 3.307E7$ ,  $Pr = 59.76$ ,  $Ste = 0,112913$ .
- Température initiale de 27.2°C, température de la paroi chaude de 40 °C et la température de changement de phase de 28.2°C.

La figure (1.21) montre deux photographies de l'évolution expérimentale de la variation de phase à des moments différents extraits de Tan (2008) et des résultats des simulations effectuées par Tan et al. (2009), à 40 et 80 min.



**Fig.1.21:** Photographies de l'expérience avec la N-octadécane encapsulé dans une sphère et les résultats des simulations.

Première moitié des sphères simulées montrent les lignes de courant tout en contours, seconde moitié est la variation de température. Le maillage utilisé dans la simulation a été conçu pour avoir même quantité de nœuds entre 7600 et 7700 cellules. Il y a un accord dans le comportement global du système, même si une fusion plus rapide est rencontrée dans les résultats numériques, par rapport à l'expérimentale.

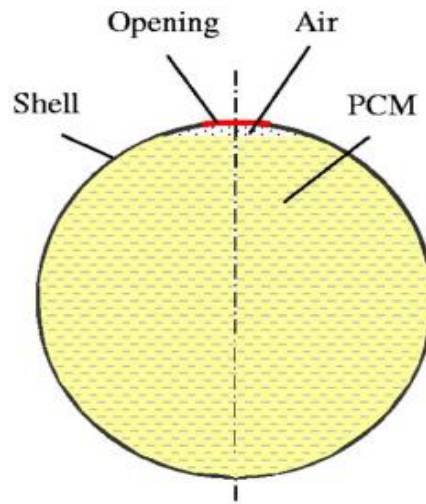


**Fig.1.22:** Evolution de T vs. Temps, pour les résultats numériques et expérimentales, à deux positions différentes de l'axe verticale.

Assis et al (2009) [17] ont exploré numériquement et expérimentalement le processus de solidification d'un matériau à changement de phase (PCM) dans une capsule sphérique. A l'état initial, le liquide de PCM occupe 98,5% de l'enveloppe. La partie supérieure de 1,5% occupe l'air. Dans les expériences, une cire de paraffine disponible dans le commerce est utilisée. Ses propriétés sont engagées dans les simulations numériques. L'étude est réalisée pendant la solidification dans les capsules sphériques de 20mm, 40mm, 60mm, et 80mm de diamètre à la température de paroi uniforme, qui variait de 10°C à 40°C en dessous de la température moyenne de solidification du matériau à changement de phase.

## Chapitre 1

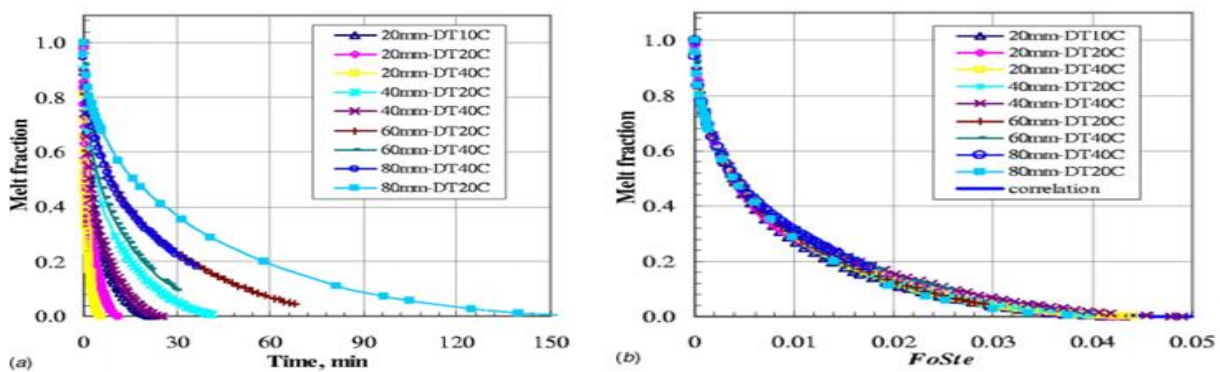
Le modèle physique est représenté sur la Fig1.23 :



**Fig.1.23** : Le modèle Physique.

Le modèle numérique est validé par rapport aux résultats expérimentaux.

Il est supposé que les deux phases liquides et solides sont homogènes et isotrope, ainsi que le processus de solidification est axisymétrique. Le PCM fondu et l'air sont des fluides newtoniens incompressibles, et écoulement laminaire a été supposé dans les deux. Une relation densité-température est utilisée pour l'air. Dans les simulations, la température initiale de l'ensemble du système est de 32°C, soit la température de PCM est légèrement supérieure à sa température de solidification.



**Fig.1.24** : Résumé des résultats numériques: (a) ...Variation de la fraction de fusion en fonction du temps pour différent diamètres et les différences de température et (b)...Variation de la fraction de fusion pour différent produit Foste.

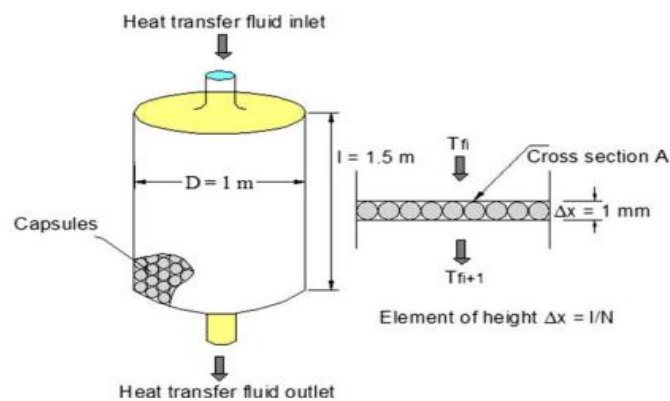
Les résultats montrant que :

- La fraction de fusion est égale à zéro lorsque la solidification est terminée.

## Chapitre 1

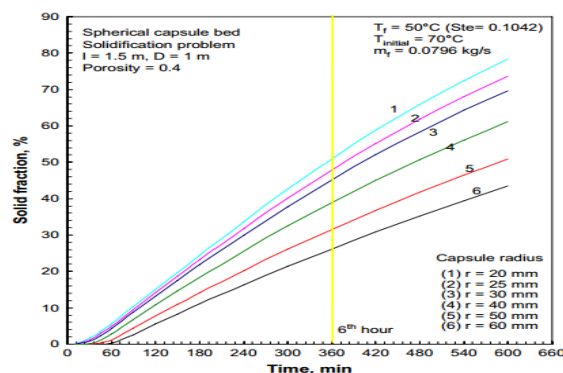
- Les résultats de la simulation sont également représentés quand le PCM a totalement fondu

**Felix Regin (2009) [18]** a analysé le comportement d'un système de stockage d'énergie thermique par chaleur latente de lit garni. Le lit garni est composé de capsules sphériques remplies avec la cire de paraffine comme PCM utilisables avec un système solaire de chauffage de l'eau. Le modèle développé dans cette étude utilise les équations fondamentales similaires à celles de Schumann, sauf que les phénomènes de changement de phase du PCM à l'intérieur des capsules sont analysés par la méthode enthalpie. Les équations sont résolues numériquement, et les résultats obtenus sont utilisés pour l'analyse de la performance thermique des deux processus de charge et de décharge. La chaleur du fluide chaud à l'entrée est transférée au PCM, le débit massique et la gamme de température de changement de phase sur la performance thermique des capsules de différents rayons ont été étudiés.



**Fig.1.25:** Lit garni et détails de système de stockage.

Fig.1.26 montre la fraction solide totale de PCM en fonction des rayons de la capsule. Pour le processus de fusion, l'effet de rayon de capsule est beaucoup plus faible.



**Fig.1.26:** Fraction solide de capsule sphérique pour différent rayons de la capsule.

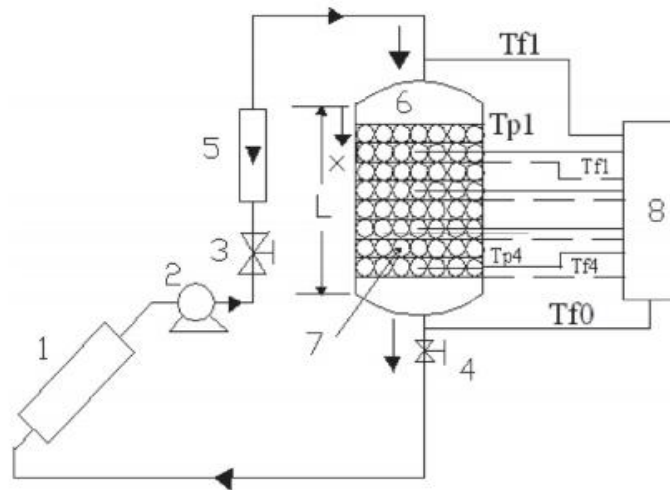
## Chapitre 1

Les conclusions suivantes peuvent être tirées :

1. Le temps de solidification complète est trop long par rapport au temps de fusion.
2. Le taux de charge et de décharge sont sensiblement plus élevés pour la capsule de plus petit rayon par rapport ceux de plus grand rayon.

**Velraj et Nallusamy (2009) [19]** ont examiné le comportement thermique de stockage d'énergie équipé d'un système de chauffage solaire de l'eau qui n'a pas été rapporté par les chercheurs comme compris à partir de l'étude de la littérature. Le lit garni contient PCM encapsulé dans des capsules sphériques. Des études paramétriques sont effectuées pour examiner les effets de la porosité et HTF flux Les taux sur la performance de l'unité de stockage pour faire varier la température d'entrée du fluide.

Un schéma de principe du montage expérimental est représenté sur la [figure \(1.27\)](#) :

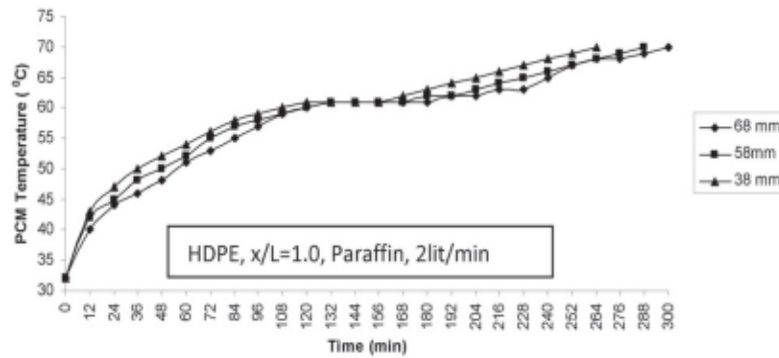


**Fig.1.27** : Schéma du montage expérimental.

1. Capteur solaire de plaque plate; 2. Pompe; 3 et 4. Les vannes de commande d'écoulement; 5. Débitmètre; 6. Réservoir TES; 7. Les capsules PCM; 8. Indicateur de température; TP& TF : capteurs de température (RTDs).

Début du processus de charge, la température du PCM ( $T_{pi}$ ) à l'intérieur des capsules de lit garni est  $32^{\circ}\text{C}$ , qui est inférieure à la température de fusion. Dans un premier temps, l'énergie est stockée à l'intérieur des capsules comme chaleur sensible jusqu'à ce que le PCM atteigne sa température de fusion.

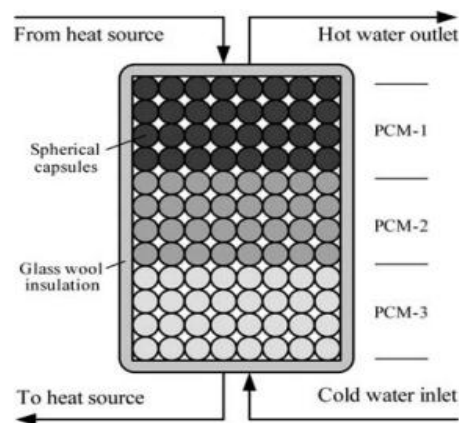
La [Figure 1.28](#) représente la variation de température en fonction du temps pour différents diamètres des capsules sphériques.



**Fig.1.28:** Variation de température de MCP en fonction de temps pour différent diamètres de capsule.

**Yang et Zhang (2012) [20]** ont présenté une étude numérique d'un nouveau lit garni en utilisant un matériau à changement de phase stratifié (PCM). Le PCM est injecté dans les sphères de polycarbonate. L'eau est utilisée comme fluide de transfert de chaleur (HTF) pour charger ou décharger l'énergie thermique au PCM. Trois types de paraffine qui ont des points de fusion différents sont utilisés comme PCM et placé dans le lit garni à différentes hauteurs.

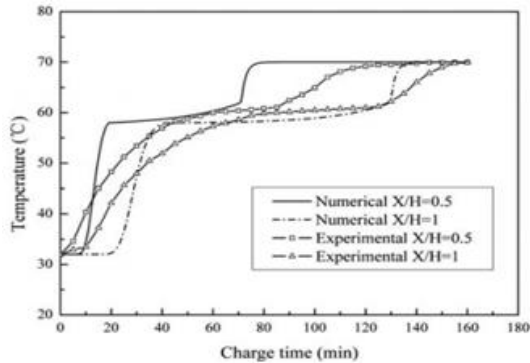
La nouvelle unité lit garni de stockage thermique utilisant des capsules du PCM stratifié est représenté sur la [figure.1.29](#).



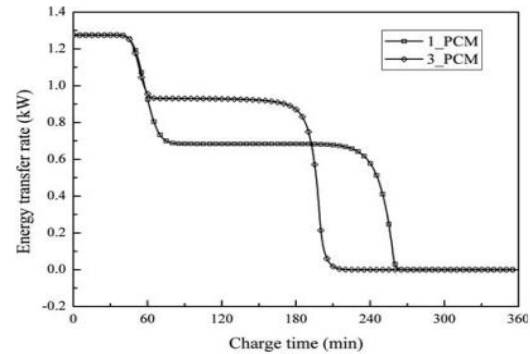
**Fig.1.29:** Diagramme schématique de lit garni stratifié.

L'eau chaude est utilisée comme HTF et coule de haut en bas à faire fondre le PCM dans le processus de charge, alors que dans la décharge processus, l'eau froide circule du bas vers le haut. L'eau chaude peut être produite à partir de l'énergie solaire ou autre chaleur renouvelable Ressources.

La Figure (1.30) présente la température numérique et expérimentale du PCM à mi-hauteur et à la sortie du réservoir. Le résultat numérique concorde bien avec la mesure expérimentale.



**Fig.1.30 :** Comparaison entre les résultats numérique et les résultats expérimentaux.



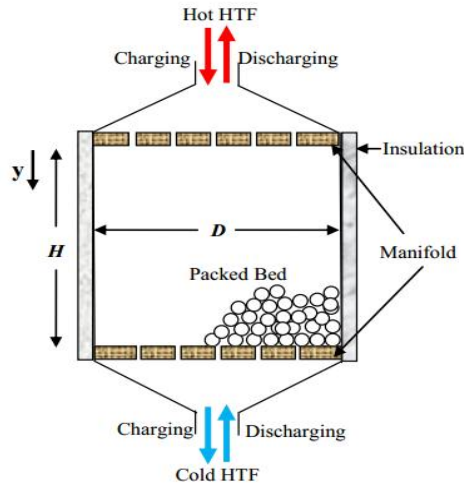
**Fig.1.31:** Taux de transfert d'énergie par rapport au temps de charge.

Les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Le lit garni stratifié peut réduire la charge de l'énergie et le temps de décharge par rapport à un seul lit garni.
- L'augmentation de la vitesse de HTF peut augmenter le taux de transfert d'énergie et réduire le temps, de charge (ou décharge).

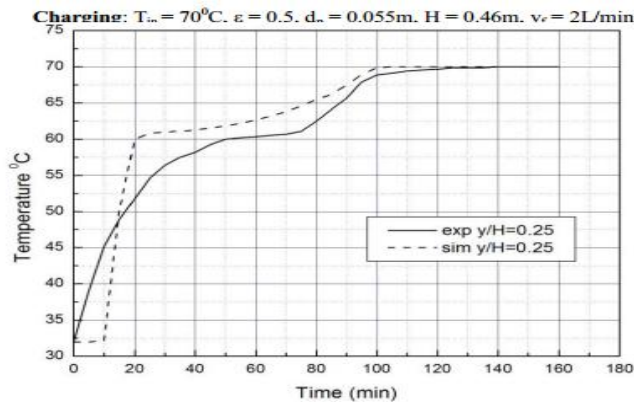
**Shobo et Mawire (2015) [21]** ont présenté un modèle numérique pour un stockage d'énergie thermique à lit garni (TES) en utilisant un matériau à changement de phase (PCM). Le système de stockage doit être utilisé pour une application solaire. L'huile de tournesol est le fluide de transfert de chaleur (HTF) au cours de cycles de charge. Les TES lit garni se compose de capsules sphériques remplies d'érythritol, comme matériau à changement de phase. Le modèle utilise des équations mathématiques diphasique de transfert de chaleur alors que les phénomènes de changement de phase à l'intérieur des capsules PCM est analysé en utilisant la méthode de la capacité calorifique efficace.





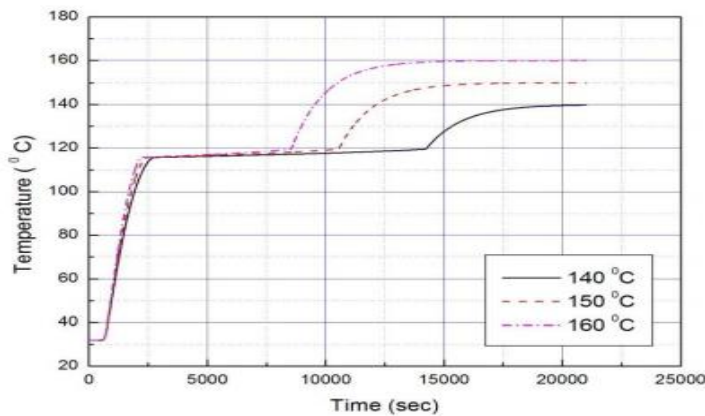
**Fig.1.32:** Schéma du système étudié.

Pour les besoins de la simulation, le réservoir TES utilisé est représenté sur la (Fig.1.32), avec une hauteur de 0,46 m et un rayon de 0,18m. Le profil de température pour le PCM à  $x/H = 0,25$  a été comparée à celui obtenue à partir du modèle au cours d'un cycle de charge. Le résultat est présenté sur la Fig.1.33.



**Fig.1.33 :** Une comparaison entre les résultats de simulation numérique et les données expérimentales sur le profil de température du lit.

Fig.1.34 montre l'effet de température d'entrée d'huile de tournesol (HTF) à un Débit de 1 L / min, sur le temps de charge. Avec une augmentation de la température d'entrée HTF  $140^{\circ}\text{C}$  à  $150^{\circ}\text{C}$ , le temps de charge pour l'unité TES (à  $y/H = 0,5$ ) a réduit d'environ 12,5%.



**Fig.1.34.** Variation de temps de charge pour le système TES à  $y/H=0,5$  avec une vitesse d'écoulement de HTF de 1 L / min.

### 1-5- Introduction de nanoparticules dans les fluides de base

Récemment, avec le développement de la nanotechnologie, les chercheurs ont commencé à améliorer la conductivité thermique par l'ajout de nanoparticules dans différents fluides, dits «nanofluides», qui peut se traduire par l'amélioration de conductivité thermique du fluide de base.

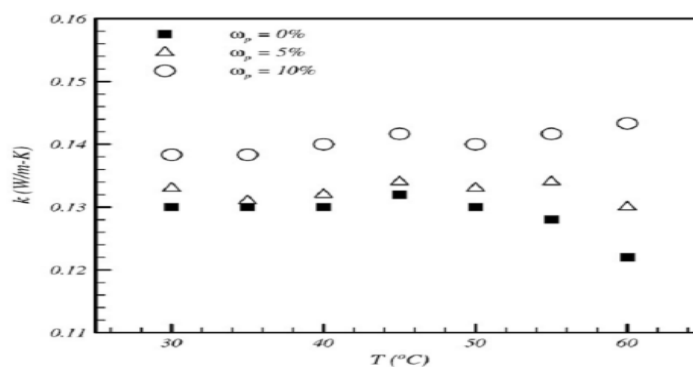
**Khodadadi et Hosseinizadeh [22]** ont amélioré des performances des matériaux à changement de phase (PCM) à travers la dispersion de nanoparticules. Les matériaux à changement de phase renforcé par nanoparticules (NEPCM) présentent une conductivité thermique élevée par rapport au PCM de base. Le problème consiste à étudier la solidification dans une cavité carrée différentiellement chauffée qui contient un NEPCM (eau, plus nanoparticules de cuivre). En raison de l'augmentation de la conductivité thermique et également l'abaissement de la chaleur latente de fusion.

**Wu et al [23]** ont étudié le potentiel de nanofluides  $Al_2O_3 - H_2O$  comme un nouveau matériau à changement de phase pour le stockage de l'énergie thermique des systèmes de refroidissement. La réponse thermique montre que l'ajout de nanoparticules  $Al_2O_3$  diminue remarquablement le degré d'eau de surfusion, avance le temps de début de congélation et réduit le temps de congélation totale. Ils ont montré que l'ajout de seulement 0,2 % en poids de nanoparticules d' $Al_2O_3$ , la durée totale de la congélation de nanofluides  $Al_2O_3 - H_2O$  peut être réduite de 20,5 %.

Dans l'étude de **Ho et Gao [24]**, un matériau à changement de phase noyée par les nanoparticules (NEPCM) a été préparé par l'ajout des nanoparticules de l'alumine ( $Al_2O_3$ )

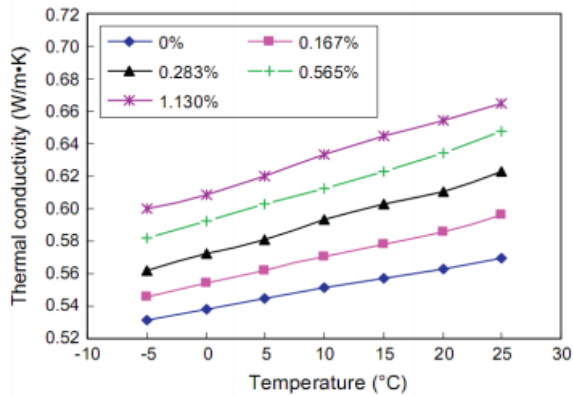
## Chapitre 1

dans la paraffine (n-octadécane) au moyen d'un tensioactif non-ionique. Les mélanges paraffine/nanoparticules (NEPCM) contiennent des nanoparticules de 5% et 10%, respectivement. Leurs propriétés thermo physiques effectives, la chaleur latente de fusion, la densité, la viscosité dynamique, et la conductivité thermique, ont été étudiées expérimentalement. La densité du NEPCM mesurée convient parfaitement avec celle prédite sur la base de la théorie du mélange. La conductivité thermique et la viscosité dynamique mesurées du NEPCM montrent une variation non linéaire en fonction de la température.

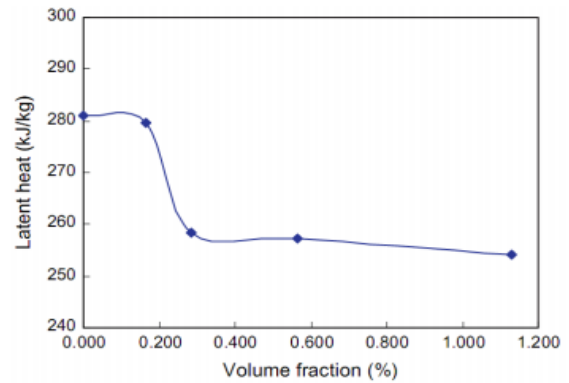


**Fig.1.35** : Conductivité thermique du mélange paraffine/ $Al_2O_3$  et de la paraffine pure.

**Qinbo et al [25]** ont développé un matériau à changement de phase amélioré (NEPCM), par la suspension d'une petite quantité des nanoparticules de  $TiO_2$  dans une solution aqueuse saturée de  $BaCl_2$ . La conductivité thermique, le degré de sous-refroidissement, la chaleur latente, la chaleur spécifique, et les comportements rhéologiques de NEPCM ont été étudiés. Les résultats expérimentaux montrent qu'avec une fraction volumique de 1.13%, la conductivité thermique de NEPCM est augmentée par 12,76% à 5  $^{\circ}C$ , le degré de est réduit de 84,92%. La chaleur latente est diminuée. La conductivité thermique augmente avec l'augmentation de la fraction volumique, ce qui n'a aucun effet sur le système de stockage, [Fig.1.36 \(a et b\)](#).



**Fig.1. 36(a) :** Conductivité thermique en fonction de la fraction massique.



**Fig.1.36(b) :** Chaleur latente du NEPCM en fonction de la fraction massique.

## 1-6- Conclusion

Le stockage de l'énergie thermique par chaleur latente est un sujet très important, si on observe le nombre important de publications présentées dans ce chapitre. Plusieurs configurations géométriques dans lesquelles les PCMs sont contenus dans des plaques (enceinte rectangulaire, mur...ect), dans des tube annulaires ou dans des capsules sphériques. Pour optimiser les performances de système de stockage d'énergie par chaleur latente l'addition des nanoparticules à haute conductivité dans les PCMs est présentée.

La plupart de ces travaux montre une comparaison entre les prédictions numériques et les données expérimentales. De nombreux résultats expérimentaux ont rapporté que l'introduction de nanoparticules pourrait aussi améliorer le transfert de chaleur dans les PCMs.

# Chapitre II

## Généralité sur le stockage d'énergie

### Le stockage thermique

#### 2-1-Introduction

Au moment où l'on parle de plus en plus d'environnement et de rationalisation de l'exploitation des ressources énergétiques, le stockage de l'énergie thermique se présente comme une solution particulièrement intéressante puisqu'il permet de dissocier l'utilisation de la production de l'énergie.

Le stockage d'énergie est une solution très adaptée aux systèmes de froid industriel et de climatisation. Mais dans ce secteur, le stockage par chaleur sensible est souvent inopérant du fait de la nécessité de forts écarts en températures et le stockage thermochimique est encore peu développé.

Actuellement, le stockage d'énergie par chaleur latente apporte une solution efficace aux investisseurs soucieux d'optimiser leur équipement : il permet une réelle gestion de l'énergie et donc d'utiliser des énergies au moment où elles sont les plus disponibles (énergie solaire, tarifs de nuit pour l'électricité. . .)

Les Matériaux à Changement de Phase, appelés communément « MCP », sont des matériaux intelligents qui reposent sur l'application d'un principe physique simple : ils se liquéfient en absorbant de l'énergie à partir d'une certaine température caractéristique pour chaque type de matériau (en général fixée par leur formulation) et restituent cette énergie lorsque la température de leur environnement est inférieure à celle-ci.

Les matériaux à changement de phase ont pour particularité de pouvoir stocker de l'énergie sous forme de chaleur latente ; la chaleur étant absorbée ou restituée lors du passage de l'état solide à l'état liquide et vice versa. L'énergie est alors stockée sous forme d'un changement d'état du matériau de stockage et dépend de la chaleur latente et de la quantité du matériau de stockage.

#### 2-2-Stockage d'énergie

Le stockage d'énergie est l'action qui consiste à placer une quantité d'énergie en un lieu donné pour permettre son utilisation ultérieure.

Le stockage de l'énergie est un des principaux thèmes de recherche développés en énergétique. Il est aussi un des moyens les plus adaptés à la modulation d'une source variable comme c'est le cas avec le soleil.

### 2-3-Différentes types de stockage

L'énergie peut être stockée par différentes options:

#### 2-3-1-Stockage mécanique

- stockage sous forme potentielle : L'énergie est stockée sous forme d'un fluide (eau ou air comprimé).
- stockage sous forme cinétique Ex : Stockage par volant d'inertie [26].

#### 2-3-2- Stockage thermochimique

Les systèmes thermochimiques comptent sur l'énergie absorbée et libérée dans la rupture et la réformation des attaches moléculaires dans une réaction chimique complètement réversible

$$Q_r = a m \Delta h_r \quad [27]$$

Cette technologie est à l'heure actuelle encore en développement, toutefois il est intéressant de connaître ses principales caractéristiques. L'utilisation principale de ce système reste le stockage de l'énergie solaire [28].

#### 2-3-3- Stockage électrique

- photovoltaïque (batteries, accumulateur)

-Stockage à très basse température : supraconducteurs magnétiques (stockage électromagnétique) [29].

#### 2-3-4- Stockage thermique

L'utilisation différée de l'énergie est l'idée commune qui vient à l'esprit dès que l'on parle de stockage. Essentiellement trois modes de stockage thermique peuvent être envisagés:

le stockage par chaleur sensible, le stockage par chaleur latente, le stockage thermochimique.

#### 2-3-5- Stockage chimique

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

### 2-4- Le stockage d'énergie thermique

Stockage d'énergie thermique (SET) peut être obtenu par refroidissement, le chauffage, la fusion, la solidification, la vaporisation, ou un matériau avec l'énergie sous forme de chaleur devient disponible lorsque le processus est inversé.

#### 2-4-1- Stockage d'énergie thermique par chaleur sensible

Dans le stockage par chaleur sensible, l'énergie est emmagasinée sous la forme d'une élévation de température du matériau de stockage au sein d'un système fermé au sens thermodynamique, c'est-à-dire sans échange avec le milieu extérieur.

L'expression de la chaleur sensible pouvant être stockée découle du premier principe de la thermodynamique :

$$Q_{\text{stocké}} = m C_p \Delta T$$

Avec  $Q_{\text{stockée}}$ , la chaleur sensible ( $J$ ),  $m$ , la masse du matériau de stockage ( $kg$ ),  $C_p$ , la chaleur massique du matériau ( $J.kg^{-1}K^{-1}$ ),  $\Delta T$ , la différence entre températures moyennes finale et initiale ( $K$ ).

La quantité d'énergie stockée est donc proportionnelle à la masse, à la capacité calorifique et à la différence de températures entre l'entrée et la sortie du matériau de stockage.

Les matériaux de stockage par chaleur sensible se divisent en deux catégories : les liquides, comme l'eau, l'huile, les sels fondus etc., et les solides, tels que la pierre, la brique, le sable etc.

Les critères de choix des matériaux pour le stockage par chaleur sensible sont les suivants :

- Chaleur spécifique élevée,
- Stabilité à long terme avec cycles thermiques
- Compatibilité avec son contenant
- Faible coût.

#### 2-4-2- Stockage d'énergie thermique par chaleur latente

Dans le stockage par chaleur latente, l'énergie est emmagasinée grâce au changement d'état d'un matériau de stockage. La chaleur latente est la quantité de chaleur absorbée ou restituée par un matériau lors de son changement de phase, à température et pression constantes. Elle s'exprime ainsi :

$$Q_{\text{latente}} = m L_s$$



## Chapitre 2

---

Avec  $m$ , la masse du matériau de stockage ( $kg$ ).

$L_s$  la chaleur massique de changement d'état du matériau ( $J.kg^{-1}$ ).

Dans le stockage par chaleur latente, l'énergie est stockée sous la forme d'un changement d'état du matériau de stockage (fusion ou vaporisation).

L'énergie stockée dépend alors de la chaleur latente et de la quantité du matériau de stockage qui change d'état.

La capacité du stockage de systèmes du stockage de la chaleur latents est influencée par : [30]

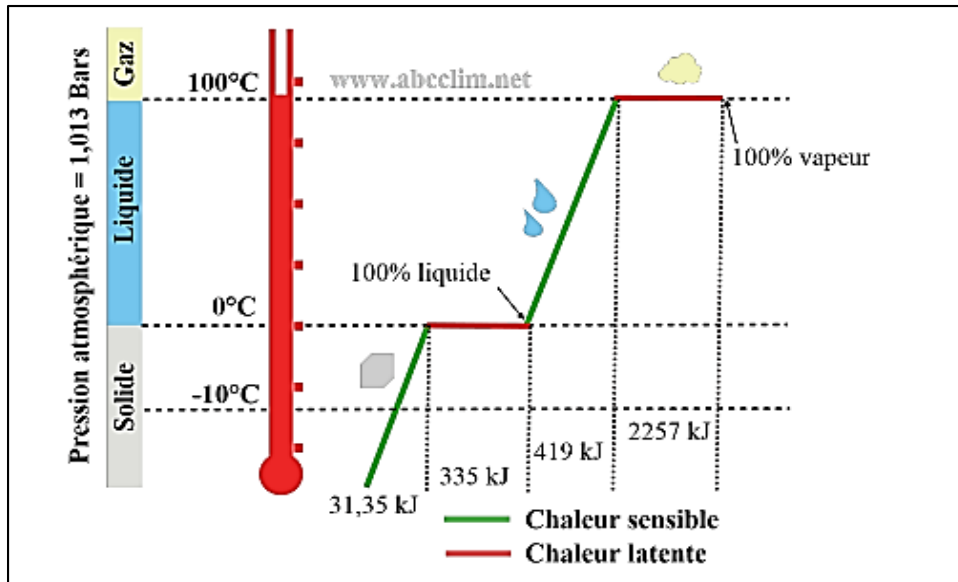
- Pèsent de moyen du stockage de la chaleur.
- Chaleur spécifique dans phase solide et liquide.
- Différence entre la température initiale et température de fusion.
- Différence entre température de fusion et température finale.
- Chaleur spécifique de fusion.

Le stockage par chaleur latente permet de stocker de plus grandes quantités d'énergie avec des masses et des volumes réduits.

### 2-1- Les avantages du stockage par chaleur latente

Par rapport au stockage par chaleur sensible, les principaux avantages du stockage par chaleur latente peuvent être résumés ainsi:

- La chaleur latente est beaucoup plus importante que la chaleur sensible (pour un écart de température pas trop important).
- Les matériaux utilisés, dans la gamme des températures de confort en thermique du bâtiment (20 à 30°C), peuvent stocker de 5 à 14 fois plus de chaleur que les matériaux de stockage à chaleur sensible.
- Quand la décharge d'énergie thermique a lieu, la température de la surface de MCP reste proche de la valeur de la température de changement d'état. On a donc un contrôle passif de la température de la surface. La quantité d'énergie de la décharge ne dépend donc que de la température de l'environnement.
- Le stockage par chaleur latente ne pose pas de problème de surchauffe saisonnière grâce à sa faible masse.



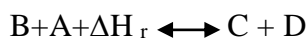
**Fig.2.1** : Stockage d'énergie thermique par chaleur sensible et latente.

### 2-4-3- Stockage d'énergie thermique par voie thermochimique

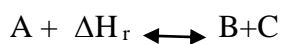
Le terme de stockage thermochimique recouvre deux phénomènes : la sorption et la réaction chimique. Le stockage de chaleur par sorption est intéressant pour le stockage basse température ( $T \approx 80 \text{ }^\circ\text{C}$ ) tandis que pour des applications de type solaire concentré ( $T \approx 200 \text{ à } 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ), ce sont les réactions de synthèse chimique qui semblent être les plus adaptées [31].

#### 3-1- Principe de fonctionnement

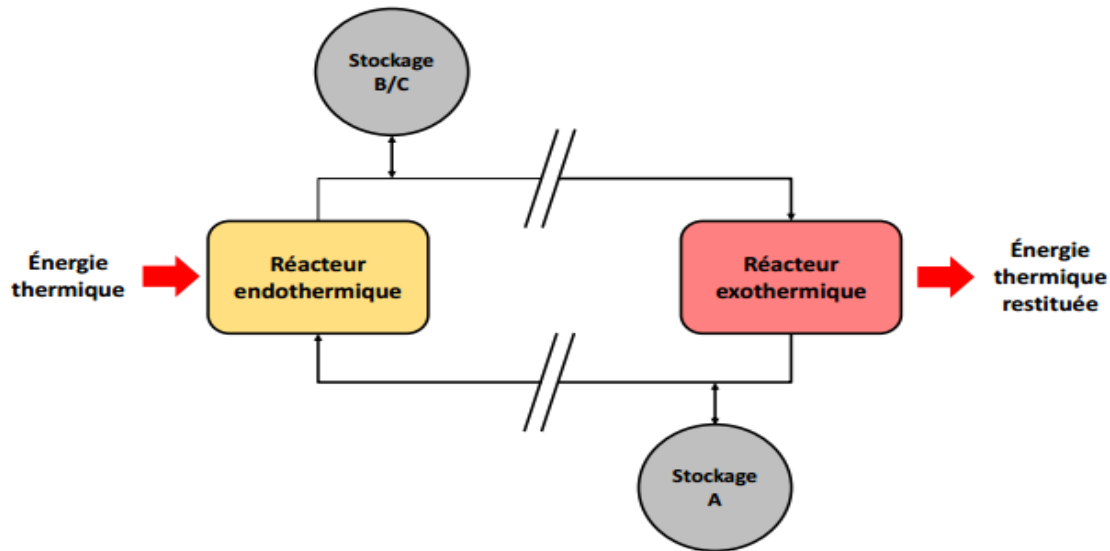
La voie thermochimique exploite la réversibilité des réactions chimiques pour stocker l'énergie. De façon générale, les réactions sont de la forme :



Les réactions les plus couramment rencontrées sont de la forme suivante :



Pour ce type de stockage, la réaction mise en jeu doit être totalement réversible afin que le procédé ne perde pas sa capacité de stockage au cours des cycles. Le schéma de principe du stockage de chaleur par voie thermochimique est présenté sur la Figure (2.2).



**Fig.2.2** : Schéma de principe d'un système de stockage par voie thermochimique.

Lors de l'étape de charge, l'énergie thermique issue du champ solaire permet de mettre en œuvre la réaction endothermique. Les produits de cette réaction (B et C) sont séparés et stockés. Lorsque l'énergie thermique doit être restituée, les produits stockés (B et C) sont mis en contact afin de réaliser la réaction exothermique réversible et ainsi restituer la chaleur et régénérer le produit initial (A). La quantité d'énergie qui peut être stockée dans une réaction chimique de type  $A + \Delta H_r \leftrightarrow B + C$  est la somme des énergies sensibles des matériaux et de la chaleur de réaction. La quantité d'énergie stockée est exprimée selon la relation :

$$E = \sum_{i=1}^N \int_{T_i}^{T_f} m_i \cdot C_{pi} \cdot dT + n_A \times \Delta H_r$$

Où, E est la quantité d'énergie stockée (J),  $n_A$  est le nombre de moles du produit A (mol),  $\Delta H_r$  est l'enthalpie de la réaction ( $J \cdot mol^{-1}_A$ )

Dans ce système, la capacité de stockage de la chaleur est généralement élevée parce qu'une énergie chimique élevée se produit au cours de la rupture ou de la recombinaison des liaisons moléculaires dans une réaction chimique réversible [32].

### 2-5-Comparaison entre les différents types de stockage d'énergie thermique

Le Tableau (2.1) représente les caractéristiques des trois systèmes de stockage d'énergie thermique présentés. Six paramètres fondamentaux ont été choisis : la densité énergétique,

## Chapitre 2

la température de stockage, la durée de stockage, le transport de l'énergie, la maturité du système et la complexité de mise en œuvre du système [33].

**Table.2.1** : Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur.

		<b>Stockage par chaleur sensible</b>	<b>Stockage par chaleur latente</b>	<b>Stockage par voie thermochimique</b>
<b>Densité dénergie</b>	<b>Volumétrique</b>	Faible ~15 - 60 kWh.m <sup>-3</sup>	Moyenne ~ 50 -100 kWh.m <sup>-3</sup>	Elevée ~100 -500 kWh.m <sup>-3</sup>
	<b>Massique</b>	Faible ~ 0,02-0,03 kWh.kg <sup>-1</sup>	Moyenne ~ 0,05-0,1 kWh.kg <sup>-1</sup>	Haute ~0,5-1 kWh.kg <sup>-1</sup>
<b>Température de stockage</b>		Température de l'étape de charge	Température de l'étape de charge	Température de l'étape de charge ou T ambiante
<b>Durée de stockage</b>		Limitée (Pertes thermiques)	Limitée (Pertes thermiques)	Théoriquement illimitée
<b>Transport de l'énergie</b>		Faible distance	Faible distance	Distance théoriquement illimitée
<b>Maturité</b>		Echelle Industrielle (20 MW <sub>e</sub> )	Echelle pilote (100kW <sub>th</sub> )	Echelle laboratoire (1-5 kW <sub>th</sub> )
<b>Technologie</b>		Simple	Moyenne	Complexe

### Les matériaux à changement de phase

#### 2-1- Définition d'un matériau à changement de phase

On appelle matériau à changement de phase - ou MCP - tout matériau capable de changer d'état physique dans une plage de température restreinte. Un matériau à changement de phase met à profit sa capacité d'absorber ou de libérer de l'énergie pendant son changement de phase. Quand le point de fusion est atteint, le MCP passe de la phase solide à la phase liquide, ce qui est accompagné d'une absorption d'énergie (chaleur située aux alentours), ce processus aide ainsi à réduire l'augmentation de la température ambiante.

Quand le changement de phase est inversé, c'est-à-dire lorsque le matériau passe de l'état liquide à l'état solide, la chaleur absorbée est libérée. Les changements de phase se produisent sans variation de température, ce qui signifie que de grandes quantités d'énergie peuvent être stockées et relâchées sans changement de température des matériaux [34].

Un MCP permet donc de stocker la chaleur du milieu lorsque la température ambiante dépasse la température de fusion et de libérer cette chaleur quand la température devient inférieure.



**Fig.2.3** : Exemple : l'eau.

#### 2-2- Les différents changements d'état

Parmi les techniques de stockage de la chaleur thermiques, le stockage d'énergie thermique sous forme de chaleur latente admet particulièrement une haute capacité de stockage de l'énergie et ses caractéristiques à une température constante qui correspond à la phase de transition (température de matière du changement de la phase (PCM)). Le changement de phase peut être dans la forme suivante:

- Solide- solide,
- Solide-liquide,
- Solide-gaz,

## Chapitre 2

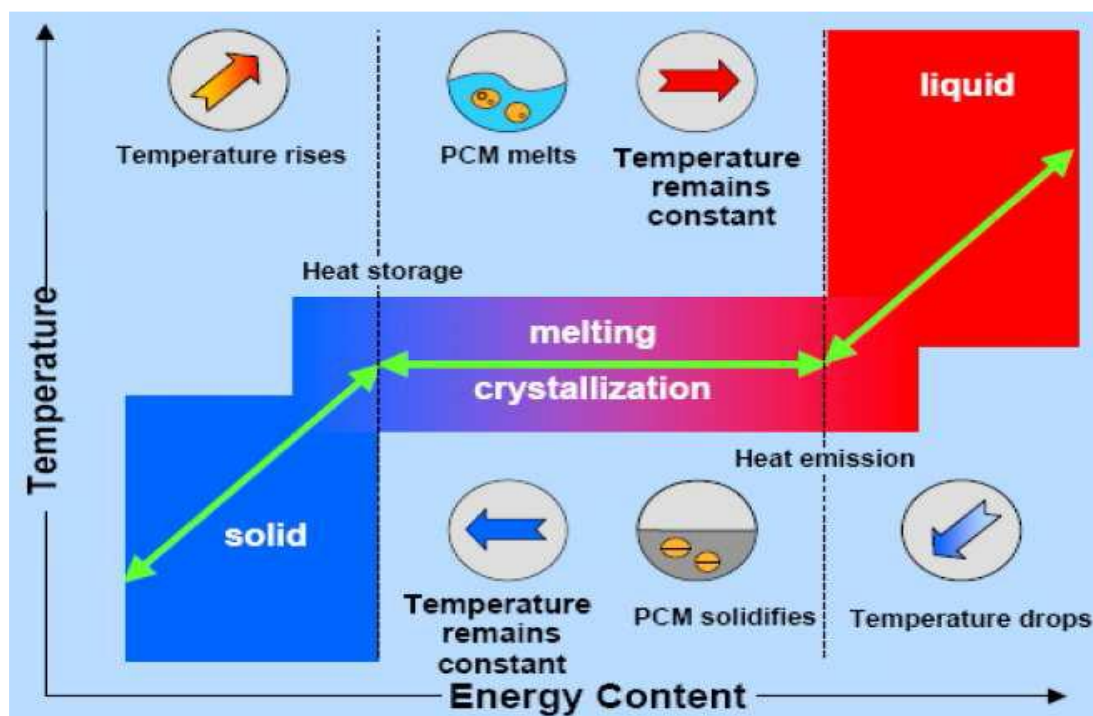
- Liquide-gaz et vice versa [26].

**Table.2.2 :** Avantages et inconvénients des différents changements d'état [35].

Changement de phase	Avantage	Inconvénients
<b>Liquide /Gaz</b>	- Grande valeur de la chaleur latente	-Grande changement de volume
<b>Solide/Solide</b>	-Faible changement de volume -Pas de formation de fluide	- Faible valeur de la chaleur latente
<b>Solide/Liquide</b>	-Faible changement de volume	-Valeur moyenne de la chaleur latente

### 2-3- Principe de fonctionnement

Les matériaux à changement de phase utilisent la chaleur latente de changement de phase pour contrôler la température dans une plage spécifique. Lorsque la température dépasse un certain point, les liaisons chimiques dans le matériau vont commencer à briser et le matériau absorbe la chaleur dans un endothermique processus ou il passe de l'état solide à l'état liquide. Comme la température baisse, le matériau dégage l'énergie et revenir à l'état solide.



**Fig.2.4 :** Principe de fonctionnement des MCP [36].

### 2-4- Types des matériaux à changement de phase (MCP)

Parmi les MCP subissant cette transformation, nous avons trois groupes de matériaux :

## Chapitre 2

---

Les organiques, les inorganiques et les eutectiques [37].

### a- Les MCP Organiques

Les matériaux ou les substances organiques ont une température ou une plage de température comprise entre 0° C et 150°. Les plus utilisés sont essentiellement à base de paraffine, des acides gras et des alcools de sucre. Ils comportent certains inconvénients, comparés aux avantages des MCP inorganiques : ils ont une plus faible conductivité à l'état solide et à l'état liquide, ils ont une chaleur latente de fusion plus faible, ils sont inflammables. Par contre, ils ont des avantages majeurs ; ils sont disponibles dans une large gamme de températures et sont compatibles avec les matériaux conventionnels de construction, ils sont chimiquement stables et ne nécessitent pas l'utilisation d'agents de nucléation. Ils sont non réactifs la plus part du temps et ils sont recyclables [37].



Fig.2.5 : Acide gras.

### -La paraffine

Les paraffines sont des matériaux organiques, constitués par des mélanges d'hydrocarbures saturés qui eux-mêmes sont des alcanes composées de chaînes de  $n$ - atomes de carbone auxquels sont attachés  $2n+2$  atomes d'hydrogène ( $C_nH_{2n+2}$ ). La paraffine la plus simple est le méthane ( $CH_4$ ). Sa température d'ébullition est très basse :  $-162^\circ C$ . C'est le constituant principal du gaz naturel [38].



Fig.2.6 : Paraffines brutes, en capsulées, en poudre ou en granulés.



### b - Les MCP inorganiques

Les matériaux ou les substances inorganiques ont une température ou une plage de températures de fusion comprise entre  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $+1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Les plus utilisés sont : l'eau (température de fusion  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), les solutions aqueuses de sel (température de fusion inférieure à  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), des sels hydratés (température de fusion comprise entre  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), des mélanges de sels, des mélanges de métaux (température de fusion supérieur à  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Ils ont plusieurs avantages : ils ont une chaleur latente importante et une haute conductivité thermique. Ils sont non-inflammables et ils ont un coût d'investissement abordable. Ils sont en général facilement disponibles. Les problèmes majeurs rencontrés lors de leurs utilisations sont en rapport avec la ségrégation, la corrosion et la surfusion nécessitant ainsi l'utilisation d'agent de nucléation afin d'être fiables [37].



**Fig.2.7:** Sels Hydratés.

### c- Les MCP eutectiques

Les MCP eutectiques sont des substances composées de plusieurs MCP purs. En général, ce sont des mélanges de MCP organiques et inorganiques (organique organique, organique inorganique, inorganique-inorganique). Ils ont deux principaux avantages ; ils ont un point de fusion net similaire à une substance pure et leurs chaleurs latentes volumétriques sont légèrement supérieures à celle des composés organiques purs. Leurs deux principaux inconvénients sont que l'on a peu de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux et ils sont peu utilisés au niveau des systèmes industriels [37].



**Fig.2.8 :** Lauric Acide.



**Table.2.3 :** Propriétés thermiques de certains MCP [37].

Matériaux		Température de fusion (°C)	Enthalpie de fusion (kJ/kg)
PCMs Organiques	Eau	0	333.6
	Stéarate de butyle	19	140
	L'acide caprique - laurique	21	143
PCMs Inorganiques	KF.4H <sub>2</sub> O	18.5	231
	Mn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	25.8	125.9
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .10H <sub>2</sub> O	32	251
PCMs Eutectiques	66,6% CaCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O+33,3% MgCl <sub>2</sub> O.6H <sub>2</sub> O	25	127
	48% CaCl <sub>2</sub> +4,3% NaCl+47,3% H <sub>2</sub> O	26.8	188
	47% Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 4H <sub>2</sub> O+53% Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O	30	136

### 2-5 - Caractéristiques de quelques MCP

Les caractéristiques de quelques MCP sont rassemblées dans les Tableaux suivantes [39].

**Table.2.4:** Caractéristiques de quelques MCP organiques.

Type de substance	Composé	Température de fusion (°C)	$\Delta H_{\text{fusion}}$ (KJ /Kg)	Conductivité thermique (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	Densité (Kg.m <sup>-1</sup> )
Substances organiques	Paraffine C <sub>21</sub> -C <sub>50</sub>	66-68	189	0.21sol	0.830liq.70 °C 0.930 sol, 20°C
	Naphtalène	80	147.7	0.132liq.83.8° C 0.341sol, 49.9°C	976 liq.45°C 1145sol, 20°C
Eutectique organique	67.1% Naphtalène+32.9% Acide benzoïque	67	123.4	0.130 liq.100°C 0.282 sol, 38°C	n.d
Acides gras	Acide caprique	32	152.7	0.153liq, 38.5° C	878liq.45°C 1004sol, 24°C
	Acide stéarique	69	202.5	0.172liq, 70°C	848liq.100°C 965sol, 24°C

**Table.2.5 :** Caractéristiques de quelques MCP inorganiques.

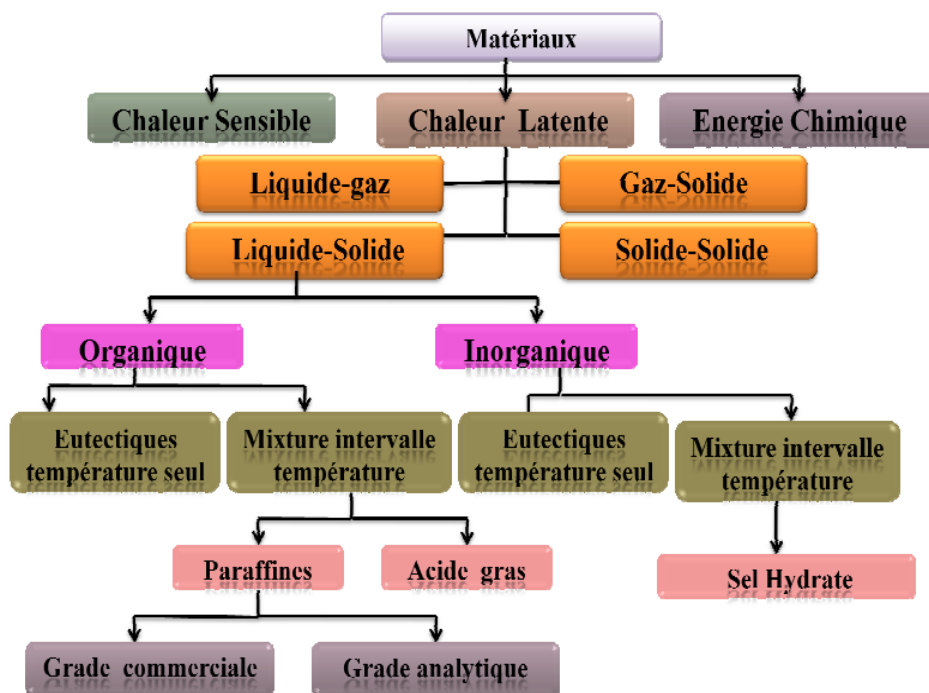
Type de substance	Composé	Température de fusion(°C)	$\Delta H_{\text{fusion}}$ (KJ /Kg)	Conductivité thermique ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )	Densité ( $\text{Kg.m}^{-3}$ )
<b>Substances Inorganiques</b>	H <sub>2</sub> O	0	333	0.612liq .20°C	998liq.20°C 917sol.0°C
	CaCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	29	190.8	0.540liq.38.7°C 1.088sol.23 °C	1562liq.32°C 1802sol.24°C
	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	89	162.8	0.490liq.95°C 0.611sol.37 °C	1550liq.94°C 1636sol.25°C
	MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	117	168.6	0.570liq.120°C 0.694sol.90°C	1450liq.120° C 1569sol.20°C
<b>Eutectique inorganique</b>	58.7%Mg(NO <sub>3</sub> ).6H <sub>2</sub> O+41.3% MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	59	132.2	0.565liq.85°C 0.678sol.38°C	1550liq.50°C 1630sol.24 °C
<b>Mélange non eutectique de Substances inorganiques</b>	50%Na(CH <sub>3</sub> COO).3H <sub>2</sub> O+50%HCONH <sub>2</sub>	40.5	255	n.d	n.d

**Table.2.6 :** Liste de quelques eutectiques.

<b>Eutectiques Inorganiques</b>	<b>Points de fusion (°C)</b>	<b>Chaleur latente de fusion (kJ /kg)</b>
49.3%MgCl.6H <sub>2</sub> O+50.7%Mg(NO <sub>3</sub> ).6H <sub>2</sub> O	58	132.3
61.5%Mg(NO <sub>3</sub> )6H <sub>2</sub> O+38.5%NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	51	131.1
58.3%Mg(NO <sub>3</sub> )6H <sub>2</sub> O+41.7%MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	58	106
CaCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O+CaBr <sub>2</sub> .H <sub>2</sub> O	14	140
<b>Eutectique Organique</b>		
Acides Caprique-Laurique	18	120
Acides Palmitique-Laurique	33	145
Acides Stéarique Laurique	34	150

### 2-6-Classification des matériaux à changement de phase

De nombreuses substances ont été étudiées comme des MCP potentiels, mais seuls quelques-uns sont commercialisés en tant que tels. La Fig.2.9 représente une classification des PCM parmi les matériaux de stockage d'énergie thermique [40].



**Fig.2.9 :** Classification des matériaux à changement de phase(PCM).

### 2-7-Comparaison entre les différents types de MCP

Plusieurs auteurs [27, 41, 42] ont présenté une comparaison des avantages et désavantages des matériaux organiques, inorganiques et eutectiques Table (2.7).

**Table.2.7 :** Avantages et désavantages des différentes catégories de MCP.

	Avantages	désavantages
<b>Organiques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ disponibles dans une large gamme de température</li> <li>➤ pas de surfusion</li> <li>➤ chimiquement stables</li> <li>➤ haute énergie de fusion</li> <li>➤ non corrosifs</li> <li>➤ simple d'utilisation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ faible conductivité thermique</li> <li>➤ chaleur latente faible</li> <li>➤ Peut être inflammable</li> <li>➤ chaleur spécifique massique faible</li> <li>➤ fort coût</li> <li>➤ masse faible</li> </ul>

<p style="text-align: center;"><b>Inorganiques</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ chaleur latente élevée</li> <li>➤ faible coût</li> <li>➤ point de fusion net</li> <li>➤ non- inflammable</li> <li>➤ forte conductivité thermique</li> <li>➤ chaleur spécifique massique élevée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ phénomène de surfusion</li> <li>➤ agent de nucléation étranger indispensable</li> <li>➤ corrosifs pour la plupart des métaux</li> <li>➤ vieillissement rapide</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>Eutectiques</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ point de fusion net</li> </ul> <p>Similaire à une substance pure</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ chaleur latente légèrement supérieures à celle des composés organiques purs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ peu de données disponibles sur les propriétés de ces matériaux</li> <li>➤ peu utilisés au niveau des applications industrielles</li> </ul>

### 2-8 -Classe de MCP

Il a plusieurs classes de MCP, les MCP plus utiliser c'est :

#### 2-8-1-Matériaux changement de phase SP

La création de la chaleur latente mêle SP a conduit d'une nouvelle et innovante classe des MCP non inflammables. SP consiste en une composition unique d'hydrates de sel et de composés organiques qui rend vraiment le cycle stable sans détérioration au fil du temps [42].

#### 2-8-2-Matériaux changement de phase RT

Le stockage d'énergie thermique avec un matériau RT absorbe une grande quantité de chaleur ; appelée chaleur latente, à une température relativement constante. Lorsque ce processus de changement de phase est inversé, c'est-à-dire du liquide à solide ; la chaleur latente précédemment stockée est libérée [43].

### 2-9- Quelques phénomènes ayant un impact sur l'efficacité du stockage

#### ❖ La surfusion:

Quand on refroidit un liquide, on n'observe pas en général la solidification au moment où on atteint la température de fusion. Le matériau peut rester à l'état liquide jusqu'à plusieurs dizaines de degrés au-dessous de la température de changement d'état. Lorsque la solidification se déclenche, elle dégage de la chaleur et si la masse de liquide est assez grande et les échanges de chaleur avec l'extérieur faibles le déclenchement de la solidification

## Chapitre 2

---

provoque une remontée de la température du matériau jusqu'à la température de changement d'état. En effet, la décharge de la chaleur (pendant la solidification) a lieu à des températures inférieures de celles où le stockage de cette chaleur a eu lieu. On a donc une différence entre la chaleur absorbée pendant le chauffage et celle restituée pendant le refroidissement [35].

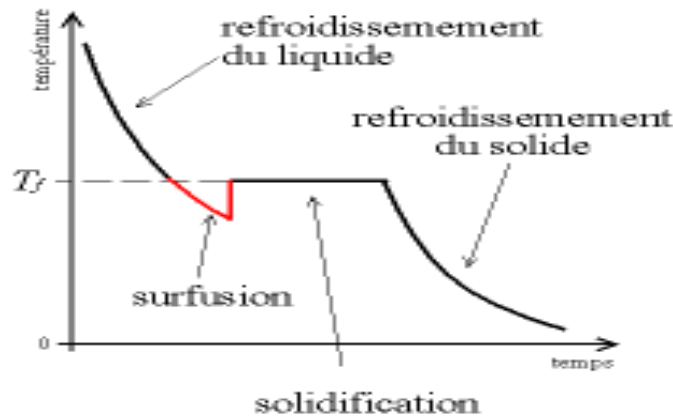


Fig.2.10 : Représente le phénomène de surfusion.

### ❖ La surchauffe

La surchauffe d'un corps est le réchauffement de ce corps après son changement d'état (réchauffement de la phase liquide après la fusion du corps, de la phase vapeur après la vaporisation du corps). Si cette surchauffe s'effectue pendant une courte durée, elle n'est considérée que comme une chaleur sensible supplémentaire stockée dans le système.

Si elle s'effectue pendant une longue durée, le stockage par chaleur latente perd l'essentiel de ses avantages par rapport au stockage par chaleur sensible [35].

### ❖ La dilatation

Pendant le changement de phase de solide à liquide, le matériau change de densité et donc de volume. Ceci peut poser problème dans quelques applications en particulier quand on utilise un conteneur fermé qui doit supporter l'augmentation de pression [35].

## 2-10-Applications des MCP

### 10-1- Le transport des produits alimentaires

Les MCP sont utilisés dans l'industrie agroalimentaire, pharmaceutique et médicale pour limiter au maximum les variations de température que subissent les aliments, les médicaments ou les composants sensibles par exemple le cas du transport du sang. Ils se présentent principalement sous la forme de « petits sacs » plastiques contenant le matériau choisi disposé au plus près du produit à conserver [44].



**Fig.2.11** : Les applications Transport de produits alimentaires.

### **10-2-Stockage de l'énergie thermique**

Les MCP stockent l'énergie en changeant de phase solide-liquide (fusion) puis ils restituent la chaleur par le changement de phase liquide-solide (solidification).

Un MCP connu pour cette application est l'acétate de sodium tri-hydraté ayant un point de fusion vers 58 °C. Ce matériau a été mis en œuvre dans de conteneurs déplaçables par camions pour stocker la chaleur évacuée d'incinérateurs d'ordures ménagères.

La restitution de l'énergie se fait alors à distance sur des stations équipées, à une température d'environ 50 °C [45].

### **10-3-L'industrie textile**

Les matériaux à changement de phase peuvent être appliqués dans des nombreux domaines d'application de l'industrie qui sont appropriés pour optimiser le confort thermophysique de vêtements, de couette à matelas, de sacs de couchage.

Il devient alors particulièrement important de trouver des matériaux dont les températures de fusion et de cristallisation sont très proches de la température superficielle du corps humain [44].

Les matériaux utilisés pour ce genre d'applications sont généralement des paraffines qui ont une température moyenne de 30-34°C, ce qui devient très confortable pour le corps humain.

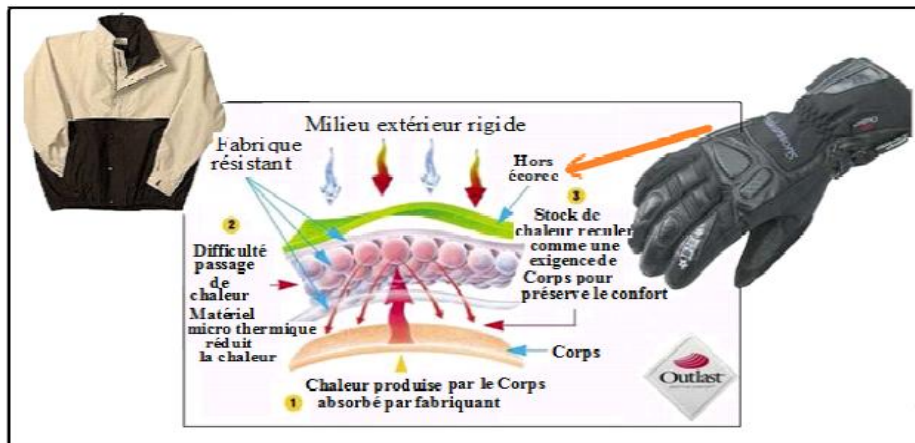


Fig.2.12 : L'efficacité de MCP dans les textiles.

### 10-4 - Application aux bâtiments

L'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) en vue du stockage de chaleur dans les bâtiments a été l'une des premières applications pour ces matériaux. Les premiers panneaux de construction de bâtiment contenant les MCP sont réalisés au Mexique par Wright et Balcomb [46]. Actuellement, la majorité des études concernant les matériaux à changement de phase (MCP) sont orientés vers :

- Leur utilisation, lorsqu'ils sont intégrés à l'enveloppe du bâtiment, pour des applications de chauffage.
- Leur intégration à l'enveloppe de bâtiments à faible inertie thermique dans le but d'améliorer le confort d'été.

L'utilisation des MCP pour chauffer ou refroidir un bâtiment, peut se faire de trois façons différentes [47].

- ✓ intégration dans les murs du bâtiment ;
- ✓ intégration dans les éléments de constructions autres que les murs ;
- ✓ intégration dans les unités de stockages à chaud et/ou à froid.

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

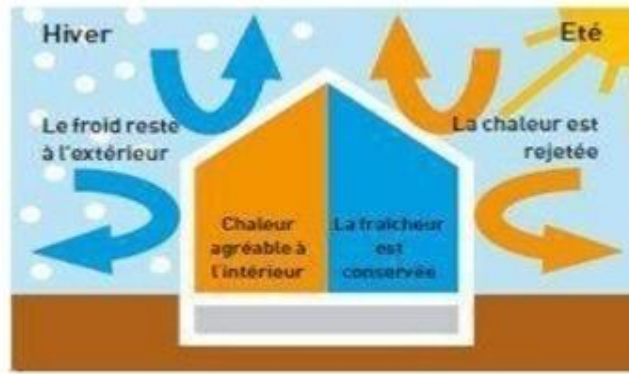


Fig.2.13 : Isolation thermique d'un bâtiment.

### 4-1-Méthodes d'utilisation du MCP dans les bâtiments

**Intégration directe :** les MCP sont mélangés avec des matériaux de construction (en général le plâtre ou le béton) lors de la fabrication.

**Encapsulation avant intégration:** les MCP sont soit en micro encapsulation, soit en macro encapsulation. Ces derniers sont intégrés soit dans les matériaux de construction, soit dans les échangeurs de chaleur.

**-Micro encapsulation :** La micro encapsulation des MCP consiste à emballer les matériaux MCP dans des capsules qui vont de moins de 1pm et jusqu'à environ 300Um [48].

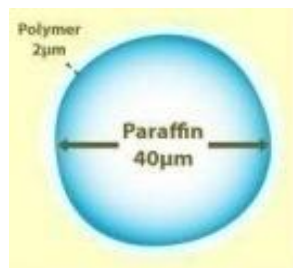


Fig.2.14: paraffine encapsulé.

- **Macro encapsulation :** Macro encapsulation se réfère à MCP encapsulés dans n'importe quel type de conteneurs tels que des tubes, des sphères ou des panneaux.

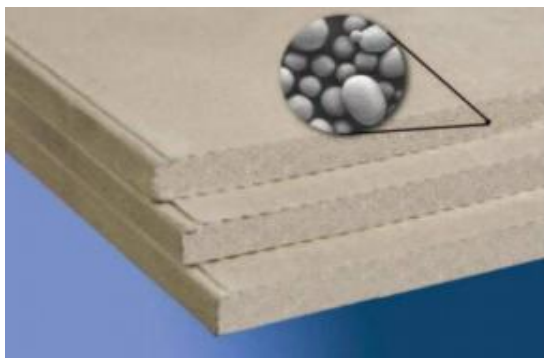




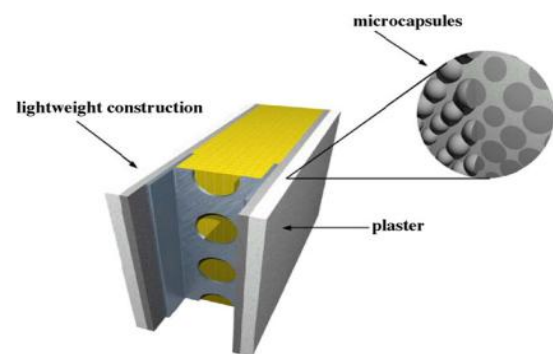
**Fig.2.15:** Capsules de différentes formes: parallélépipédiques, cylindriques, sphériques.

### 4-2-Exemples d'application des MCP aux bâtiments

L'utilisation des matériaux à changement de phase encapsulés dans les dalles et les murs des bâtiments est une méthode importante permettant de réaliser des systèmes intégrés de haute densité de stockage avec une meilleure efficacité énergétique. De plus, les caractéristiques thermophysiques des MCP les rendent convenables pour utilisation dans le stockage d'énergie pendant l'hiver et pour l'isolation thermique contre l'excès de chaleur pendant l'été.



**Fig.2.16 :** Mur béton intégrant un MCP.



**Fig.2.17:** La micro encapsulation des MCP  
Dans le domaine de construction [49].

### Les nanoparticules

#### 2-1-Introduction

Le développement des nanotechnologies constitue un challenge pour les années à venir. Les nanosciences étudient la structure de la matière au niveau moléculaire donc à l'échelle nanométrique dans le but d'innover dans de nombreux domaines tels que : l'environnement, la production et le stockage de l'énergie, le refroidissement des composants électroniques, la biologie, le diagnostic médical, le traitement de l'eau, etc....

En ce qui concerne les applications dans le domaine du transfert de chaleur, des études menées depuis une dizaine d'années ont montré que dans certaines conditions, l'ajout de particules nanométriques dans un fluide (appelé alors nanofluide) comme par exemple des particules d'Oxyde d'Aluminium ( $Al_2O_3$ ), d'Oxyde de Cuivre (CuO), le cuivre (Cu) ou des nanotubes de carbone dans l'eau pouvaient augmenter le transfert de chaleur par rapport au cas du corps pur (eau), en modifiant de manière significative la conductivité thermique du fluide porteur.

#### 2-2-Définition des nanoparticules

On appelle nanoparticules des particules de matière de quelques millièmes de millimètre. Les nanoparticules sont des particules ultra-fines dont au moins une dimension est comprise entre 1 et 100 nanomètres (milliardième de mètre). Leurs propriétés physiques, chimiques, voire biologiques découlent spécifiquement de cette taille nanométrique. Les nanoparticules sont très présentes dans notre environnement, notamment les particules émises par les véhicules diesel.

#### 2-3-Nanoparticules et les fluides porteurs

Les nanoparticules se situent à la frontière entre l'échelle microscopique et l'échelle atomique ou moléculaire. Elles ont un intérêt à la fois fondamental et appliqué et sont très étudiées de nos jours..

➤ Les nanoparticules les plus utilisées pour obtenir des nanofluides sont:

- l'oxyde d'aluminium,  $Al_2O_3$ .
- l'aluminium, Al.
- le cuivre, Cu.
- l'oxyde de cuivre, CuO.

## Chapitre 2

---

- l'or, Au.
- l'argent, Ag.
- les nanotubes de carbone.
- le silicone, Si.
- le dioxyde de titane,  $TiO_2$ .

➤ Les liquides de base les plus utilisés sont:

- l'eau.
- l'éthylène-glycol, EG.
- les huiles.
- le Toluène.

### 2-4-Utilisation des nanoparticules dans le domaine d'énergie

Il existe plusieurs utilisations des nanoparticules dans le domaine d'énergie : amélioration des performances des systèmes de production et d'utilisation de l'énergie; stockage de l'hydrogène; nouvelle génération de cellules photovoltaïques; production de batteries et cellules de combustion; optimisation de l'efficacité de l'énergie éolienne, fenêtres intelligentes, de barrières thermiques, matériaux isolants plus efficaces.

### 2-5-Propriétés thermophysiques des nanofluides

#### 2-5-1- Conductivité thermique

La conductivité thermique est une grandeur caractérisant un fluide lors d'un transfert de chaleur conductif. Dans la littérature, on trouve un nombre important d'études montrant que l'ajout d'une nanopoudre augmente la conductivité thermique d'un liquide [50-51]. La conductivité thermique des nanofluides dépend de la nature du liquide de base, de la nature du matériau constitutif des nanoparticules, de la taille, de la forme et de la concentration volumique des nanoparticules, de la température, de la présence d'additifs et du pH du mélange.

#### ❖ Modèles des conductivités thermiques

A partir de la résolution de l'équation de l'énergie, beaucoup de modèles de calcul de la conductivité thermique ont été développés pour prédire l'estimation de la conductivité du nanofluide, constitués par des éléments très réguliers tels que les nanoparticules sphériques.

## Chapitre 2

---

Les modèles décrits dans la littérature sont des outils de prédictions développés afin d'appréhender les mécanismes de transfert thermique aux seins des nanofluides.

### 1- Modèle de Maxwell

Maxwell a suppose que le fluide renferme plusieurs particules sphériques de même diamètre  $D_p$ . Les particules sont séparées d'une distance suffisante conduisant à l'absence d'interaction mutuelle entre elles, par conséquent le milieu est fortement dilaté (pas de contact entre les particules). La formule de Maxwell est donnée par [53] :

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f + 2(k_s - k_f)\varphi}{k_s + 2k_f - (k_s - k_f)\varphi}$$

$k$ ,  $k_f$ ,  $k_s$  désignent respectivement les conductivités thermiques du nanofluide, du fluide de base et des particules solides.

### 2- Modèle de Hamilton-Crosser

Le modèle de Hamilton [53] est une extension du modèle de Maxwell. Il concerne les particules de forme quelconque. Pour prendre en compte cette diversité de forme, Hamilton introduit un facteur géométrique appelé sphericité ( $\gamma$ ) faisant référence à la géométrie sphérique. Ce coefficient est défini comme étant le rapport de la surface de la sphère ayant le même volume que les nanoparticules sur la surface d'une nanoparticule. La conductivité thermique apparente du milieu est donnée par l'expression suivante :

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s + (n - 1)k_f - (n - 1)(k_f - k_s)\varphi}{k_s + (n - 1)k_f + (k_f - k_s)\varphi}$$

Où  $n$  est un facteur de forme empirique donné par :

$$n = \frac{3}{\psi}$$

$n = 3$  pour les particules sphériques et  $n = 6$  pour les particules cylindriques.

Pour  $\gamma = 1$  (particules sphériques) le modèle de Hamilton-Crosser est identique au modèle de Maxwell.

L'interface entre deux milieux constitue un obstacle au transfert de la chaleur. La résistance d'interface est un important facteur pour la détermination de la conductivité thermique des nanofluides. Ce facteur, note résistance de Kapitza ( $R_k$ ) a été pris en compte par certains

auteurs pour le calcul de cette conductivité thermique. Hasselman et Johnson [54] ont adapté le modèle de Maxwell en tenant compte de cette résistance:

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s(1 + 2\beta) + 2k_f + 2\varphi[k_s(1 - \beta) - k_f]}{k_s(1 + 2\beta) + 2k_f - \varphi[k_s(1 - \beta) - k_f]}$$

$d$  : le diamètre moyen d'une nanoparticule

$R_k$  : La résistance de Kapitsa

$K_f$ : La conductivité thermique du fluide de base

D'après Wilson et al [55], la résistance de Kapitsa entre les nanoparticules et le fluide de base est égale à  $7.7 \times 10^{-9} \text{ Km}^2 \text{ W}^{-1}$ .

### 3- Modèle de Yu et Choi

Une autre expression pour calculer la conductivité thermique a été introduite par Yu et Choi. Ils ont proposé de modéliser les nanofluides comme un liquide de base et des particules solides séparées par une couche nanométrique, cette couche agit comme un pont thermique entre le fluide et les nanoparticules. De plus, ils ont supposé que la conductivité thermique de la couche nanométrique est plus grande que la conductivité thermique de liquide [56].

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f + 2(k_s - k_f)(1 + \beta)^3 \varphi}{k_s + 2k_f - (k_s - k_f)(1 + \beta)^3 \varphi}$$

Où  $\beta$  est le rapport de l'épaisseur de la couche nanométrique sur le rayon des particules.

### 4- Modèle de Bruggeman

Le modèle proposé par Bruggeman [57] semble mieux approximer certains résultats expérimentaux comparés aux autres modèles [53,54] pour le cas des nanoparticules sphériques avec aucune limitation concernant les concentrations des nanoparticules.

$$k_{nf} = \frac{1}{4} [(3\varphi - 1)k_s + (2 - 3\varphi)k_f] + \frac{k_f}{4} \sqrt{\Delta}$$

Avec

$$\Delta = [(3\varphi - 1)^2 (k_s/k_f)^2 + (2 - 3\varphi)^2 + 2(2 + 9\varphi - 9\varphi^2)(k_s/k_f)]$$

### 2-5-2-Masse volumique et chaleur massique

La masse volumique et la chaleur spécifique est assez simple et assez conforme aux valeurs expérimentales. En revanche, pour le calcul de la viscosité, on observe une divergence entre les valeurs expérimentales et les modèles de calcul théorique [58].

$$\rho_{nf} = (1 - \phi_p)\rho_o + \phi_p \rho_p$$

$$C_{p,nf} = \frac{(1 - \phi_p)(\rho C_p)_o + \phi_p(\rho C_p)_p}{(1 - \phi_p)\rho_o + \phi_p \rho_p}$$

### 2-5-3-Viscosité dynamique

Concernant la viscosité dynamique des nanofluides, Nguyen et al [59] ont montré qu'elle augmentait avec la concentration de particules et décroissait avec la température. Ils ont aussi analysé l'influence de la taille des particules sur la viscosité. Ils ont remarqué que pour une fraction volumique de particules inférieure à 4%, la taille n'a quasiment pas d'influence. Alors que pour des fractions supérieures, la taille des particules joue un rôle important [60].

Einstein (1906):  $\mu_{nf} = \mu_o (1 + 2.5 \phi_p)$  [61]

Brinkman (1952):  $\mu_{nf} = 2.5 \mu_o (1 - \phi_p)$  [62]

## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu que le stockage thermique est une solution intéressante pour emmagasiner de l'énergie. Il existe trois modes de stockage : par chaleur sensible, par chaleur latente et par voie thermo-chimique, et parmi les trois types de stockages le stockage par chaleur latente semble être le plus adapté pour stocker l'énergie thermique par l'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) qui ont des fortes densités de stockage (quantité d'énergie stockée par unité de masse). En outre, ces matériaux peuvent être appliqués dans plusieurs domaines : Le transport de produits alimentaires, intégration aux textiles, ainsi que dans le domaine de la construction des bâtiments.

On peut améliorer les performances de stockage par l'injection de nanoparticules de haute conductivité thermique.

# Chapitre III

Simulation numérique

### 3-1-Introduction

Dans ce chapitre, une solution numérique a été développée par le logiciel Fluent pour étudier le stockage d'énergie thermique par chaleur latente dans un matériau à changement de phase encapsulé dans une enceinte sphérique, cette étude constituée de deux parties : dans la première, l'étude se fait par l'utilisation de MCP qui est le Nitrate de sodium. Dans la deuxième partie, on utilise un mélange de MCP et des nanoparticules ( $Al_2O_3$ ), enfin nous interprétons les résultats des simulations.

Le schéma représentant le circuit de stockage est présenté sur la figure ci-dessous :

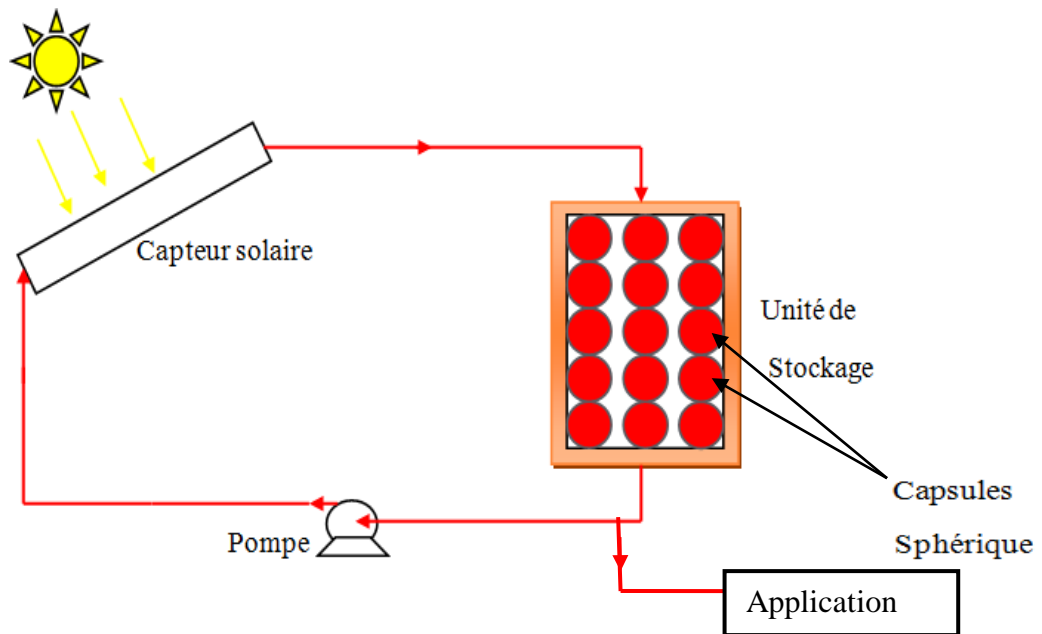


Fig.3.1 : Circuit de stockage par chaleur latente.

### Partie I :

#### 3-2- Description du problème

##### 3-2-1- Modèle physique :

Une capsule sphérique métallique de rayon intérieur  $R_i$  et d'épaisseur égale 1mm, est initialement remplie du MCP solide à température constante  $T_{initial}$ . À l'instant  $t > 0$ , une température uniforme ( $T_w$ ) supérieure que la température de fusion de MCP est imposée sur la surface extérieure de la paroi sphérique, Fig.3.2.

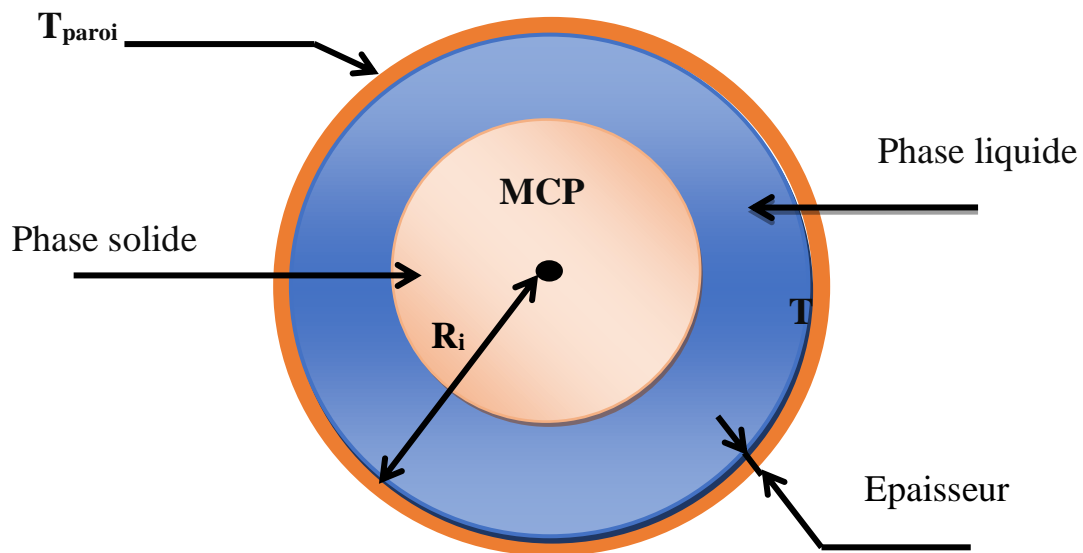
Afin de simplifier la résolution mathématique du problème, les hypothèses suivantes ont été appliquées :



## Chapitre 3

---

- ❖ Le fluide est incompressible.
- ❖ Les phases solides et liquide du PCM sont homogènes et isotropies.
- ❖ La phase liquide est un fluide Newtonien.
- ❖ L'écoulement est laminaire et sans dissipation visqueuse.
- ❖ Les propriétés thermophysiques du PCM qui sont utilisées pour estimer les nombres adimensionnels, sont calculées en basant sur la température de référence  $\bar{T}$ .
- ❖ Les propriétés thermophysiques des matériaux utilisés dans la simulation sont résumées dans le table.3



**Fig.3.2** : Module de stockage.

## Chapitre 3

**Table.3.1:** Propriétés thermophysiques des matériaux utilisés.

Propriétés	Nitrate sodium	Cuivre
Température de fusion (°C)	306.3/306.8	
Viscosité dynamique (kg/m s)	0.01192-1.53E-5T	
Chaleur latente de fusion (j/kg)	178000	
Conductivité thermique (W/mk)		
Solide	0.68	90.7
Liquide	0.57	
Coefficient de dilatation thermique (k <sup>-1</sup> )	6.6×10 <sup>-4</sup>	444
Chaleur spécifique (j/kg k)	444.53+2.18T	
Densité (kg/m <sup>3</sup> )		
Solide	2130	8900
Région	25933.2-444T	
Liquide	1908	

Les sels de type nitrate sont choisis traditionnellement pour leurs propriétés suivantes :

- Bonne stabilité chimique, pas volatiles et pas toxiques.
- Bonne densité d'énergie.
- Faible effet corrosif pour les matériaux de construction classiques.
- Composition du mélange et le diagramme de phase.
- Faible chute de température pendant la solidification.

### 3-2-2-Condition aux limites

Pour simuler le comportement thermodynamique du matériau de stockage pendant la fusion, nous avons étudié une coupe transversale d'une demi-sphère sur laquelle nous imposons les conditions aux limites suivantes :

- ❖ L'axe de sphère est l'axe de symétrie.
- ❖ Température constante à la paroi extérieure "T<sub>w</sub>"
- ❖ Sur l'ouverture : pression à la sortie.

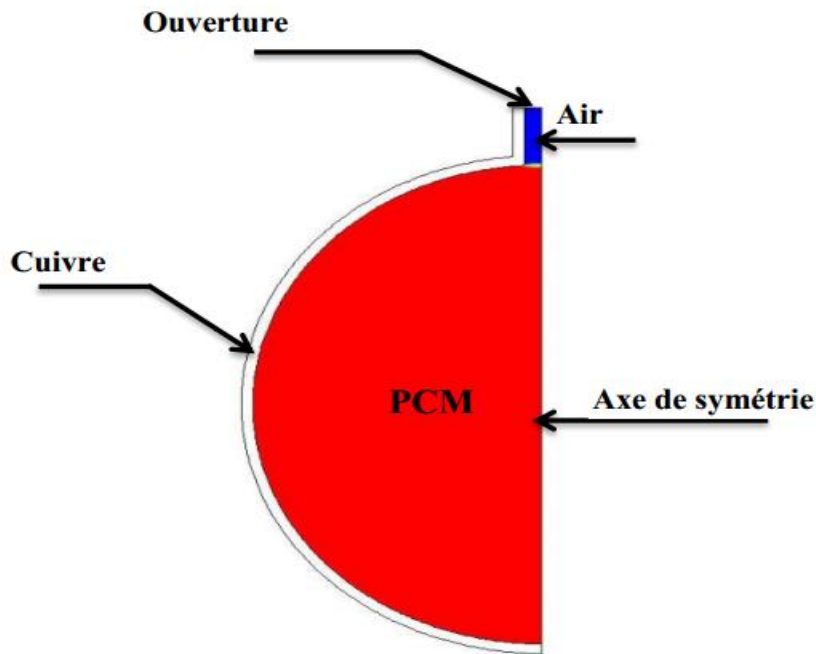


Fig.3.3 : Le domaine du calcul.

### 3-3-Modélisation mathématique

A l'aide de la technique de volume de contrôle utilisée pour résoudre les équations d'énergie, de continuité et de vitesse sur le système. L'approche numérique permet de calculer les processus qui se produisent à l'intérieur du PCM (conduction), du PCM-liquide (convection) et l'air (convection), en même temps. L'approche numérique permet aussi de tenir compte du changement de phase, du déplacement de l'interface solide /liquide dû à la variation du volume de MCP, et le mouvement de la phase solide dans la masse fondue. En basant sur la symétrie du modèle physique, un domaine du calcul est défini, comme montré sur la figure.3.3.

Afin de décrire le système PCM-air avec une interface mobile mais sans interpénétration des deux fluides, le modèle « volume of fluide (VOF) » a été utilisé. Dans ce modèle, si la fraction volumique de la  $n^{\text{ième}}$  fluide dans la cellule de calcul est noté  $\alpha_n$ , alors les trois conditions suivantes sont possible : si  $\alpha_n = 0$  la cellule est vide du  $n^{\text{ième}}$  fluide ; si  $\alpha_n = 1$  la cellule est pleine du  $n^{\text{ième}}$  fluide ; et si  $0 < \alpha_n < 1$  la cellule contient une interface entre le  $n^{\text{ième}}$  fluide et un ou plusieurs autres fluides. Ainsi, les variable et les propriétés dans une cellule donnée sont soit : purement représentatives de l'un des fluides ou d'un mélange, tous dépend de la valeur de la fraction volumique.

## Chapitre 3

---

A l'intérieur du MCP, l'approche enthalpie-porosité est utilisée, par laquelle la porosité de chaque cellule est égale à la fraction liquide dans la cellule. Par conséquent, la porosité est nulle à l'intérieur des régions pleinement solides. Par conséquent, les équations de conservation régissant utilisées ici pour le système MCP-air sont :

Continuité :

$$\frac{\partial \alpha_n}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_n}{\partial x_i} = 0$$

Quantité de mouvement :

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho g_i$$

Energie :

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j h)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right)$$

Où  $\alpha_n$  est le n<sup>ième</sup> fluide dans la cellule du calcul,  $\rho$  est la masse volumique,  $K$  est la conductivité thermique,  $\mu$  est la viscosité dynamique,  $u_i$  sont les composantes de la vitesse,  $x_i$  est la coordonnée cartésienne et  $h$  est l'enthalpie totale. Cette dernière est définie comme la

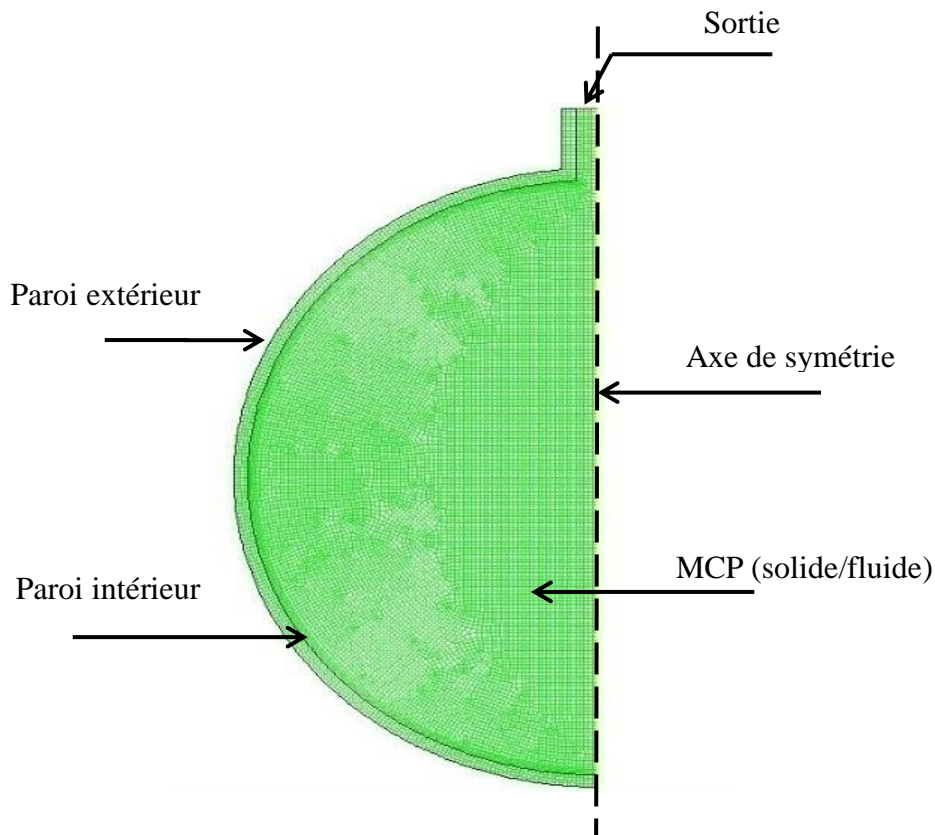
somme de l'enthalpie sensible :  $h_s = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT$  et l'enthalpie latente :  $h_l = \gamma L$ , ou  $h_{ref}$

est l'enthalpie de référence à une température de référence  $T_{ref}$ ,  $C_p$  est la chaleur spécifique,  $L$  est la chaleur latente de la fusion du MCP et  $\gamma$  est la fraction liquide.

La solution numérique a été obtenue en utilisant le software Fluent 14.5, La convergence de la solution est vérifiée à chaque pas du temps avec un critère de convergence de  $10^{-4}$  pour la continuité et les composantes de la vitesse de  $10^{-3}$  et pour l'équation de l'énergie de  $10^{-6}$ .

### 3-3-1-Maillages :

La figure suivante représente la géométrie et le maillage qui est généré par le code Gambit, le maillage est de type quadratique structuré pour le domaine solide et fluide (air et MCP). La taille de maille est de 0.5mm. Pour faciliter la simulation (réduction du temps et de l'espace mémoire), le domaine de calcul ne comportera que la moitié d'une coupe transversale de la sphère (axisymmetry conditions).



**Fig.3.4** : Maillage du domaine de calcul.

### 3-4-Résultats et discussion

Dix configurations ont été analysées dans la présente étude est résumées dans le tableau 3.1.

Pour simplifier nous avons divisé l'étude en quatre grandes parties :

- Pour les cas 1 à 3 le rayon est fixe et la température de la paroi extérieure varie.
- Pour les cas 4, 5 et 6, l'effet du nombre de Stefan est étudié en gardant le nombre de Grashof constant.
- Pour les cas 1,7 et 8, l'effet du nombre de Grashof sur le processus de fusion pour un nombre Stefan constant.
- Pour les cas 8 à 10, l'effet de la température initiale du système lors de la fusion. Un paramètre de sous-refroidissement a été défini comme  $\zeta = 1 - (T_i / T_{fusion})$ .

Tous résumés dans le table.3.2 suivant :

## Chapitre 3

**Table.3.2** : les différents cas analysés.

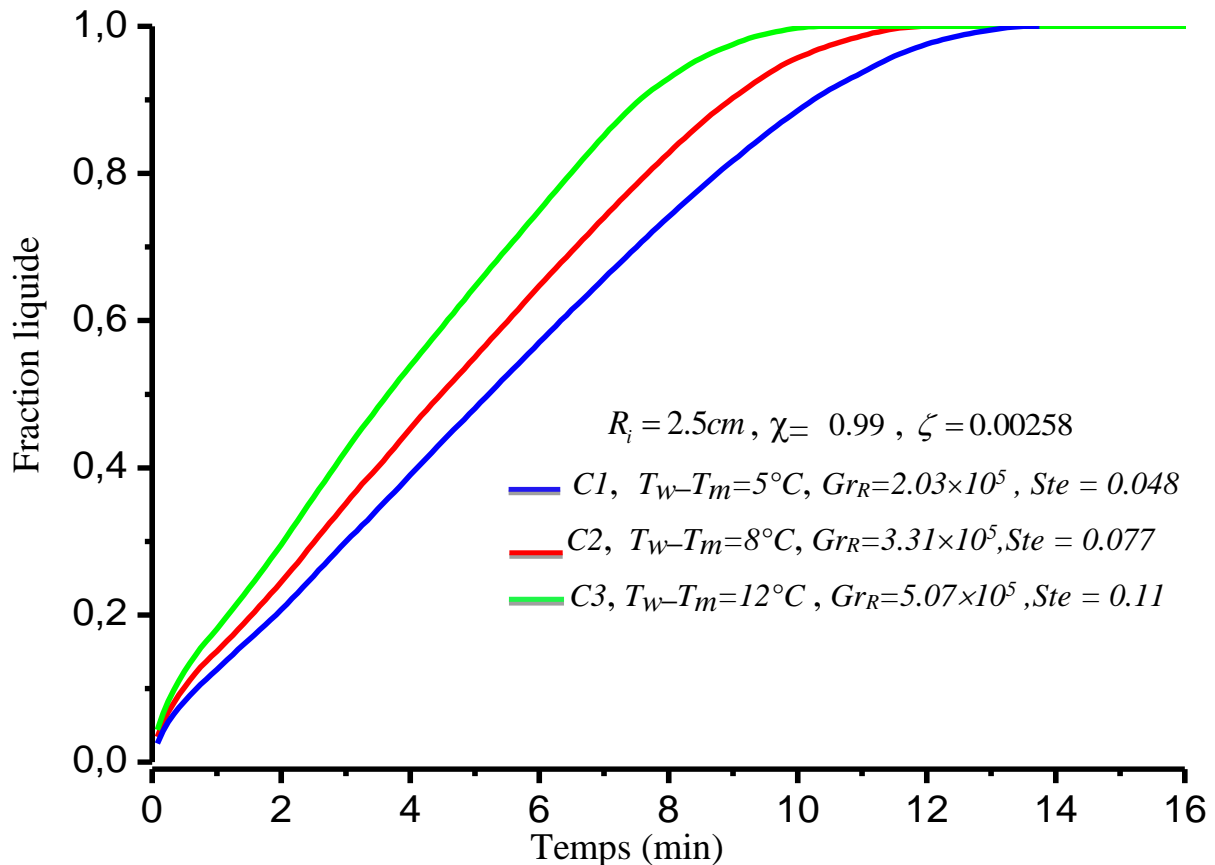
Nombre de cas	$R_i$ (m)	$T_w - T_m$ (°C)	$Gr_R$	$Pr$	$Ste$	$\chi$	$\xi$
01	0.025	5	$2.03 \times 10^5$	9.05	0.048	0.99	0.00258
02	0.025	8	$3.31 \times 10^5$	8.97	0.077	0.99	0.00258
03	0.025	12	$5.07 \times 10^5$	8.90	0.11	0.99	0.00258
04	0.019	7	$1.26 \times 10^5$	9.00	0.067	0.99	0.00258
05	0.021	6	$1.27 \times 10^5$	9.02	0.057	0.99	0.00258
06	0.023	4	$1.26 \times 10^5$	9.04	0.038	0.99	0.00258
07	0.030	5	$3.51 \times 10^5$	9.05	0.048	0.99	0.00258
08	0.035	5	$5.57 \times 10^5$	9.05	0.048	0.99	0.00258
09	0.035	5	$5.57 \times 10^5$	9.05	0.048	0.99	0.01724
10	0.035	5	$5.57 \times 10^5$	9.05	0.048	0.99	0.02587

### 3-4-1-Analyse des résultats :

L'effet de la température de la surface extérieure a été examiné en comparant les cas 1, 2 et 3. Une capsule de rayon intérieur égal à 25 mm a été soumise sur sa surface externe à trois différentes valeurs de températures au-dessus de la température de fusion de PCM.

A partir de la figure.3.5 qui représente l'évolution transitoire de la fraction liquide pour les cas pré-mentionnés, on remarque que la plus rapide fusion été accomplie pour le cas où  $T_w - T_m = 12^\circ\text{C}$  et ensuite le cas où  $T_w - T_m = 8^\circ\text{C}$  et vers la fin  $T_w - T_m = 5^\circ\text{C}$ . Pour cela en pourra noter que pour le même MCP et pour la même dimension de la géométrie, le nombre de Grashof et de Stefan ne varient à cause de la différence entre  $T_w - T_m$ .

Par conséquent, le comportement décrit précédemment peut être associée à deux effets différents : l'augmentation du transfert de chaleur par convection naturelle et l'augmentation de la chaleur sensible par le nombre de Stefan. Plus loin dans la discussion l'effet de nombre du Grashof sera isolé et une comparaison claire sera présentée.



**Fig.3.5:** Variation de la fraction liquide en fonction du temps pour différentes températures de paroi.

D'autre part, pour accomplir le point discuté précédemment sur l'influence de la température extérieure de la paroi, en axant l'étude sur le flux de chaleur à la surface intérieure de la capsule (voir fig. 3.6). Initialement l'énergie thermique est transférée par conduction à travers la paroi extérieur de la sphère cela est due à la différence de température entre  $T_w - T_m$ ; par conséquence des valeurs élevées du flux de chaleur sont observés au début du processus. Quand le processus de chauffage se poursuit, la fusion commence par la création de la première couche de PCM liquide au voisinage de la surface intérieure de la paroi. Quand la couche de PCM fondue devient plus grande, le phénomène de la convection naturelle sera dominant. Après cette période, toutes les courbes présentent une tendance de décroissance lente avec une diminution progressive vers l'état d'équilibre thermique.

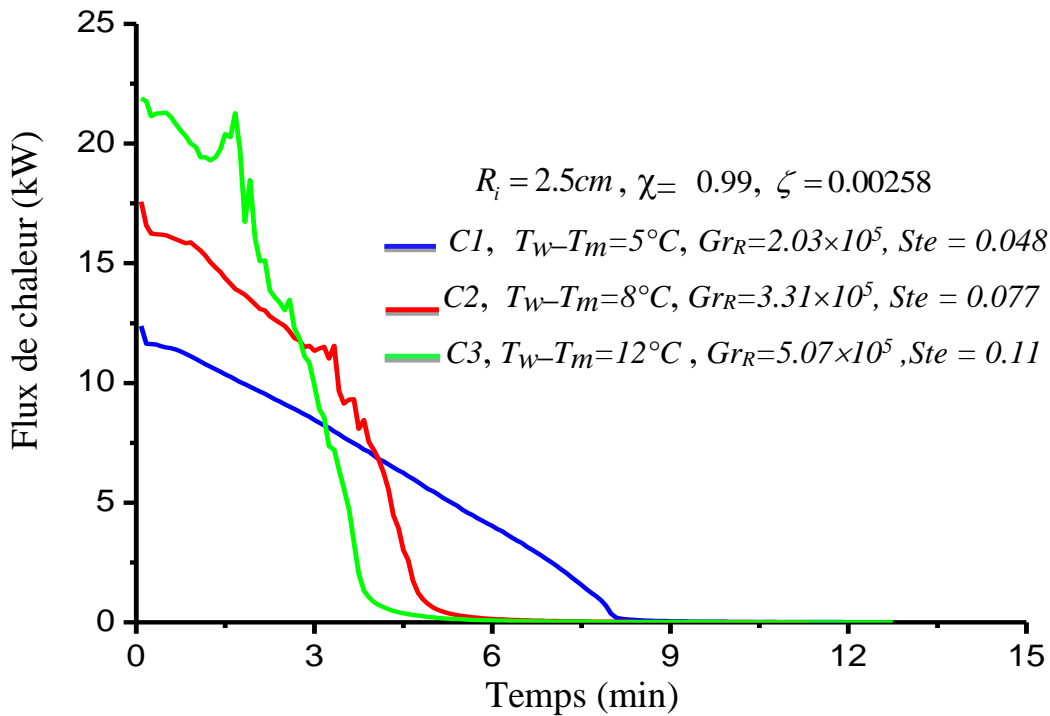


Fig.3.6 : Variation de flux de chaleur en fonction du temps pour différentes températures.

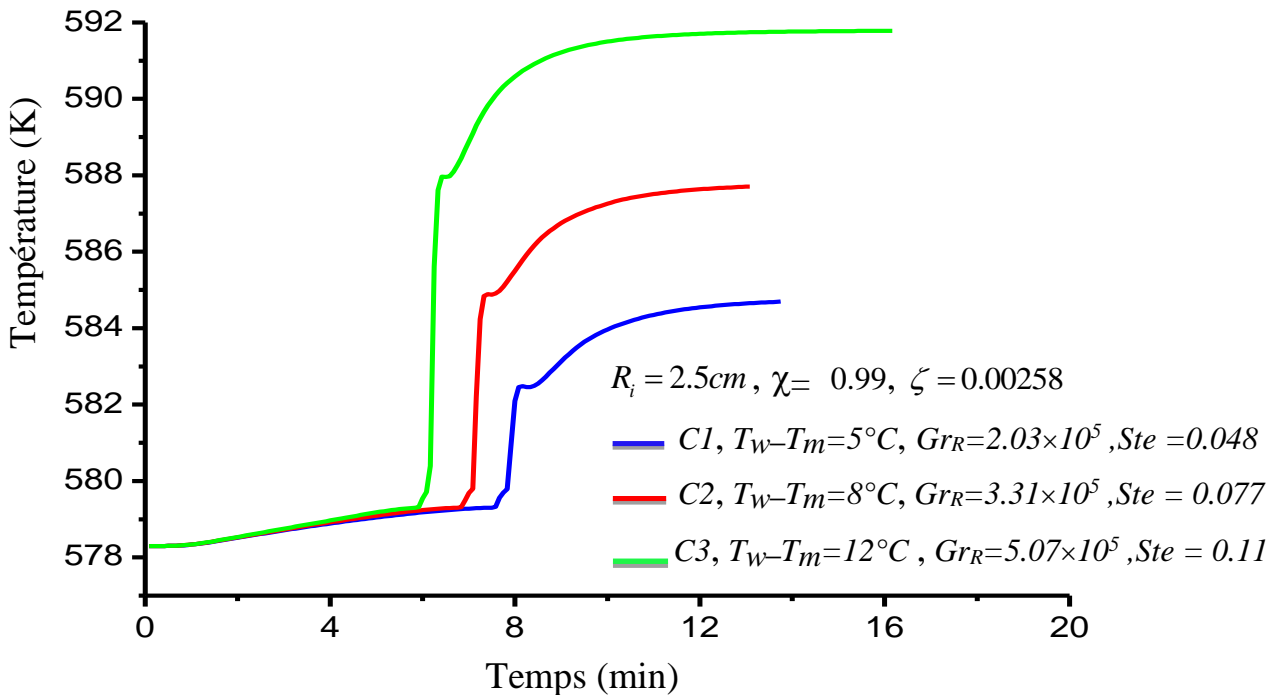


Fig.3.7 : Variation de température au centre de la sphère en fonction du temps pour différentes températures de paroi.

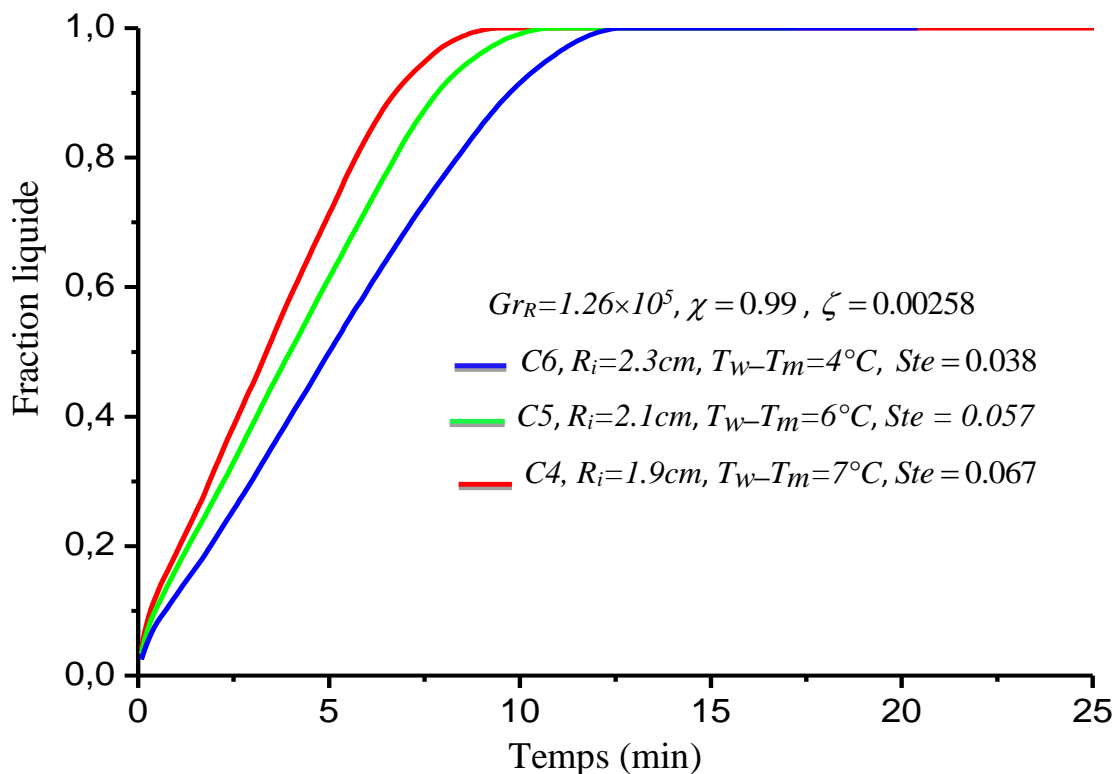
L'évolution transitoire de la température au centre de la sphère pour les cas 1,2 et 3 est présentée dans la figure.3.7. Au début de fusion du MCP les trois courbes sont à la même



## Chapitre 3

ligne, après une période de temps on remarque que pour la même taille de sphère, la fusion du MCP pour  $T_w-T_m=12^\circ\text{C}$  se fait en un temps court, ensuite le cas où  $T_w-T_m=8^\circ\text{C}$  et enfin  $T_w-T_m=5^\circ\text{C}$ , toute les courbes de la température augmentent jusqu'à la saturation du MCP.

L'effet du nombre de Stefan sans une contribution du nombre de Grashof est illustré dans les figures.3.8 et 3.9. Trois cas avec différentes températures de la paroi (4, 6 et 7 °C) ont été analysés. Le couplage entre le nombre de Stefan et le nombre de Grashof est la différence de température ( $T_w-T_m$ ). Afin de maintenir le nombre de Grashof à peu près constante et à atténuer l'effet de la taille de la sphère, le rayon intérieur de la capsule a été soigneusement varié dans la plage entre 19mm, 21mm et 23 mm. La figure.3.8, montre la fraction liquide prédit en fonction du temps de traitement pour les cas 4, 5 et 6. Une fusion rapide est obtenue lorsque le nombre Stefan change de 0.038 à 0.067.



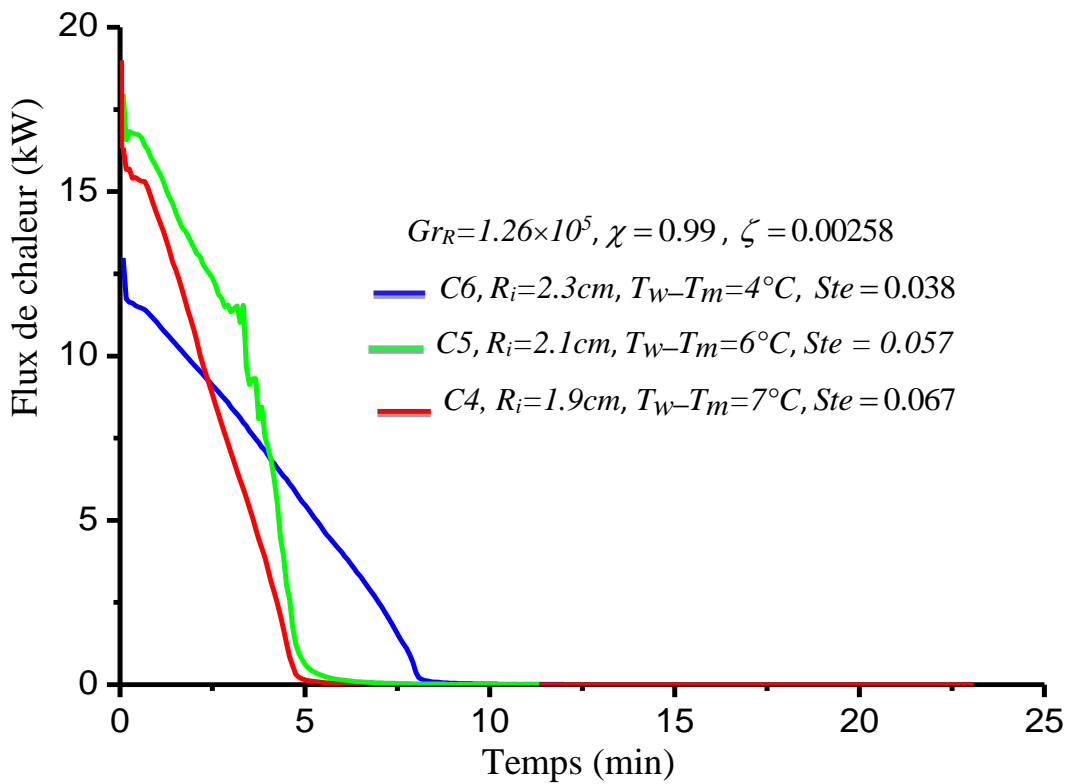
**Fig.3.8** : Effet de nombre de Stefan sur la fraction liquide en fonction du temps.

Le flux de chaleur au niveau de paroi intérieure pour les cas 4, 5 et 6 est représenté sur la figure.3.9. Avant le début de la fusion, toutes les courbes fusionnées en une seule ligne. Après cela, en raison du fait que le nombre de Grashof est maintenue constant, on observe que le

## Chapitre 3

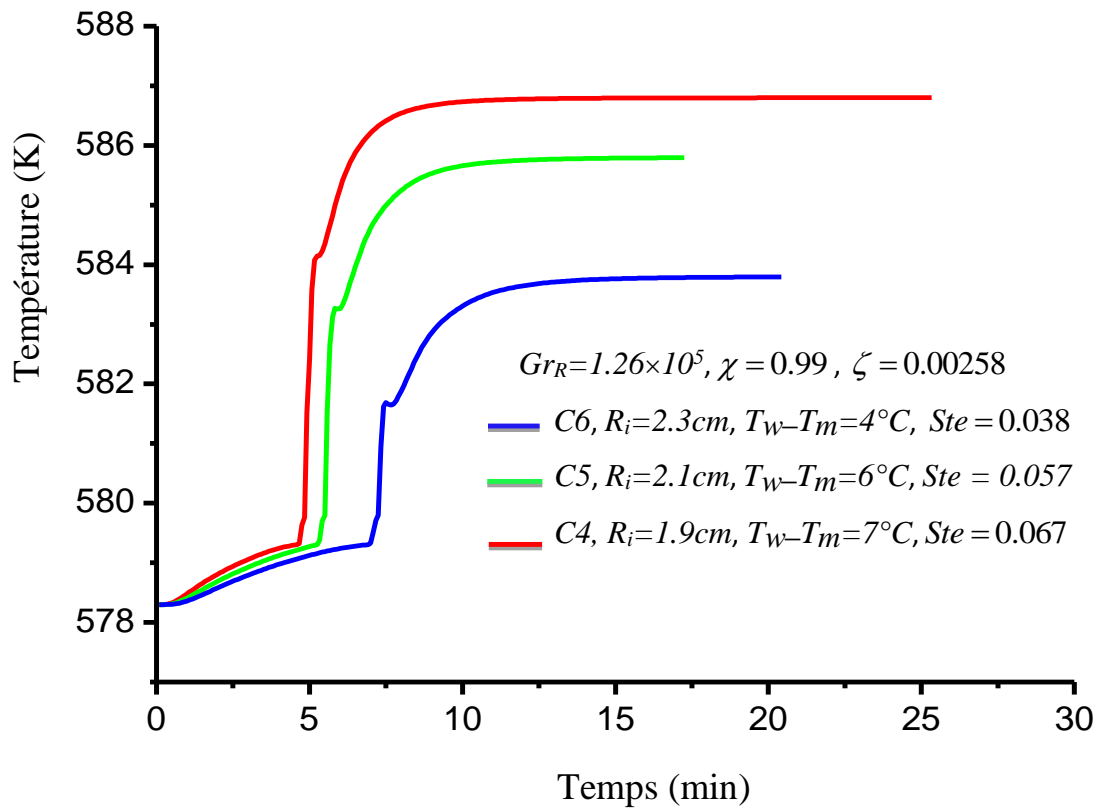
---

transfert de chaleur par convection naturelle commence à influencer le processus de fusion à peu près en même temps. Après cela, toutes les courbes montrent la tendance de décroissance lente jusqu'à ce que l'équilibre thermique soit atteint.



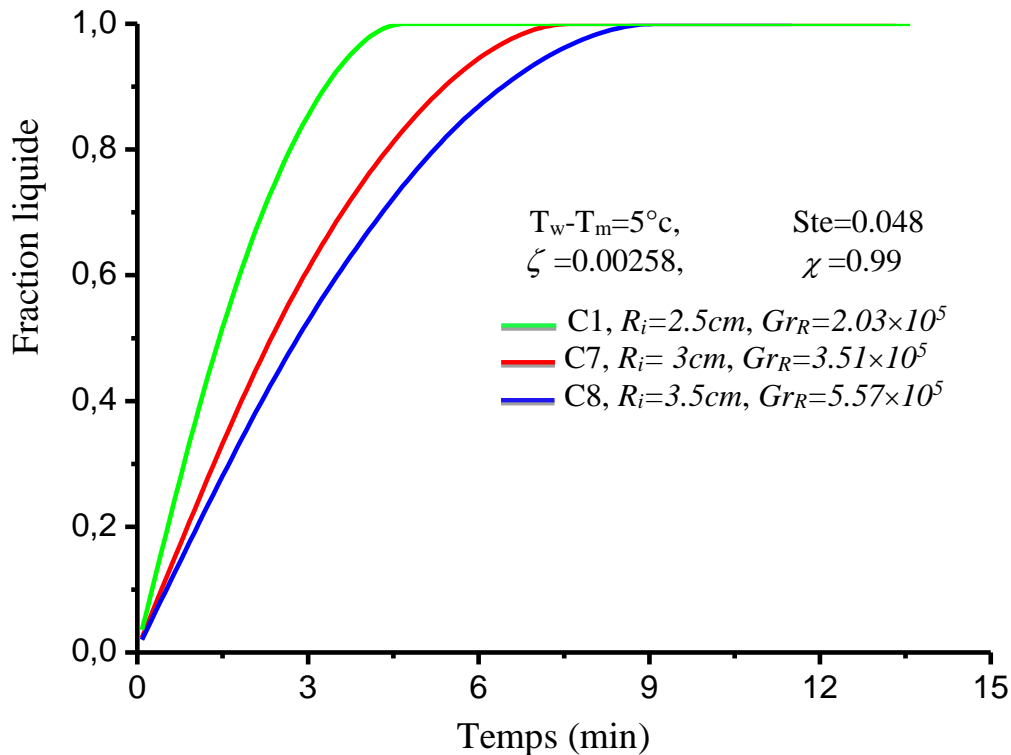
**Fig.3.9** : Effet de nombre de Stefan sur le flux de chaleur en fonction du temps.

La figure.3.10 montre la distribution de la température en fonction du temps au centre de la sphère, pour les cas 4, 5 et 6 et à un nombre de Grashof constant. On remarque que le nombre de Stefan augmente avec l'augmentation de température de paroi extérieure.



**Fig.3.10** : Effet de nombre de Stefan sur la température au centre de la sphère en fonction du temps.

Dans le but d'étudier l'influence du rayon intérieur de la sphère sur le processus de fusion, trois cas ont été analysé avec des rayons  $R_i = 25, 30, 35$  mm pour les cas 1, 7, 8 respectivement, et avec un nombre de Stefan constant. A partir de la figure (3.11) qui représente la fraction liquide en fonction du temps on remarque qu'à chaque fois que le rayon augmente le temps de fusion augmente.

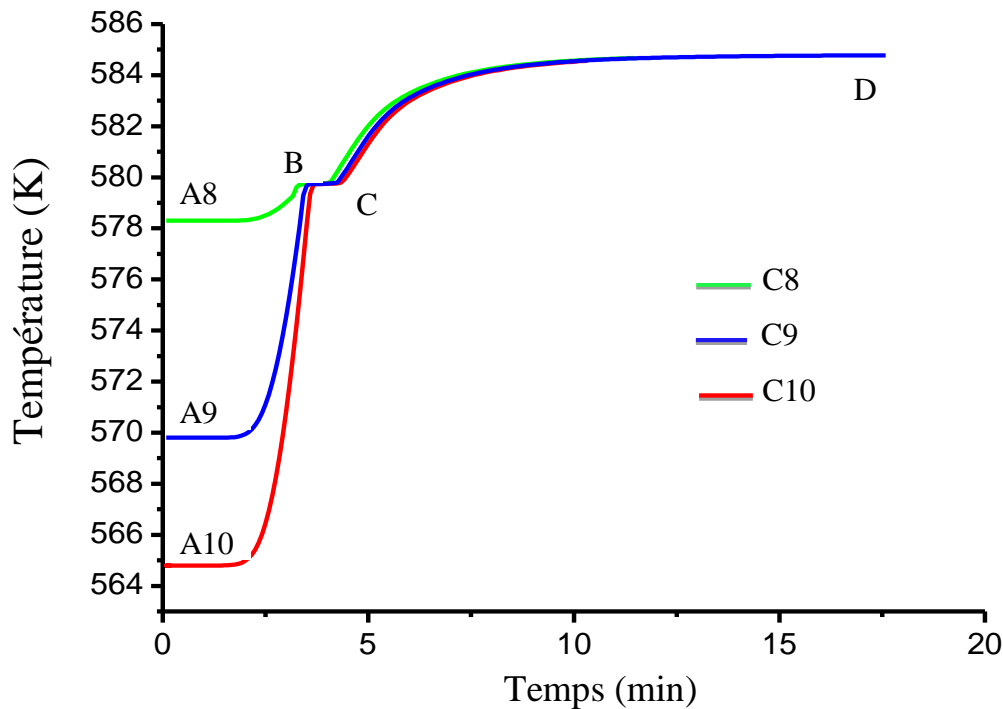


**Fig.3.11** : Effet de rayon sur la fraction liquide en fonction du temps.

La figure 3.12 représente l'étude de l'effet de la température initiale du système ; trois cas ont été analysés avec différentes températures initiales du système de stockage (1, 10 et 15 °C inférieure à la température de fusion du PCM). La prise de température a été enregistrée au centre de la géométrie.

A partir des graphes on remarque que :

- Dans la région A-B : le stockage d'énergie s'effectue par chaleur sensible en état solide à la température initiale du système et une différence a été enregistrée entre les trois cas.
- La région B-C : aucune différence significative n'a été observée au cours de changement de phase ce qui provoque le stockage par chaleur latente.
- La région C-D : le stockage d'énergie s'effectue par chaleur sensible en état liquide.

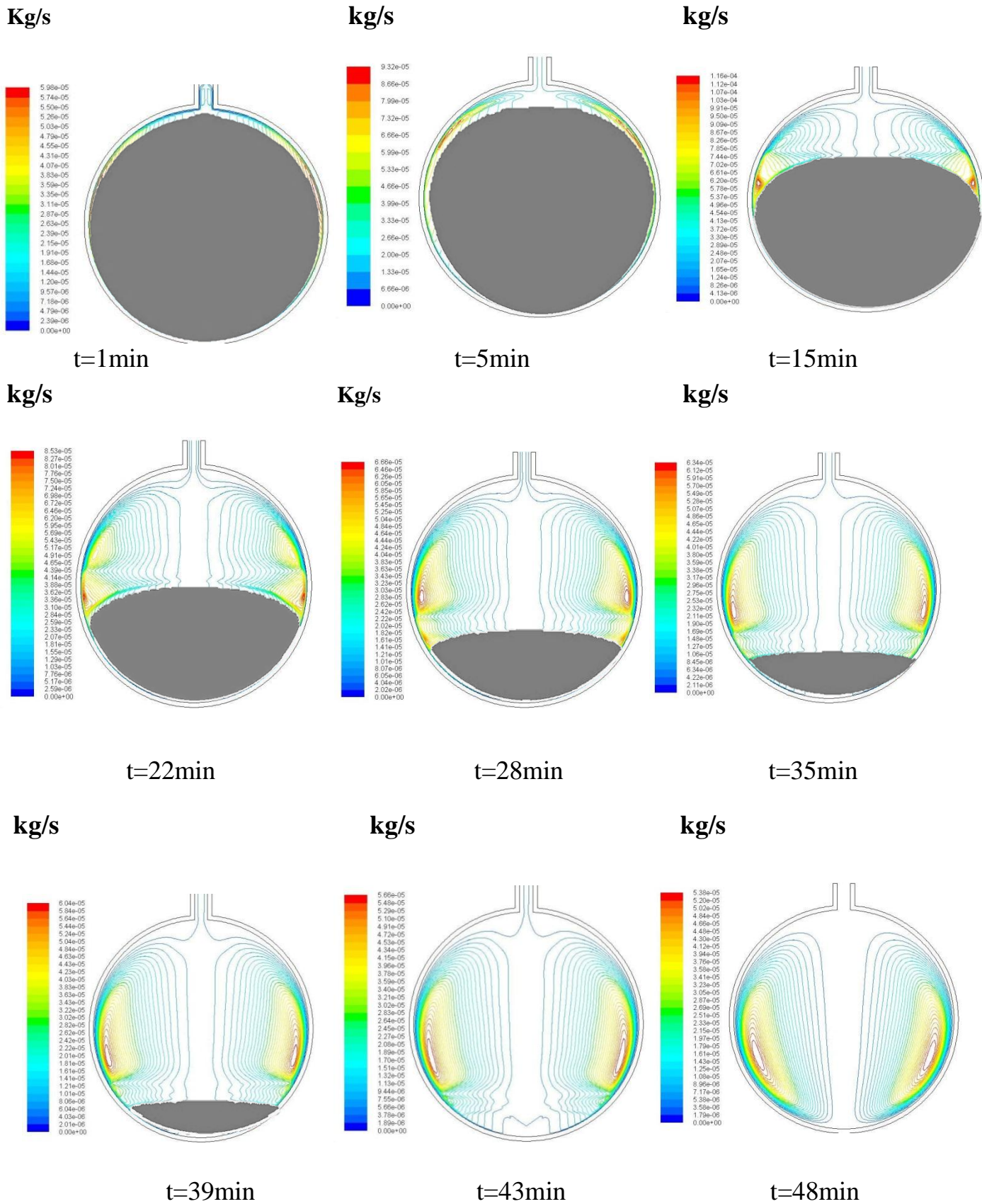


**Fig.3.12** : Variation de la température en fonction du temps au centre de la sphère pour différentes  $T_i$ .

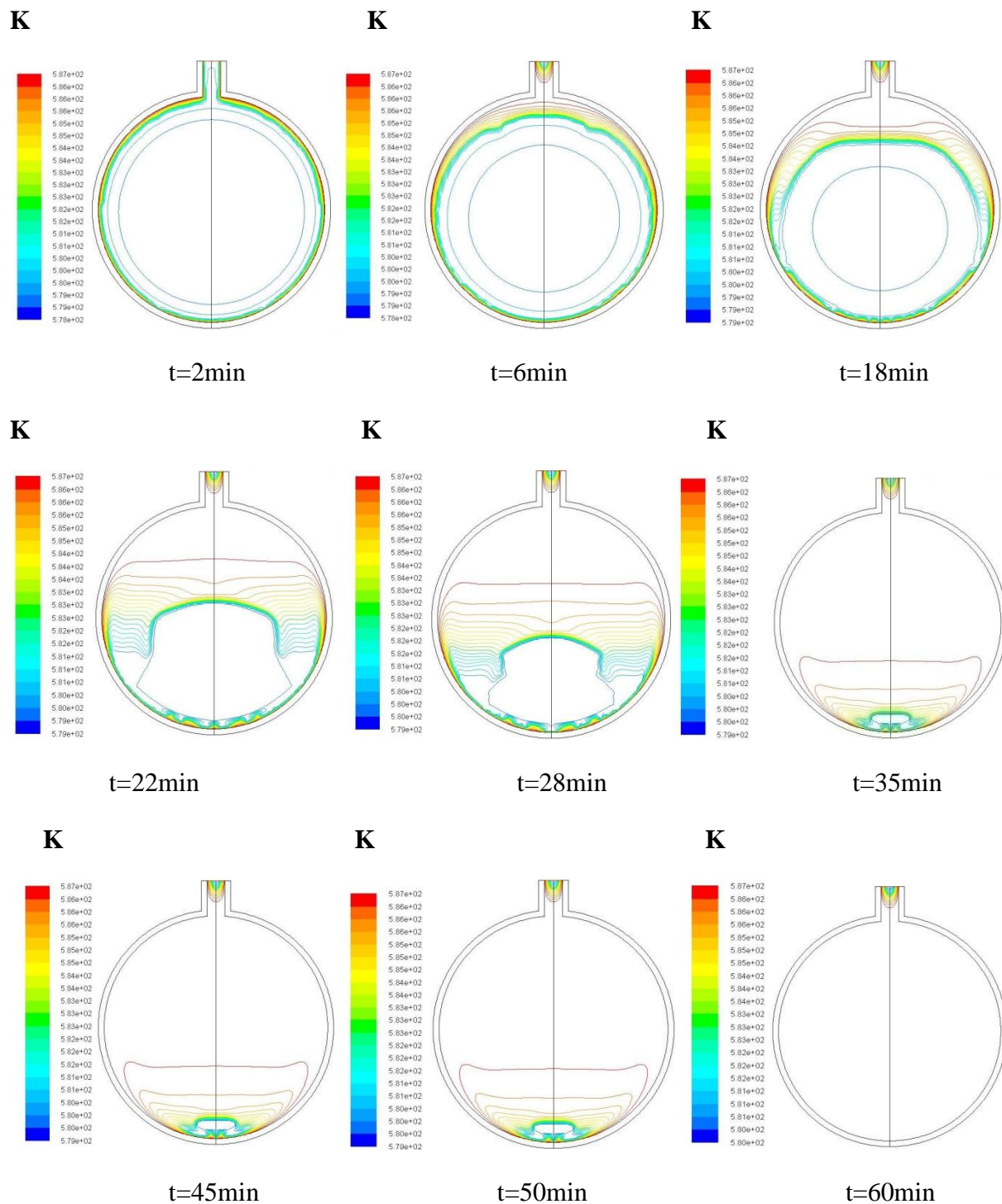
Les prédictions numériques de la fraction solide, des lignes de courant et des isothermes pour le cas 1 sont présentées dans la figure 3.13, à différents instants. La fraction solide et les lignes de courant sont présentés sur la figure 13a, tandis que les isothermes sont tracées sur la figure 13b. La distribution de la fraction solide à un instant donné est représentée dans la région grise en chaque parcelle.

Le fluide ascendant transfère sa chaleur au fluide froid adjacent dirigé vers l'intérieur, et devient froid descendant vers le bas et adjacent à l'interface solide liquide. Ainsi, dans la partie supérieure de la capsule, une recirculation d'écoulement dans le sens antihoraire est formée, Fig.13a. Un résultat direct de la recirculation est la fusion rapide qui se produit sur la partie supérieure de la phase solide et provoque un changement dans la forme sphérique originale du noyau solide pour un sphéroïde aplati.

Au cours des premiers temps de fusion, l'énergie thermique est transférée par conduction et cela revient à la différence entre la température de la paroi et la température initiale du système. Il est bien connu que, pendant les premières périodes du processus, le phénomène de la conduction thermique est dominant, et de la convection naturelle joue un rôle moins important (13.b).



**Fig.3.13a:** Contour de la fraction solide et les lignes de courant.



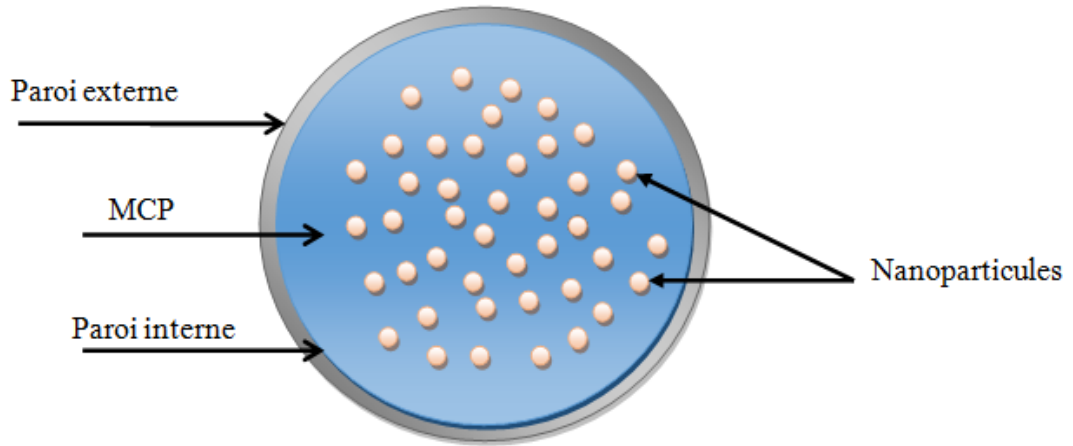
**Fig.3.13b:** Contour des isothermes durant la fusion.



### Partie II :

#### 3-5- Introduction

Cette partie de simulation présente une étude sur l'influence de l'injection des nanoparticules dans le matériau à changement de phase. L'addition des nanoparticules de haute conductivité thermique favorise sensiblement le transfert de chaleur. En gardant les mêmes conditions aux limites et le même MCP utilisées dans la première partie. La figure (3.13) présente le module de stockage étudié.



**Fig.3.14** : Module de stockage par chaleur latente.

#### 3-6- Modèles mathématiques des NEPCM

Lorsque les particules de haute conductivité thermique sont ajoutées dans le PCM, les propriétés thermophysiques du mélange NEPCM dépendent de la fraction volumique et de la nature des nanoparticules. Les propriétés du mélange sont donc une combinaison entre les propriétés des nanoparticules et du PCM [22] tels que :

- La masse volumique  $\rho_{npcm} = (1 - \phi) \rho_{pcm} + \phi \rho_p$
- La chaleur massique  $cp_{npcm} = \frac{(1 - \phi)(\rho cp)_{pcm} + \phi (\rho cp)_p}{\rho_{npcm}}$
- La conductivité thermique  $k_{npcm} = k_{pcm} \left( \frac{k_p + 2k_{pcm} - 2\phi(k_{pcm} - k_p)}{k_p + 2k_{pcm} + \phi(k_{pcm} - k_p)} \right)$
- La chaleur latente  $q_{npcm} = \frac{(1 - \phi)(\rho q)_{pcm}}{\rho_{npcm}}$



## Chapitre 3

- La viscosité cinématique 
$$v_{npcm} = \frac{v_l}{(1-\phi)^{2.5}}$$

Où  $\phi$  est la fraction volumique, elle est définie comme le rapport entre le volume occupé par les nanoparticules et le volume total des parois de stockage.

### 3-7- Résultats et discussion

Dans cette partie nous avons choisie les nanoparticules ( $Al_2O_3$ ), le rayon intérieur du module de stockage est  $R_i = 25\text{mm}$  et la Température de la paroi extérieure est  $584.8\text{ K}$  ( $T_w - T_m = 5^\circ\text{C}$ ). Les propriétés thermophysiques du mélange sont calculées avec différentes fractions volumique (1%, 5% et 10%). L'effet de la concentration des nanoparticules est présenté dans cette partie.

Les propriétés des nanoparticules ( $Al_2O_3$ ) et du mélange sont mentionnées dans le tableau (3.3) et (3.4) respectivement :

**Table.3.3 : Propriétés thermophysiques des nanoparticules utilisées.**

Propriétés thermophysiques	$Al_2O_3$
conductivité thermique ( $W\ m^{-1}K^{-1}$ )	36
chaleur spécifique ( $kJ\ kg^{-1}K^{-1}$ )	0.765
masse volumique ( $kg\ m^{-3}$ )	3970

**Table.3.4 : Propriétés thermophysiques du mélange (NEPCM).**

Propriété	$\phi = 1\%$	$\phi = 5\%$	$\phi = 10\%$
La masse volumique ( $kg\ m^{-3}$ )	1928.62	2011.1	2114.2
La chaleur spécifique ( $J\ kg^{-1}K^{-1}$ )	1694.4	1620.28	1535.75
La conductivité thermique ( $W\ m^{-1}K^{-1}$ )	0.58	0.65	0.75
La chaleur latente ( $J\ kg^{-1}$ )	174335.92	160431	144575.53
La viscosité dynamique ( $kg\ m^{-1}s^{-1}$ )	0.0031	0.0036	0.0043

#### 3-7-1- Analyse des résultats

L'effet de la fraction volumique sur la variation transitoire de la fraction liquide est illustré dans la figure.3.15, pour différentes valeurs de la fraction volumique. On peut constater d'après cette figure que la fraction liquide augmente plus vite avec l'augmentation de la concentration des nanoparticules, ce qui est dû à la diminution du temps de fusion.

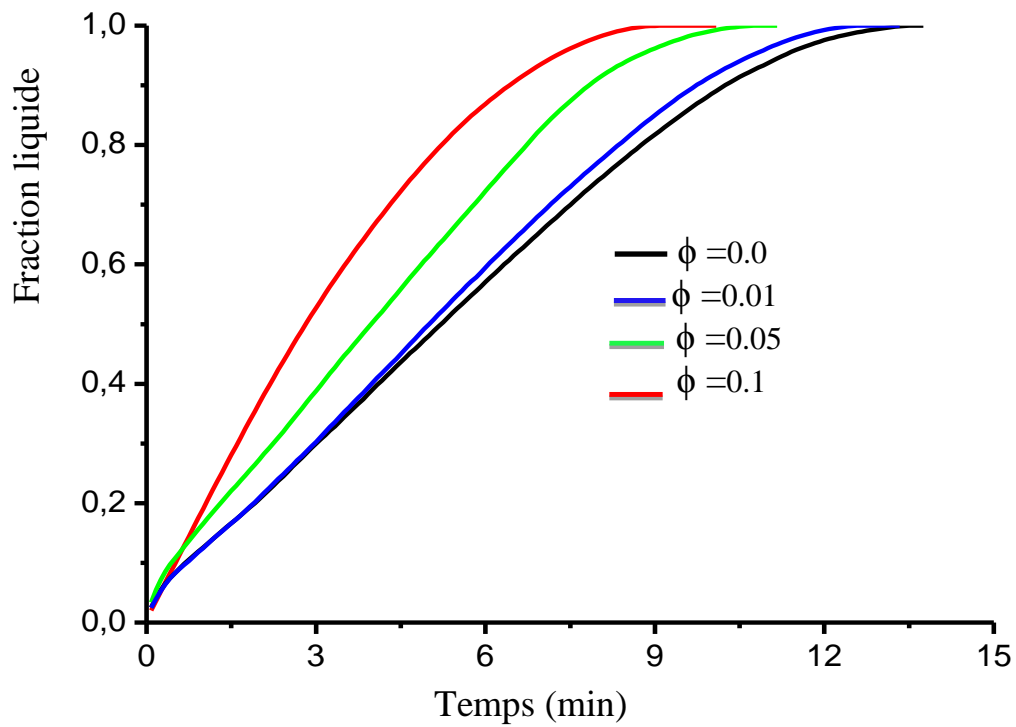


Fig.3.15: Variation de la fraction liquide en fonction du temps pour différentes concentrations.

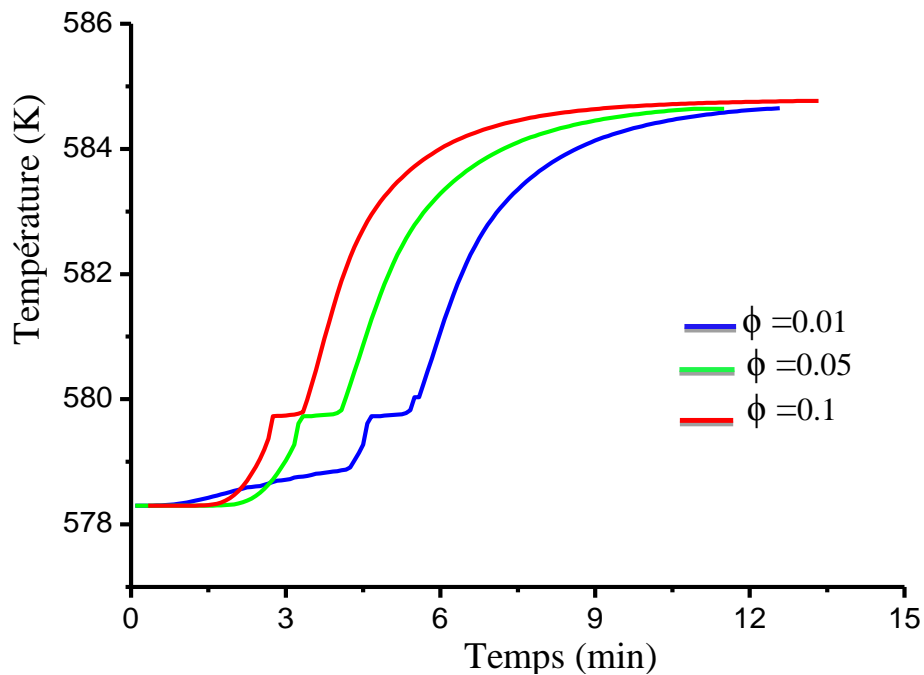


Fig.3.16 : Evolution transitoire de la température du NEPCM au centre de la sphère pour différentes concentrations.

La figure (3.16) montre l'évolution transitoire de la température du NEPCM au centre de la sphère pour différentes concentrations. Au début de fusion du NEPCM les quatre courbes sont à la même ligne et après une certaine période la fusion commence et les températures augmentent jusqu'au le changement de phase. Nous remarquons que les températures augmentent plus rapide pour une valeur de  $\phi$  plus élevée.

### 3-8- Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié un modèle numérique pour le système de stockage d'énergie thermique par chaleur latente dans une capsule sphérique. Plusieurs simulations ont été effectuées dans la première partie pour étudier l'effet de : La température de la paroi, le nombre de Stefan, nombre de Grashof et l'influence de la température initial du système lors de la fusion. Dans la deuxième partie de simulation nous avons étudié l'effet de la concentration des nanoparticules dans le PCM. Les résultats obtenus dans ce chapitre peuvent être résumés comme ci-dessous :

- Pour la même taille de la sphère, le nombre de Stefan et le nombre de Grashof varient en fonction de la différence de température ( $T_w - T_m$ ).
- L'effet combiné de la paroi et la résistance thermique du PCM liquide génère une forte baisse du flux de chaleur.
- Le flux de chaleur moyen augmente avec une augmentation de la température de la paroi externe.
- Lorsqu'on a varié la température ( $T_w - T_m$ ) entre (4, 6 et 7°C) et le nombre de Grashof reste constant, on a obtenu une fusion rapide lorsque le nombre Stefan varie de 0.038 à 0.067.
- La température au centre de la sphère augmente avec l'augmentation de la température de paroi extérieure.
- Le temps de fusion augmente quand la taille de la sphère augmente.
- Pour différentes température initiales du système de stockage (1, 10 et 15°C inférieure à la température de fusion du PCM) aucune différence significative n'a été observée.
- L'injection des nanoparticules dans le MCP améliore la conductivité thermique et la viscosité dynamique du mélange NEPCM.

## Chapitre 3

---

- La température au centre de la sphère augmente plus rapidement avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules.
- L'augmentation de la fraction volumique diminue le temps de fusion.



**Conclusion**

**Générale**

### Conclusion générale

Dans ce projet nous avons traité le problème de stockage d'énergie par chaleur latente avec un matériau à changement de phase qui est le nitrate de sodium dans une enceinte sphérique.

Le travail effectué est composé de trois chapitres, le premier est consacré à l'étude bibliographique des principaux travaux effectués sur le sujet. Nous montrons au cours de cette recherche l'intérêt du sujet à travers les nombreuses applications liées au stockage de la chaleur latente.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté des généralités sur le stockage d'énergie thermique et son principe, ainsi une étude théorique des matériaux à changement de phase et leurs applications, enfin quelques généralités sur les nanoparticules.

Le chapitre trois, présente une simulation numérique pour étudier le stockage d'énergie thermique par chaleur latente dans un matériau à changement de phase, encapsulé dans une enceinte sphérique, cette simulation importée sur le logiciel ANSYS Fluent. Afin d'exploiter l'influence du nombre de Grashof et du nombre de Stefan sur le processus de fusion, l'influence de la température de la paroi extérieure et la température initiale, ainsi l'effet de l'injection des nanoparticules dans le MCP.

Les résultats obtenus peuvent être résumés par les points suivants :

- L'augmentation de température de 5°C à 12°C augmente le nombre de Grashof ( $2.03 \cdot 10^5$  à  $5.07 \cdot 10^5$ ) et le nombre de Stefan (0.048 à 0.11) provoque une diminution du temps de fusion.
- L'augmentation du nombre de Stefan (0.038 à 0.067) et le nombre de Grashof constant ( $1.26 \cdot 10^5$ ) diminuent le temps de fusion.
- Le temps de fusion augmente quand le nombre de Grashof augmente de ( $2.03 \cdot 10^5$  à  $5.57 \cdot 10^5$ ) et le nombre de Stefan constant (0.048).
- La convection naturelle diminue le temps de fusion.
- Le sous-refroidissement ne joue aucun rôle sur le processus de fusion dans l'intervalle de 1°C à 15°C.
- Pour un rayon de sphère de 25mm et une température extérieure de 5°C la fraction liquide et la température au centre de la sphère augmentent avec l'augmentation de la concentration des nanoparticules.
- L'augmentation de la fraction volumique de (0 à 10%) diminue le temps de fusion.



*Références  
bibliographiques*

### Références Bibliographiques

- [1] H. Manz, P. Egolf, P. Suter, and A. Goetzberger, "TIM-PCM external wall system for solar space heating and day lighting," *Solar Energy* vol. 61, pp. 369–379, 1997.
- [2] Khudair, A.M. et M.M Farid « A review on phase change energy storage : materials and applications. *Energy Conversion and Management*, vol.45, p.1597-1675, 2004.
- [3] V. V. Tyagi and D. Buddhi, "PCM thermal storage in buildings: A state of the art," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, pp. 1146–1166, 2007.
- [4] Zhu, Na, Zhenjun Ma et Shengwei Wang « Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials : A review ». *Energy conversion and Management*, vol. 50, n°10, p.3169-318, 2009.
- [5] Zouhir Younsi, Annabelle Joulin, Laurent Zalewski, Stéphane Lassue, et Daniel Rousse, «Etude expérimentale d'un mur trombe-composite à échelle réduite intégrant des matériaux à changement de phase», *Faculté des Sciences Appliquées de l'Université d'Artois, Canada*, 2009.
- [6] M. Lacroix, numerical simulation of a shell-and-tube latent heat thermal energy storage unit. *Solar Energy*, Vol. 50, N° 4, pp. 357-36,1993.
- [7] A. Erek, phase change around a finned tube, *Mühendislik Bilimleri Dergisi, Journal of Engineering Sciences* 9 (1) 15-21, 2003.
- [8] A. Trp, An experimental and numerical investigation of heat transfer during technical grade paraffin melting and solidification in a shell-and-tube latent thermal energy storage unit. *Solar Energy*, Vol. 79, pp. 648–660, (2005).
- [9] Radouane ElBahjaoui , Hamid El Qarnia et El Khadir Lakhel « Etude numérique d'un élément de stockage d'énergie par chaleur latente de fusion chauffé par un fluide en écoulement pulsé », *Université Cadi Ayyad, Faculté des sciences Semlalia, Département de physique*, 2013.
- [10] M. Bechiri, K. Mansouri, Analytical solution of heat transfer in shell-and-tube latent thermal storage system. *Renewable Energy*, Vol. 74, pp. 825–838, (2015).
- [11] J. P. Bédécarrats, Etude des transformations des matériaux à changement de phases encapsulés destinés au stockage du froid. Thèse, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Pau (1993).
- [12] A. Benmansour et M.A. Hamdan « Simulation du Stockage de l'Energie Thermique dans un Lit Fixe de Sphères Contenant un Matériau à Changement de Phase », *Département de Chimie, Faculté des Sciences, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf d'Oran* 2001.



## Références Bibliographiques

---

- [13] C. Arkar, S. Medved « Influence of accuracy of thermal property data of a phase change material on the result of a numerical model of a packed bed latent heat storage with spheres », University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, 2005.
- [14] T. Kouskso, F. Strub, J. Castaing Lasvignottes, A. Jamil, J.P. Bédécarrats , Second law « analysis of latent thermal storage for solar system », Laboratoire de Thermique énergétique et Procédés, Avenue de l'Université, 2007 .
- [15] F.L. Tan, Constrained and unconstrained melting inside a sphere, *Int. Commun. Heat Mass Transfer* 35 (2008) 466–475.
- [16] F.L. Tan, S.F. Hosseinizadeh, J.M. Khodadadi, L. Fan, Experimental and computational study of constrained melting of phase change materials (PCM) inside a spherical capsule, *Int. J. Heat Mass Transfer* 52 (2009) 3464–3472.
- [17] E. Assis, G. Ziskind, R. Letan, Numerical and Experimental Study of Solidification in a Spherical Shell, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 131, 2009.
- [18] A. Felix Regin, S.C. Solanki, J.S. Saini, An analysis of a packed bed latent heat thermal energy storage system using PCM capsules: Numerical investigation, *Renewable Energy* 34 (2009) 1765–1773.
- [19] Nallusamy N, Velraj R. Numerical and experimental investigation on a combined sensible and latent heat storage unit integrated with solar water heating system. *J Sol Energy Eng* 2009;131:1–8.
- [20] L. Yang, X.S. Zhang, Performance of a new packed bed using stratified phase change capsules, *International Journal of Low-Carbon Technology* 7 (3) 208–214, (2012).
- [21] A. B.Shobo, A. Mawire, Numerical investigation of a packed bed thermal energy storage system for solar cooking using encapsulated phase change material, *Third Southern African Solar Energy Conference*, 2015.
- [22] J. M. Khodadadi et S. F. Hosseinizadeh, Nanoparticle-enhanced phase change materials (NEPCM) with great potential for improved thermal energy storage. *Int. Com. in Heat and Mass Transfer*, Vol. 34, pp. 534–543, (2007)
- [23] S.Wu, D. Zhu, X. Li, H. Li, J. Lei, Thermal energy storage behavior of  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$  nanofluids. *Thermochim Acta* 483:73–77.
- [24] C. J. Ho et J. Y. Gao, Preparation and thermophysical properties of nanoparticle-in-paraffin emulsion as phase change material, *Int. Comm. in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 467–470, (2009)
- [25] Qinbo He, Shuangfeng Wang, Mingwei Tong et Yudong Liu, Experimental study on thermophysical properties of nanofluids as phase-change material (PCM) in low

## Références Bibliographiques

---

- temperature cool storage. Energy Conversion and Management, Vol. 64, pp. 199–205 (2012)
- [26] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Stockage>.
- [27] Atul Sharma, Review on thermal energy storage with phase change material and applications, Renewable and sustainable energy reviews 13 (2009).
- [28] [http://fr.ekopedia.org/Stockage\\_de\\_chaleur](http://fr.ekopedia.org/Stockage_de_chaleur).
- [29] S.A. Khateeb, Design and simulation of a lithium-ion battery with a phase change material thermal management system for an electric scooter, Journal of Power Sources 128 (2004)
- [30] Milan Ostrya, pavel Charval « Materials for advanced Heat storage in buildings » 11 th International Conferce on Modern Building Materials, Structures and Techniques, MBMST 2013.
- [31] M. Pierre Pardo, Développement d'un procédé de stockage d'énergie thermique haute température par voie thermochimique, Thèse Doctorat, Université de Toulouse, décembre 2013.
- [32] Öztürk H.H.,1997.The Research on Storage of Solar Energy in Change Material (PCM) for Greenhouse Heating. PhD thesis, ç.U. Institute of Natural and Applied Sciences, Adana.(In Turkish).
- [33] Walid Foudhil, S adok Ben Jabrallah, Belgacem Dhifaoui, Yvan D util, Daniel Rouse « Simulation numérique du stockage thermique par chaleur sensible et latente dans un canal poreux » analyse des performances et comparaison, 2eme Congres de l'Association Marocaine de thermique, Tunisie
- [34] entreprise Europe network. Source de wikipedia.org(15/07/2008),chambre régionale de commerce et d'industrie.
- [35] Maha Ahmad, Couplage matériaux à changement de phase, supe isolation, apports solaire.
- [36] M.Larinicol. Stocker de la chaleur avec les matériaux à changement de phase; CRM.
- [37] Serge Blaise EKOMY ANGO « Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment : développement d'un système actif à matériaux à changement de phase» l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2011.
- [38] fiche technique\*Marques de commerce de la Compagnie, Pétrolière Impériale,Licencié. Lubrifiants et produits spéciaux, Services techniques du Marketing Infotech: 1-800-268-3183.

## Références Bibliographiques

---

- [39] Stéphanie HONGOIS (Ingénieur) « Stockage de chaleur inter-saisonnier par voie thermo-chimique pour le chauffage solaire de la maison individuelle » L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1er avril 2011.
- [40] S. Citherlet et J. Bony. Cosy PCM Combi-Système avec Matériaux à Changement de Phase ; Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD/LESBAT).
- [41] abhat A, aboul- Enein S, Malatidis N « Heat of fusion storage system for solar heating applications ». C. Den Quden, 1981.
- [42] Saib Hind, Etude de simulation des phénomènes de transfert thermique lors de la solidification d'alliages, mémoire de master 2009.
- [43] Cheik SECK « analyse et modélisation du comportement thermique d'un système de préchauffage d'air neuf pour l'habitat » intégrant un matériau à changement de phase, université d'Artois.
- [44] A. Gontard, K. Gryska, L. Lallemand « Amélioration de la conductivité thermique de matériau à changement de phase », Université de Pau des pays de l'Adour 2012.
- [45] zalba B, Mari'n JM , cabeza LF, and Mehling H « Review on thermal energy storage with phase change : materials, heat transfer analysis and applications » Appl therm Eng. 2003 ; 23 : 251-83.
- [46] Bruno BINET « Etude de la fusion dans des enceintes munies de sources de chaleur discrètes ». Sherbrooke (Québec), CANADA Novembre 1998.
- [47] Sharma, A, V.V, Tyagi, C.R, Chen, & D., Buddhi. 2009a. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. Renewable and sustainable energy reviews, Vol.13, pages 318–345.
- [48] Sadok Ben Jabrallah, Professeur universitaire, physique-énergétique « Les Matériaux à changement de phase », Laboratoire d'énergétique et des Transferts Thermique et Massique (Tunis).
- [49] V.V. Tyagia, S.C. Kaushika, S.K. Tyagib, T. Akiyamac, development of phase change materials based micro encapsulated technology for buildings : A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (1373-139) 2011.
- [50] O. Doche, J.-a. Gruss, and O. Soriano, "Une nouvelle technologie pour les échangeurs thermiques : Le Nanofluide," in 18<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique, no. 1995, 2007.
- [51] D. David, "Nanofluides, l'efficacité à la hausse," www.cooling-masters.com, 2008.
- [52] J.C. Maxwell. A Treatise on electricity and magnetism, *Clarendon Press*, U.K., 1891.

## Références Bibliographiques

---

- [53] R.L. Hamilton and O.K. Crosser. Thermal conductivity of heterogeneous two component systems. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals* 1(3), 187-191, 1962.
- [54] D.P.H. Hasselman, and L.F. Johnson. Effective thermal conductivity of composites with interfacial thermal Barrier resistance. *Journal of composite Materials*, 21(6):508-515, 1987.
- [55] O.M. Wilson, X.Y. Hu, D.G. Cahill, and P.V. Braun. Colloidal metal particles as probes of nanoscale thermal transport in fluids. *Physical Review B*, 66(22), 2002.
- [56] W. Yu and S.U.S. Choi. The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model. *J. nanoparticle Res* 5: 167-71, 2003.
- [57] D.A.G. Bruggeman. *Ann. Physics (Leipzig)*, 24, 636, 1935.
- [58] S. Ozerinc, "Heat Transfer Enhancement with Nanofluids," PhD thesis, Middle east Technical University, Ankara, Turkey, 2010.
- [59] C. Nguyen, F. Desgranges, N. Galanis, G. Roy, T. Maré, S. Boucher, and H. Angue Mintsa, "Viscosity data for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid - hysteresis : is heat transfer enhancement using nanofluids reliable ?," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 47, pp. 103–111, Feb. 2008.
- [60] W. Yu, D. France, S. Choi, and J. Routbort, "Review and Assessment of Nanofluid Technology for Transportation and Other Applications," tech. rep., Argonne National Laboratory, Energy Systems Division, 2007.
- [61] J.-P. Ribeiro and J.-A. Grüss, "Nanofluides pour les applications thermiques," *Technique de l'ingénieur*, vol. 33, pp. 1–9, 2010.
- [62] M. Rostamani, S. Hosseinizadeh, M. Gorji, and J. Khodadadi, "Numerical study of turbulent forced convection flow of nanofluids in a long horizontal duct considering variable properties," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 37, pp. 1426–1431, 2010.